



FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL

FACULDADE DE ENGENHARIAS, ARQUITETURA E URBANISMO E GEOGRAFIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E SUSTENTABILIDADE

CURSO DE Mestrado Profissional em Eficiência Energética e Sustentabilidade

ANÁLISE PARAMÉTRICA DAS PROPRIEDADES HIGROTÉRMICAS DA TAIPA DE PILÃO PARA USO NA SIMULAÇÃO TERMOENERGÉTICA

Mayara Tartarotti Cardozo da Silva

FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL
Faculdade de Engenharias, Arquitetura e Urbanismo e Geografia
Mestrado Profissional em Eficiência Energética e Sustentabilidade

**ANÁLISE PARAMÉTRICA DAS PROPRIEDADES
HIGROTÉRMICAS DA TAIPA DE PILÃO PARA USO NA
SIMULAÇÃO TERMOENERGÉTICA**

MAYARA TARTAROTTI CARDOZO DA SILVA

Trabalho de Conclusão de Curso do Mestrado Profissional apresentado na Faculdade de Engenharias, Arquitetura e Urbanismo e Geografia da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, para obtenção do título de Mestre em Eficiência Energética e Sustentabilidade.

Orientadora: Prof^a. Dra. Ana Paula da Silva Milani

CAMPO GRANDE

MAIO / 2024



Serviço Público Federal
Ministério da Educação
Fundação Universidade Federal de Mato Grosso do Sul



FOLHA DE APROVAÇÃO

MAYARA TARTAROTTI CARDOZO DA SILVA

ANÁLISE PARAMÉTRICA DAS PROPRIEDADES HIGROTÉRMICAS DA TAIPA DE PILÃO PARA USO NA SIMULAÇÃO TERMOENERGÉTICA

Redação final do Trabalho de Conclusão de Curso, aprovado pela Banca Examinadora em 14 de maio de 2024, na Faculdade de Engenharias, Arquitetura e Urbanismo e Geografia da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul para obtenção do título de Mestre em Eficiência Energética e Sustentabilidade.

Banca examinadora:

Dra. Ana Paula da Silva Milani - (Orientadora)

Dr. Arthur Santos Silva.

Dr. Lucas Rosse Caldas.

Dra. Andrea Naguissa Yuba.

Dr. Marcio Jose Sorgato.

NOTA
MÁXIMA
NO MEC

UFMS
É 10!!!



Documento assinado eletronicamente por **Ana Paula da Silva Milani, Professora do Magistério Superior**, em 19/06/2024, às 08:16, conforme horário oficial de Mato Grosso do Sul, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).

NOTA
MÁXIMA
NO MEC

UFMS
É 10!!!



Documento assinado eletronicamente por **Arthur Santos Silva, Professor do Magisterio Superior**, em 19/06/2024, às 08:20, conforme horário oficial de Mato Grosso do Sul, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).

NOTA
MÁXIMA
NO MEC

UFMS
É 10!!!



Documento assinado eletronicamente por **Lucas Rosse Caldas, Usuário Externo**, em 20/06/2024, às 05:40, conforme horário oficial de Mato Grosso do Sul, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufms.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **4906850** e o código CRC **630E5AAE**.

COLEGIADO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E SUSTENTABILIDADE

Av Costa e Silva, s/nº - Cidade Universitária

Fone:

CEP 79070-900 - Campo Grande - MS

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (UFMS) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo fomento à educação e o desenvolvimento profissional.

À Fundação de Apoio ao Desenvolvimento do Ensino, Ciência e Tecnologia do Estado de Mato Grosso do Sul (FUNDECT), pelo suporte financeiro à pesquisa.

Ao Programa de Pós-graduação Stricto Sensu em Eficiência Energética e Sustentabilidade (PPGEES) e a todo o corpo docente pelos valiosos ensinamentos, em especial à Prof.^a Dra. Ana Paula da Silva Milani e Prof. Dr. Arthur Santos Silva, pelos conselhos e acompanhamento durante todo o processo.

Aos membros da banca de qualificação e de defesa, agradeço pelas dicas e orientações que ajudaram a compor o trabalho final.

Agradeço em especial a minha orientadora Prof.^a Dra. Ana Paula da Silva Milani pelo valioso apoio e orientação e também pela amizade que cultivamos.

À minha família, agradeço pelo apoio e incentivo, principalmente por serem minha fonte de força, inspiração e conforto nos momentos difíceis.

Aos meus amigos, agradeço por tornarem a vida mais leve com sua amizade constante e apoio mútuo.

RESUMO

Estruturas tradicionais como a taipa de pilão constituem uma alternativa que incorpora princípios e materiais locais para promover tanto a sustentabilidade da edificação quanto o conforto dos usuários. Neste contexto, o objetivo deste trabalho foi parametrizar as propriedades higrotérmicas da taipa de pilão por meio de diferentes processos de simulações computacionais para aplicação na avaliação de desempenho termoenergético das construções com terra. A metodologia consistiu na modelagem e simulação computacional de uma edificação com paredes de taipa, por meio dos softwares *EnergyPlus* (versão 9.4) e *Jeplus* (versão 2.1.0). Considerou-se dois modelos termoenergéticos: CTF (*conduction transfer function*) e EMPD (*effective moisture penetration depth*). Além disso, as variáveis estudadas foram a espessura das paredes (12, 20 e 30cm), as propriedades higrotérmicas da taipa a partir de uma revisão bibliográfica e a rotina de uso e ocupação da edificação. Os resultados indicaram que não houve diferença significativa entre os métodos CTF e EMPD para avaliação do desempenho termoenergético e conforto térmico dos usuários no ambiente construído com taipa de pilão. Observou-se que tanto a rotina de uso e ocupação quanto a espessura das paredes de taipa possuem influência significativa no consumo energético da edificação. Como produto final foi definido um intervalo de confiança para os valores das propriedades higrotérmicas da taipa de pilão, além de apresentar recomendações para a aplicação dos resultados na forma de diretrizes de projeto. Isso contribui para o avanço na padronização das especificidades e na replicabilidade dos sistemas construtivos com terra na construção civil.

Palavras chave: propriedades higrotérmicas, construção com terra, *EnergyPlus*, *Jeplus*, modelo EMPD, modelo CTF.

ABSTRACT

Traditional structures such as rammed earth constitute an alternative that incorporates local principles and materials to promote both the sustainability of the building and the comfort of users. In this context, the objective of this work was to parameterize the hygrothermal properties of rammed earth through different computer simulation processes for application in the evaluation of thermoenergetic performance of earth constructions. The methodology consisted of modeling and computer simulation of a building with mud walls, using the software EnergyPlus (version 9.4) and Jeplus (version 2.1.0). Two thermoenergetic models were considered: CTF (conduction transfer function) and EMPD (effective moisture penetration depth). Furthermore, the variables studied were the thickness of the walls (12, 20 and 30cm), the hygrothermal properties of the rammed earth based on a bibliographical review and the routine use and occupation of the building. The results indicated that there was no significant difference between the CTF and EMPD methods for evaluating the thermoenergetic performance and thermal comfort of users in the rammed earth environment. It was observed that both the routine of use and occupation and the thickness of the rammed earth walls have a significant influence on the building's energy consumption. As a final product, a confidence interval was defined for the values of the hygrothermal properties of the rammed earth, in addition to presenting recommendations for the application of the results as design guidelines. This contributes to advances in the standardization of the specificities and replicability of earthen construction systems in civil construction.

Keywords: hygrothermal properties, earth construction, EnergyPlus, Jeplus, EMPD model, CTF model.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|--|
| Figura 1 – Exemplo de construção contemporânea com taipa. Fonte: Taipal (2024) .2 | |
| Figura 2 – Processo construtivo da taipa. Fonte: Narloch et al. (2020).....7 | |
| Figura 3 – Valores de referência para transmitância térmica no Brasil. Fonte: Adaptado de NBR 15575-4 (2021) 12 | |
| Figura 4 – Representação esquemática das trocas de calor e umidade em um componente construtivo. Fonte: Belizario-Silva e Brito (2024). 14 | |
| Figura 5 - Isoterma de sorção da taipa de pilão. Fonte: Adaptado de Losini et al. (2023b). 17 | |
| Figura 6 - Diagrama da metodologia. Fonte: Autoral.....25 | |
| Figura 7 – Fluxograma da modelagem e simulação computacional. Fonte: Autoral. 27 | |
| Figura 8 – Foto da fachada norte do Canteiro Experimental UFMS. Fonte: Autoral .28 | |
| Figura 9 - Planta baixa do Canteiro Experimental UFMS. Fonte: Modificado de Veraldo (2015)29 | |
| Figura 10 - Modelagem do Quarto 1 no SketchUp. Fonte: Autoral.....30 | |
| Figura 11 – Cenários simulados para o método CTF. Fonte: Autoral.31 | |
| Figura 12 - Padrões de uso e ocupação do tipo dormitório. Fonte: Adaptado de NBR 15575-1 (2021).....33 | |
| Figura 13 - Padrões de uso e ocupação do tipo uso misto. Fonte: Adaptado de NBR 15575-1 (2021).....33 | |
| Figura 14 - Dados de entrada necessários para o modelo EMPD. Fonte: <i>EnergyPlus</i> (versão 9.4).36 | |
| Figura 15 – Mapa da zona bioclimática 6. Fonte: NBR 15220-3 (2005)45 | |
| Figura 16 - Gráfico de temperatura e umidade da zona 6. Fonte: Autoral46 | |

| | |
|--|----|
| Figura 17 – Gráfico de velocidade e direção do vento na zona 6. Fonte: Autoral | 47 |
| Figura 18 - Histograma da carga térmica de resfriamento. Fonte: Autoral | 49 |
| Figura 19 – Gráficos de temperatura horária média em um dia típico de verão e inverno em Campo Grande - MS. Fonte: Autoral | 50 |
| Figura 20 - Histograma da carga térmica de aquecimento. Fonte: Autoral | 54 |
| Figura 21 - Histograma das horas de desconforto durante a ocupação. Fonte: Autoral | 56 |
| Figura 22 – Gráfico de dispersão da condutividade térmica em função da carga térmica de resfriamento. Fonte: Autoral | 62 |
| Figura 23 - Densidade de ocorrência da carga térmica de resfriamento (kWh). Fonte: Autoral | 69 |
| Figura 24 - Densidade de ocorrência carga térmica de aquecimento (kWh). Fonte: Autoral | 71 |
| Figura 25 - Densidade de ocorrência horas de desconforto (h). Fonte: Autoral | 74 |
| Figura 26 – Diretrizes de projeto: intervalo de confiança das propriedades higrótérmicas da taipa. Fonte: Autoral | 78 |
| Figura 27 – Carta psicrométrica da zona bioclimática 6. Fonte: NBR 15220-3 (2005) | 78 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1 – Definição das propriedades higrotérmicas dos materiais. Fonte: Szokolay (2008)..... | 16 |
| Tabela 2 - Revisão bibliográfica das propriedades higrotérmicas da taipa. Fonte: Autoral..... | 18 |
| Tabela 3 - Valores das propriedades térmicas dos materiais da construção civil. Fonte: Autoral..... | 19 |
| Tabela 4 – Detalhamento construtivo do Quarto 1 modelado no SketchUp. Fonte: Autoral..... | 30 |
| Tabela 5 - Características da simulação. Fonte: Adaptado de NBR 15575-1 (2021) | 32 |
| Tabela 6 – Descrição da temperatura do solo em Campo Grande – MS durante o ano. Fonte: Autoral..... | 34 |
| Tabela 7 – Descrição das propriedades dos materiais utilizados no quarto 1. Fonte: Autoral..... | 34 |
| Tabela 8 – Valores dos coeficientes do material. Fonte: Adaptado de Kerestecioglu et al. (1988). | 36 |
| Tabela 9 – Fator de resistência à difusão de vapor de água da taipa para cada umidade relativa. Fonte: Autoral. | 38 |
| Tabela 10 - Valores das propriedades higrotérmicas consideradas nas simulações. Fonte: Autoral..... | 39 |
| Tabela 11 – Interpretação do coeficiente de correlação linear. Fonte: Autoral..... | 43 |
| Tabela 12 – Valor médio e desvio padrão da carga térmica de resfriamento. Fonte: Autoral..... | 49 |
| Tabela 13 – Valor médio e desvio padrão da carga térmica para aquecimento. Fonte: Autoral..... | 54 |

| | |
|--|----|
| Tabela 14 – Valor médio e desvio padrão das horas de desconforto durante a ocupação. Fonte: Autoral. | 56 |
| Tabela 15 - Valor médio e desvio padrão das propriedades higrotérmicas da taipa. Fonte: Autoral..... | 59 |
| Tabela 16 – Coeficiente de correlação linear da carga térmica de resfriamento. Fonte: Autoral..... | 60 |
| Tabela 17 - Coeficiente de correlação linear da carga térmica de aquecimento. Fonte: Autoral..... | 60 |
| Tabela 18 - Coeficiente de correlação linear das horas de desconforto durante ocupação. Fonte: Autoral. | 61 |
| Tabela 19 – Coeficiente de correlação linear das variáveis exclusivas do método EMPD. Fonte: Autoral..... | 61 |
| Tabela 20 – ANOVA EMPD para parede de 12cm. Fonte: Autoral. | 64 |
| Tabela 21 – ANOVA CTF para parede de 12cm. Fonte: Autoral..... | 64 |
| Tabela 22 – ANOVA EMPD para parede de 20cm. Fonte: Autoral. | 65 |
| Tabela 23 – ANOVA CTF para parede de 20cm. Fonte: Autoral..... | 65 |
| Tabela 24 – ANOVA EMPD para parede de 30cm. Fonte: Autoral. | 66 |
| Tabela 25 – ANOVA CTF para parede de 30cm. Fonte: Autoral..... | 66 |
| Tabela 28 – Intervalo de confiança da carga térmica de resfriamento. Fonte: Autoral. | 68 |
| Tabela 29 - Intervalo de confiança da carga térmica de aquecimento. Fonte: Autoral. | 70 |
| Tabela 30 - Intervalo de confiança das horas de desconforto durante a ocupação. Fonte: Autoral..... | 72 |

Tabela 26 – Parametrização das propriedades higrotérmicas da taipa. Fonte: Autoral.
.....75

Tabela 27 – Comparativo entre os valores das propriedades higrotérmicas parametrizadas e normatizadas. Fonte: Autoral.....76

LISTA DE EQUAÇÕES

| | |
|---|----|
| Equação 1 - Fator de resistência à difusão de vapor de água | 36 |
| Equação 2 - Permeabilidade ao vapor de água do ar parado | 37 |
| Equação 3 - Permeabilidade ao vapor do material..... | 37 |
| Equação 4 – Cálculo do coeficiente de correlação linear | 42 |
| Equação 5 – Equação do consumo energético real..... | 52 |

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| 1 - INTRODUÇÃO | 1 |
| 1.1 - Objetivos | 5 |
| 1.1.1 - Objetivo geral | 5 |
| 1.1.2 - Objetivos específicos | 5 |
| 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 6 |
| 2.1- Caracterização do sistema construtivo taipa de pilão | 6 |
| 2.2 - Comportamento e desempenho térmico da taipa de pilão | 10 |
| 2.3 - Propriedades higrotérmicas da taipa de pilão | 14 |
| 2.4 - Modelos para análise de transferência de calor e umidade | 20 |
| 2.4.1 - CTF | 21 |
| 2.4.2 - EMPD | 22 |
| 2.4.3 - HAMT | 23 |
| 3 - MATERIAIS E MÉTODOS | 25 |
| 3.1 - Etapa inicial – Pesquisa e revisão bibliográfica | 25 |
| 3.2 - Modelagem computacional | 26 |
| 3.2.1 – Modelagem da envoltória | 28 |
| 3.2.2 – Método CFT | 31 |
| 3.2.3 – Método EMPD | 35 |
| 3.3 - Simulação computacional | 38 |
| 3.4 - Análise estatística dos resultados | 41 |
| 3.4.1 - Análise de sensibilidade | 42 |
| 3.4.2 - Análise de incerteza | 43 |
| 4 - RESULTADO E DISCUSSÕES | 45 |
| 4.1 - Análise climática de Campo Grande - MS | 45 |
| 4.2 - Comportamento termoenergético da taipa | 48 |
| 4.2.1 - Carga térmica de resfriamento anual | 48 |
| 4.2.2 - Carga térmica de aquecimento anual | 53 |
| 4.2.3 - Horas de desconforto durante a ocupação anual | 55 |
| 4.3 - Análise estatística das simulações | 57 |
| 4.3.1 - Análise de sensibilidade | 58 |
| 4.3.2 - Análise de incerteza | 67 |
| 5 - CONSIDERAÇÕES FINAIS | 80 |
| 6 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 82 |

1- INTRODUÇÃO

A indústria da construção civil vai além do seu impacto econômico, exercendo influência direta no ambiente construído e no bem-estar social. Por meio da concepção e construção de edificações funcionais e esteticamente agradáveis, essa indústria contribui para o desenvolvimento e aprimoramento de cidades e comunidades. No entanto, enfrenta desafios significativos no que diz respeito à sustentabilidade, eficiência energética, redução de resíduos e minimização dos impactos ambientais.

Diante da crescente preocupação global com os problemas ambientais, o regionalismo e o conhecimento das estruturas tradicionais emergem como opções valiosas para o desenvolvimento de edificações sustentáveis. Esta mudança de perspectiva por parte dos profissionais envolvidos no projeto de edifícios busca aproveitar os princípios construtivos e materiais locais, os quais evoluíram ao longo do tempo em resposta ao ambiente e às condições regionais específicas, a chamada arquitetura vernacular.

Em um livro específico sobre o tema, Harries e Sharma (2020) definem construções vernaculares como sendo resultado da observação e experiências humanas ao longo de séculos, porém ao mesmo tempo estruturas cientificamente complexas que ainda são objeto de estudos. Esta abordagem enfatiza a importância de incorporar soluções adaptativas e culturalmente relevantes no projeto de edifícios, em busca de uma maior harmonia entre o meio ambiente e a sociedade, respeitando as características regionais.

Outro ponto explicado por Harries e Sharma (2020) é o conceito de materiais e tecnologias não convencionais. De acordo com os autores, em geral, tais materiais são de ocorrência natural e relativamente não processados, adotados em virtude de seus benefícios culturais, ambientais ou tecnológicos. Em contraste, os chamados materiais convencionais são caracterizados pelo “uso generalizado, processamento industrializado e custos unitários mínimos”, além de serem bem integrados nas cadeias de produção global. Exemplos:

- Material convencional: concreto, aço e madeira.
- Material não-convencional: terra, bambu e biomassa.

Assim sendo, destaca-se a terra como um dos principais materiais não convencionais utilizados na arquitetura vernacular. Há inúmeras técnicas de construção com terra e, de acordo com Torgal e Jalali (2010), podemos classificá-las em três grupos:

- monolítica: taipa de pilão;
- alvenaria: bloco de terra comprimido e adobe;
- enchimento ou revestimento: taipa de mão.

O sistema construtivo objeto de estudo desta pesquisa é a taipa de pilão – taipa, uma técnica tradicional com exemplos arquitetônicos notáveis em diversas regiões do mundo. Além de ser empregada em monumentos mundialmente reconhecidos, como trechos da Grande Muralha da China e o Palácio de Alhambra na Espanha, a taipa também é amplamente utilizada na construção de residências, tornando-se um sistema construtivo difundido em diversas culturas ao redor do mundo.

Com relação ao uso contemporâneo da taipa, arquitetos e engenheiros estão redescobrimo essa técnica tradicional, adaptando-a às exigências modernas de construção. A taipa é valorizada por promover o uso de materiais locais e métodos construtivos de baixo carbono, além do seu potencial desempenho térmico e acústico. Outro fator que tem impulsionado sua utilização é a cor e a textura, visto que esta é uma estética agradável e que agrega características únicas às residências.

Figura 1 – Exemplo de construção contemporânea com taipa. Fonte: Taipal (2024)



Ressalta-se que os materiais e métodos adotados na construção da edificação estão diretamente relacionados ao desempenho e consumo energético da edificação, bem como ao conforto do usuário. Portanto, é essencial que se compreenda o funcionamento do sistema construtivo com taipa, a fim de garantir o acesso a habitações com infraestrutura de qualidade, de forma segura e confiável. Tal meta, vai ao encontro de quatro dos objetivos de desenvolvimento sustentável (ODS), propostos pela Organização das Nações Unidas (ONU):

- ODS 9: Construir infraestrutura resiliente, promover a industrialização inclusiva e sustentável, e fomentar a inovação;
- ODS 11: Tornar as cidades e os assentamentos humanos inclusivos, seguros, resilientes e sustentáveis;
- ODS 12: Assegurar padrões de produção e de consumo sustentáveis.
- ODS 13: Tomar medidas urgentes para combater a mudança do clima e seus impactos

Portanto, ao compreender o comportamento higrotérmico da taipa, é possível contribuir para o desenvolvimento de infraestruturas resilientes, melhorar a qualidade das edificações e tornar os assentamentos humanos mais inclusivos, seguros e sustentáveis. Além disso, essa compreensão pode colaborar para uma gestão mais sustentável e eficiente dos recursos naturais disponíveis em cada região.

Um estudo realizado por Giesekam, Barrett e Taylor (2016) no Reino Unido investigou as principais causas da não adoção de sistemas construtivos não convencionais entre profissionais da área de construção civil e seus investidores. Com relação a sistemas construtivos com solo, a pesquisa englobou: taipa de pilão, blocos de solo comprimidos, adobes e cob. Entre as barreiras citadas pelos entrevistados, as duas respostas mais predominantes foram a falta de conhecimento técnico e a percepção negativa sobre o método construtivo.

Portanto, estudos sobre comportamento da terra como material de construção são essenciais para viabilizar e otimizar seu uso. Assim sendo, compreender a forma como a terra compactada reage às mudanças de umidade e temperatura é fundamental para o desenvolvimento de sistemas construtivos eficientes em termos de desempenho térmico, durabilidade e conforto dos usuários.

No entanto, um dos principais desafios ao estudar o método construtivo da taipa de pilão é a variabilidade das propriedades higrotérmicas e mecânicas. Losini et al.

(2023b) explicam que diversos fatores influenciam essa variabilidade, entre os quais: distribuição granulométrica dos grãos, porcentagem de finos (silte e argila) e o índice de porosidade da mistura. Além disso, é essencial levar em conta o fenômeno de transferência de umidade em paredes de taipa, visto que a quantidade de água presente no elemento construtivo pode alterar o valor das propriedades material, logo, afetar o desempenho térmico e mecânico.

Neste contexto, Belizario-Silva e Brito (2024) comentam sobre a importância da simulação higrotérmica para compreender o comportamento das edificações diante da umidade. Porém, os autores salientam que a precisão dessa avaliação está diretamente ligada à qualidade dos dados de entrada e à exatidão do modelo empregado. Além disso, apontam para a escassez de informações sobre as propriedades higrotérmicas dos materiais de construção no Brasil, o que dificulta a aplicação precisa dos métodos de simulação.

Dessa forma, nota-se a importância de estudos sobre a variabilidade das propriedades higrotérmicas da taipa no contexto das simulações termoenergéticas. As propriedades higrotérmicas como a condutividade térmica, o calor específico, a massa específica e a permeabilidade ao vapor de água influenciam diretamente o desempenho energético de edificações. Portanto, compreender a variabilidade de tais características permite uma modelagem mais precisa e realista, contribuindo para a otimização do projeto e a tomada de decisões voltadas para a eficiência energética e o conforto ambiental dos edifícios e, conseqüentemente, o avanço no campo da construção sustentável.

1.1 - Objetivos

1.1.1 - Objetivo geral

Analisar a incerteza das propriedades higrótérmicas da taipa de pilão por meio de diferentes processos de simulações computacionais para aplicação na avaliação de desempenho termoenergético das construções com terra.

1.1.2 - Objetivos específicos

- Identificar as propriedades higrótérmicas relevantes para a simulação termoenergética em construções com terra;
- Determinar intervalos de confiança para os valores das propriedades higrótérmicas da taipa de pilão;
- Avaliar a influência das propriedades higrótérmicas e dimensões geométricas da taipa de pilão no processo de simulação termoenergética;
- Determinar a significância da aplicação dos diferentes métodos de simulação termoenergética para a verificação do desempenho da taipa de pilão;
- Desenvolver diretrizes de projeto para adoção assertiva das propriedades higrótérmicas da taipa de pilão em diferentes contextos.

2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

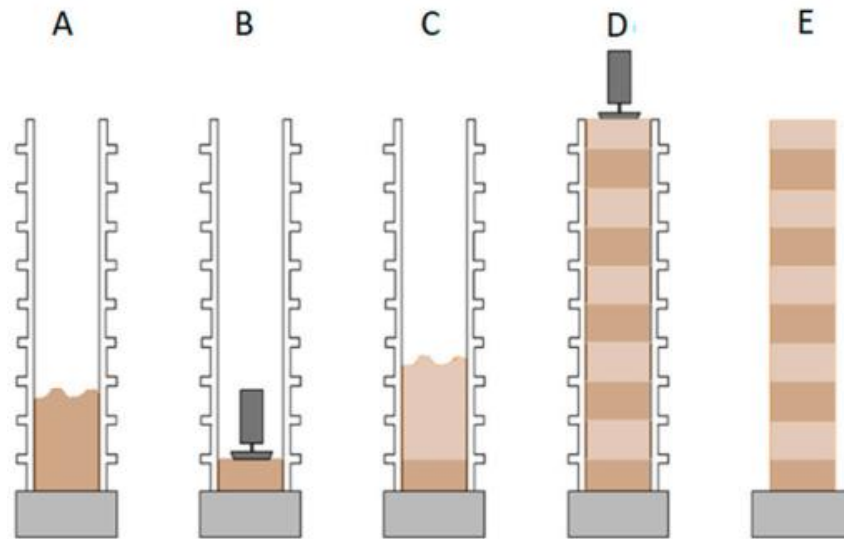
Esta seção oferece uma revisão bibliográfica abrangente sobre a taipa de pilão, destacando suas características e desempenho. Primeiramente, descreve-se o sistema construtivo, contextualizando sua utilização na atualidade. Em seguida, analisa-se o comportamento térmico da taipa, correlacionando com os diferentes tipos de climas. Na sequência, as propriedades higrotérmicas do material também são investigadas, examinando sua capacidade de gerenciar a transferência de calor e umidade. Por último, avaliam-se os modelos utilizados para prever o desempenho higrotérmico da taipa no ambiente construído.

2.1- Caracterização do sistema construtivo taipa de pilão

A taipa de pilão, comumente chamada taipa, foi contemplada recentemente com uma norma técnica própria que regula os requisitos, procedimentos e controle de sua execução. A NBR 17014 (2022) define este sistema construtivo como sendo: “parede executada com terra no estado úmido, sem ou com estabilizante, compactada em sucessivas camadas, dentro de fôrmas removíveis, com o uso de compactador manual ou mecânico”. A norma apresenta todas as diretrizes necessárias para execução da taipa, desde indicações sobre o preparo das fôrmas e da mistura, até o desmolde e inspeção final. O processo de construção da taipa está esquematizado na Figura 2, a qual apresenta os seguintes processos:

- A: preenchimento da fôrma com uma camada com altura máxima de 20 cm com a mistura úmida;
- B: compactação da camada, de forma mecânica ou hidráulica, aplicando-se golpes de maneira contínua e distribuída por toda a sua extensão;
- C: preenchimento da fôrma com uma nova camada da mistura;
- D: repetição do processo de adição e compactação de camadas sucessivas de mistura até o preenchimento da forma;
- E: realização da desforma e inspeção da taipa.

Figura 2 – Processo construtivo da taipa. Fonte: Narloch et al. (2020)



Dentre as vantagens da utilização do sistema da taipa de pilão, Losini et al. (2023) destacam: baixa energia incorporada, reciclabilidade, elevada massa térmica e capacidade de regulação térmica. Além disso, os autores comentam sobre a possibilidade de reuso dos resíduos não perigosos de escavações para aplicação como matéria prima na construção da taipa.

Uma das características das paredes a base de terra é a capacidade de regular naturalmente a umidade dentro dos ambientes construídos. Kennedy, Smith e Wanek (2015), explicam que tais sistemas construtivos apresentam uma estrutura porosa e permeável que permite que o vapor de umidade se mova através deles, sendo às vezes chamado de "respirabilidade" da parede. Dessa forma, pode-se afirmar que a adoção da taipa contribui para manutenção de níveis adequados de umidade de forma passiva no interior da edificação.

Destaca-se que a eficácia da taipa varia com relação ao tipo de clima na qual a edificação está inserida. Ou seja, enquanto em climas quentes a respirabilidade da parede promove conforto aos usuários, em climas frios a falta de isolamento adequado pode comprometer sua eficácia como barreira térmica, tornando-a menos apropriada para essas condições.

Em um estudo realizado por Yu et al. (2022), os autores explicam que em climas frios, a taipa não oferece melhor desempenho térmico do que os edifícios convencionais, a menos que as paredes externas sejam suficientemente espessas e com adição de uma camada isolante.

Nesse sentido, os autores consideraram diversos cenários variando os tipos de camadas isolantes na taipa a fim de identificar o sistema construtivo ideal para a cidade de Pequim, na China. O resultado otimizado para construções residências foi o sistema formado pela taipa com espessura de 36cm com adição de uma placa de poliestireno de 5cm na face externa da parede.

Logo, no contexto atual de busca por soluções construtivas com menor impacto ambiental, a taipa se destaca como um sistema construtivo de grande potencial, especialmente em um país com características climáticas tão diversas como o Brasil. Em virtude da extensão territorial, há uma considerável variação climática no território brasileiro, que engloba desde regiões de alta umidade até áreas de clima semiárido. Assim sendo, a taipa surge como uma possível aliada no setor da construção, pois possui a capacidade de regular naturalmente a temperatura interna das edificações, proporcionando conforto térmico em meio a diferentes condições atmosféricas.

Com relação a espessura das paredes de taipa, um problema apresentado por Serrano et al. (2017) é que há uma pressão para maximizar o espaço habitável das residências, o que gera uma tendência de reduzir a espessura das paredes de taipa nas construções contemporâneas. A espessura média das construções tradicionais é entre 60 e 100cm, enquanto as obras mais modernas ficam na faixa de 30 a 35cm. Ressalta-se que a diminuição da espessura das paredes pode ter implicações no desempenho térmico do edifício, aumentando a taxa de transferência de calor entre o ambiente interno e externo. Portanto, os autores apresentam como soluções a adição de camadas isolantes e adoção de estratégias arquitetônicas passivas, por exemplo considerar a orientação solar e o sombreamento no projeto da edificação.

Um ponto interessante discutido por Ben-Alon et al. (2021), é em relação à pegada de carbono, uma medida da quantidade de gases de efeito estufa liberados na atmosfera de forma direta ou indireta. Os autores comentam que materiais de construção naturais, incluindo a terra, apresentam uma pegada de carbono menor e emitem menos gases de efeito estufa. Além disso, o estudo demonstra que paredes de materiais naturais requerem até 71% menos energia durante o processo de produção, em comparação com as paredes de materiais convencionais.

Neste contexto, um estudo recente conduzido por Milani e Lunes (2023) avaliou os aspectos ambientais do ciclo de vida da taipa. Os autores concluíram que o tipo de compactação, de composição da mistura e do sistema de fôrmas pode apresentar infinitas variações, mas o resultado continuará sendo uma tecnologia construtiva de

baixa energia embutida. Outro resultado observado é que a etapa do transporte do material até o local da obra é o mais impactante em relação às emissões de gases do efeito estufa durante o ciclo de vida da taipa.

Em mais um estudo sobre o ciclo de vida da taipa, Caldas, Martins e Toledo Filho (2021) compararam diferentes configurações de parede de taipa, variando a espessura e porcentagem de cimento, com sistemas construtivos convencionais de alvenaria estrutural de blocos de concreto e paredes monolíticas de concreto. Um resultado interessante foi o desenvolvimento de equações em função da espessura da taipa para prever potenciais impactos ambientais. Os autores também observaram que a taipa é mais vantajosa ao considerar critérios que são influenciáveis pela massa específica, como a capacidade térmica e o índice de redução sonora.

Referente à durabilidade da taipa, Bui et al. (2009) apresentaram um estudo de caso de paredes expostas a condições climáticas naturais por 20 anos. Foram construídas paredes com diversas combinações de sistemas construtivos de terra, incluindo a taipa, na França. Os resultados demonstram que a durabilidade da taipa depende de vários fatores, entre os quais: qualidade dos materiais, técnica de construção, grau de exposição às intempéries e a manutenção adequada. Além disso, observou-se que a estabilização com cimento melhora significativamente a resistência à erosão, visto que houve uma erosão média de 1,5mm após os 20 anos. Outro ponto, é que uma parede de taipa sem adição de cimento ou outros estabilizantes, apresentou uma expectativa de vida em torno de 60 anos. Ressalta-se que o estudo apresenta limitações e não pode ser generalizado para todos os casos, mas apresenta resultados e discussões interessantes sobre o tema.

Com relação às desvantagens do uso da taipa, Ben-Alon et al. (2021) comentam sobre a falta de padronização e regulamentação em nível mundial e a pouca divulgação das técnicas construtivas, o que acarreta uma baixa aceitação social. Somado a isso, há uma significativa variabilidade das propriedades higrotérmicas e mecânicas da taipa que, de acordo com Losini et al. (2023b), é um dos principais desafios para sua utilização em maior escala.

Assim sendo, evidencia-se a importância de estudos sobre a parametrização das propriedades higrotérmicas da taipa a fim de contribuir para a formação de uma base de dados mais sólida sobre este sistema construtivo. Bem como, contribuir para o melhor entendimento desta técnica construtiva milenar que possui potencial termoenergético significativo no contexto brasileiro.

2.2 – Comportamento e desempenho térmico da taipa de pilão

Entender o comportamento térmico das edificações é um aspecto fundamental para o conforto e a eficiência energética dos ambientes construídos. Em especial, os sistemas construtivos como a taipa, que utiliza materiais naturais (terra), logo apresentam características térmicas diferenciadas em relação aos materiais industrializados, como o aço e cimento.

As paredes de taipa, quando construídas sem adição de cimento, devem possuir espessura igual ou superior a 30 cm, de acordo com a NBR 17014 (2022). Dessa forma, assim como exposto por Fernandes et al. (2019), este sistema construtivo possui elevada inércia térmica.

Ressalta-se que inércia térmica é diferente de massa térmica. Assim como explicado por Harries e Sharma (2020), a massa térmica se refere à capacidade de um material de armazenar calor, enquanto a inércia térmica é a resistência de um material a mudanças de temperatura, refletindo sua capacidade de absorver e liberar calor de forma gradual. Neste contexto, Yu et al. (2022) discutem que a transferência de calor das paredes de taipa pode ser estudada sob duas perspectivas:

- **ponto de vista macroscópico:** ocorre dentro da parede e é influenciada principalmente pela temperatura e umidade do ambiente interno e externo;
- **ponto de vista microscópico:** há transferência de calor por convecção dentro da parede sob a ação do ar e da pressão do vapor de água, devido a porosidade do material.

Dessa forma, a transferência de calor das paredes de taipa deve ser estudada considerando duas frentes: pelos parâmetros relacionados às propriedades térmicas do material (condutividade térmica, calor específico) e pelas características construtivas da parede (espessura, massa específica) atrelados a massa térmica do sistema construtivo como um todo.

Vale ressaltar que frequentemente as normas de desempenho energético adotam parâmetros como a transmitância térmica (U-valor) e a eficiência energética global para avaliar sistemas construtivos. É essencial que se estabeleçam limites aceitáveis para o consumo energético, contudo, há outros conceitos que ajudam a

descrever o comportamento térmico do sistema e ficam de fora desta avaliação, como por exemplo os conceitos de atraso térmico e o fator de decremento – ver Tabela 01.

Destaca-se que a compreensão das propriedades higrotérmicas de um sistema construtivo é de suma importância, especialmente durante a fase de projeto, visto que tais propriedades são responsáveis por descrever as trocas de calor e umidade entre as superfícies das paredes, exercendo uma influência direta no desempenho térmico e no conforto ambiental dos edifícios. Assim sendo, um conhecimento aprofundado dessas especificidades possibilita uma seleção criteriosa de materiais e técnicas construtivas, contribuindo significativamente para a criação de ambientes construídos mais eficientes em termoenergéticos.

Um problema recorrente no estudo do comportamento térmico da taipa é que, em geral, o sistema construtivo não atende as demandas energéticas para residências nos padrões internacionais. As normas de desempenho são desenvolvidas com o intuito de abranger um amplo espectro de materiais de construção, o que pode não contemplar adequadamente sistemas construtivos específicos, como a taipa. Consequentemente, é comum que o desempenho térmico desse sistema construtivo não esteja em conformidade com os requisitos das normas de desempenho adotadas em diferentes países.

Usualmente, as normas utilizam a transmitância térmica (U-valor) como um dos parâmetros para avaliar a eficiência energética das edificações. Porém, este parâmetro leva em consideração no cálculo a espessura da parede, portanto, a taipa tende a apresentar valores superiores aos limites impostos pelas normas. Em trabalhos de Yu et al. (2022), Fernandes et al. (2019) e Lovec, Jovanovic-Popovic e Zivkovic (2018) investigaram o desempenho térmico da taipa e constataram que não atende aos requisitos estabelecidos pelas normas de desempenho para o U-valor na China, Portugal e Sérvia, respectivamente.

Na contramão das pesquisas internacionais, o U-valor não é um problema no conjunto normativo do Brasil, visto que a NBR 15575-4 (2021) estabelece somente os requisitos mínimos para as residências, adotando valores limites elevados para transmitância térmica, os quais acabam abrangendo o sistema construtivo da taipa (Figura 3). Para fins de comparação, de acordo com a Portaria n.º 138-I (2021) em Portugal, o limite varia entre 0,35 e 0,50 (W/m².K) para construções residenciais e, segundo o estudo de Yu et al. (2022), uma parede de taipa de 30 cm de espessura possui transmitância térmica de aproximadamente 1,8 (W/m².K).

Figura 3 – Valores de referência para transmitância térmica no Brasil. Fonte: Adaptado de NBR 15575-4 (2021)

| Transmitância térmica de paredes (U_{par}) W/(m ² .K) | | |
|---|---------------------------|----------------------|
| Zonas Bioclimáticas 1 e 2 | Zonas Bioclimáticas 3 a 8 | |
| $U_{par} \leq 2,7$ | $\alpha_{para} \leq 2,7$ | $\alpha_{par} > 0,6$ |
| | $U_{par} \leq 3,7$ | $U_{par} \leq 2,5$ |

Outro parâmetro importante é a capacidade térmica, que é definida pela Instrução Normativa INMETRO para edificações residenciais (INI-R, 2022), como sendo: “a quantidade de calor necessária para variar, em uma unidade, a temperatura de um sistema”. Neste contexto, a instrução normativa impõe como limite para a capacidade térmica das paredes externas o intervalo entre: 26 e 440 kJ/(m².K). Porém, assim como especificado por Harries e Sharma (2020), a capacidade térmica de uma parede de taipa de 50cm é por volta de 550 kJ/(m².K).

É válido ressaltar que é esperado um valor elevado para a capacidade térmica da taipa, visto que essa propriedade está correlacionada com a massa térmica do material construtivo. Ou seja, a capacidade térmica é uma medida da quantidade de calor necessária para modificar a temperatura do elemento, e a taipa, em virtude de sua densidade demonstra-se um sistema construtivo com alta capacidade térmica em comparação com outros métodos construtivos.

Neste contexto, o desempenho térmico da taipa não pode ser avaliado somente pelos parâmetros normativos tradicionais, tendo em vista a elevada massa térmica do sistema. Um estudo realizado por Samadianfard e Toufigh (2020) comparou o desempenho térmico da taipa com a alvenaria convencional levando em consideração os seguintes fatores: atraso térmico, fluxo de calor, fator de decremento e condutividade térmica. Uma das principais observações dos autores é que o atraso térmico do fluxo de calor na parede de taipa chega a ser até cinco vezes maior do que no sistema de alvenaria.

Em outro estudo, conduzido por Giuffrida, Caponetto e Nocera (2019) demonstra que a taipa pode atuar como um regulador térmico do ambiente. Quando ocorre um aumento na temperatura ambiente, a umidade contida na terra evapora, removendo calor latente da atmosfera durante os períodos quentes. Esse processo, que requer energia térmica, resulta em um resfriamento do ambiente. Por outro lado,

nos momentos mais frios, a condensação ocorre, liberando o calor latente previamente armazenado, o que gera calor no ambiente.

Dessa forma, nota-se que a interação termorreguladora da taipa tende a oferecer um espaço habitacional com uma sensação térmica equilibrada e agradável ao longo das estações. Portanto, em contraste com a crescente industrialização da construção, que tende a resultar em edifícios padronizados frequentemente dependentes de sistemas artificiais de aquecimento e resfriamento para garantir o conforto, as edificações de taipa mostram a capacidade de alcançar condições de conforto aceitáveis principalmente por meio de abordagens passivas.

Tal premissa vai ao encontro da pesquisa realizada por Durante et al. (2020), que constataram que uma residência de taipa consome até 34% menos energia do que uma residência de alvenaria tradicional durante a fase de uso e operação da habitação no contexto da cidade de Brasília-DF. Os autores atribuem este fato ao menor gasto energético para resfriamento artificial do ambiente interno.

Um estudo recente realizado em Portugal por Fernandes et al. (2019), avaliou o desempenho térmico e condições de conforto de uma residência de taipa ao longo de um ano, considerando as quatro estações. O estudo se baseou em medições *in loco* da temperatura e umidade, bem como a aplicação de questionários de conforto térmico aos usuários. Levando em consideração as estratégias passivas adotadas e a ausência de um sistema de ar-condicionado, concluiu-se que o edifício apresentou bom desempenho com valores dentro da faixa de conforto térmico, com exceção dos meses de inverno.

Com relação às possíveis estratégias passivas adotadas em uma edificação de taipa, Giuffrida et al. (2021) realizaram uma pesquisa exploratória sobre o desempenho energético da taipa no clima mediterrâneo. Os autores chegaram à conclusão de que a combinação de estratégias bioclimáticas com materiais de construção naturais pode ser uma solução eficaz para reduzir o consumo de energia e melhorar o conforto térmico e a qualidade do ar interno em edifícios. Com relação a taipa, observou-se que a ventilação cruzada noturna é uma ótima estratégia para reduzir a demanda energética de resfriamento em climas quentes e secos.

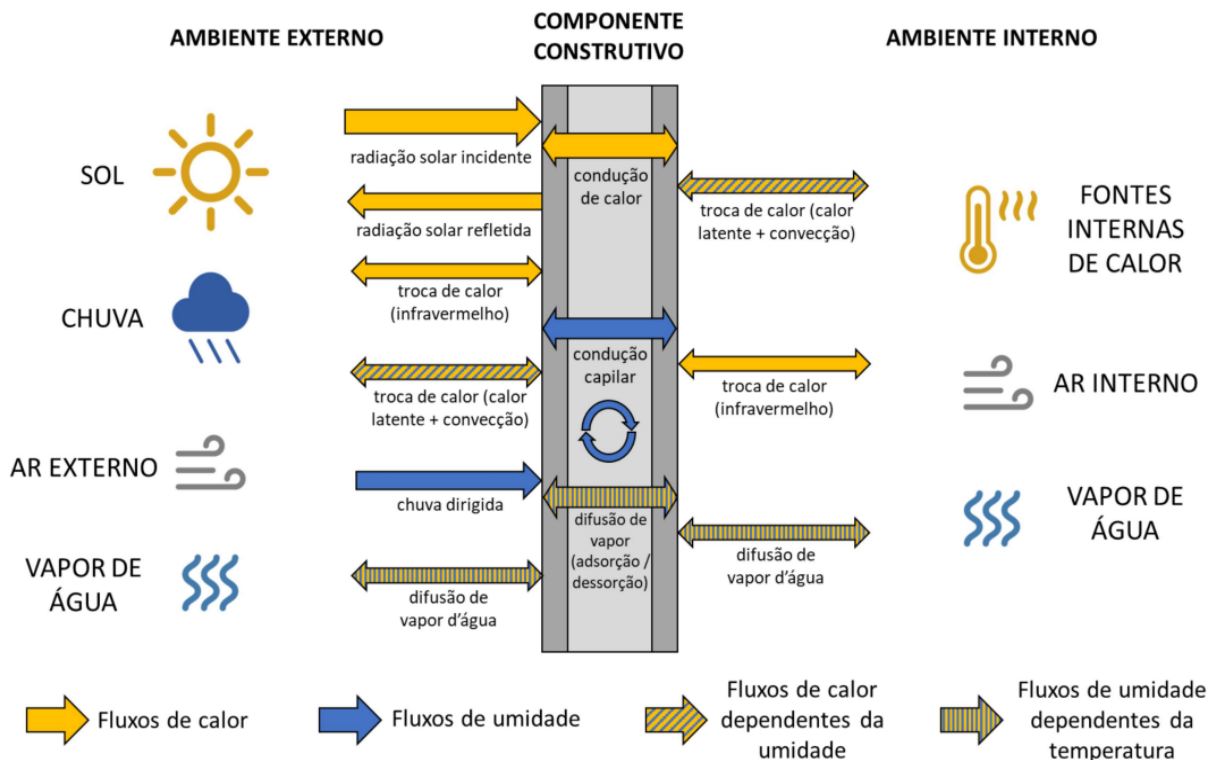
Dessa forma, a partir da visão de diversos autores, nota-se que é possível considerar a taipa como um sistema construtivo de bom desempenho térmico. Além disso, ao combinar estratégias passivas na habitação, é possível atingir uma redução do consumo energético de resfriamento e melhorar o conforto dos usuários.

Contudo, para que esses benefícios sejam plenamente alcançados, é fundamental uma revisão das normas de desempenho térmico que considere as características únicas da taipa. Reconhecer a importância de parâmetros como a inércia térmica e a capacidade de regulação natural de umidade pode levar a uma avaliação mais justa e precisa do potencial energético desse material, promovendo sua adoção e contribuindo para a construção sustentável e eficiente.

2.3 - Propriedades higrotérmicas da taipa de pilão

A terra, principal componente da taipa, é composta por uma variedade de argilas, siltes e areias, ou seja, materiais porosos por natureza. Além disso, assim como discutido por Harries e Sharma (2020), nota-se que a conexão entre tais elementos não é perfeita, de modo que a taipa é formada por uma “rede porosa”, que permite o transporte de fluidos. Ressalta-se que outros fatores influenciam tal escoamento, como por exemplo: o grau de compactação no momento de confecção da taipa e a presença de aditivos ou camadas isolantes.

Figura 4 – Representação esquemática das trocas de calor e umidade em um componente construtivo. Fonte: Silva e Brito (2024).



Neste contexto, Trechsel e Bomberg (2009) comentam que em geral os materiais do ambiente construído estão sujeitos a três processos de transporte: o de calor, o de umidade (na forma líquida e vapor) e o de ar. Assim sendo, Belizario-Silva e Brito (2024) desenvolveram uma representação esquemática dos principais mecanismos de transporte de calor e umidade em uma parede de alvenaria, o qual pode ser generalizado para uma parede de taipa. A representação pode ser visualizada na Figura 4.

Dessa forma, é possível definir as propriedades higrotérmicas como as características físicas responsáveis por tentar descrever as trocas de calor e umidade (na fase líquida ou gasosa) que ocorrem entre as superfícies da parede. Segundo Hall e Allinson (2009), dentre as propriedades responsáveis pela interpretação das características higrotérmicas da taipa, destacam-se: capacidade de absorção de água, permeabilidade ao vapor, condutividade térmica e calor específico. É apresentado na Tabela 1 a definição das principais propriedades higrotérmicas no contexto da construção civil, com base no livro de Szokolay (2008).

Destaca-se que a compreensão das propriedades higrotérmicas de um sistema construtivo é de suma importância, especialmente durante a fase de projeto, visto que tais propriedades são responsáveis por descrever as trocas de calor e umidade entre as superfícies das paredes, exercendo uma influência direta no desempenho térmico e no conforto ambiental dos edifícios. Assim sendo, um conhecimento aprofundado dessas especificidades possibilita uma seleção criteriosa de materiais e técnicas construtivas, contribuindo significativamente para a criação de ambientes construídos mais eficientes em termoenergéticos.

Um fenômeno relevante a ser abordado ao analisar o comportamento higrotérmico de um material é a adsorção. Trechsel e Bomberg (2009) explicam que superfícies porosas tendem a capturar as moléculas de vapor d'água e este processo é chamado adsorção. Ressalta-se que a quantidade de água absorvida é influenciada por parâmetros como: temperatura, pressão parcial do vapor d'água e área da superfície do sólido. Um exemplo apresentado por Szokolay (2008), é que se os poros do material estiverem cheios de água, a condutividade aumentará drasticamente, ou seja, o material conduzirá mais calor.

Tabela 1 – Definição das propriedades higrotérmicas dos materiais. Fonte: Szokolay (2008).

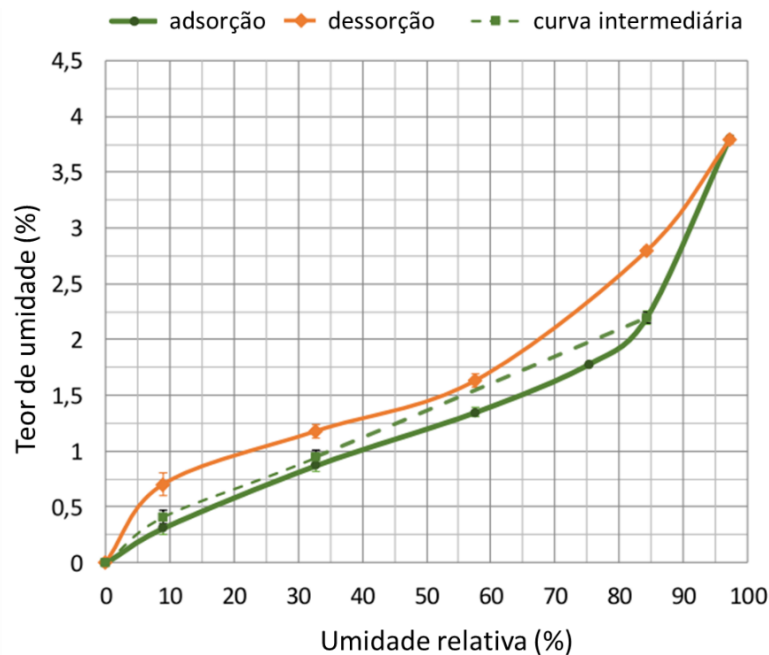
| Parâmetro | Unidade | Definição |
|-------------------------|------------------------|--|
| Condutividade térmica | W/m·K | propriedade do material que mede a taxa de transferência de calor em resposta a uma diferença de temperatura, indicando a habilidade do material em conduzir calor |
| Calor específico | J/kg·K | quantidade de energia térmica necessária para elevar a temperatura de uma unidade de massa de uma substância em uma unidade de temperatura, indicando a capacidade da substância de armazenar calor |
| Massa específica | kg/m ³ | é a medida da quantidade de massa por unidade de volume de uma substância |
| Capacidade térmica | kJ/(m ² ·K) | propriedade do material que quantifica a quantidade de calor necessária para variar, em uma unidade, a temperatura de um sistema |
| Transmitância térmica | W/m ² ·K | taxa de fluxo de calor que atravessa um material ou sistema, por unidade de área, quando há uma diferença de temperatura entre seus lados, indicando a capacidade do material ou sistema em permitir a passagem do calor |
| Permeabilidade ao vapor | kg/m.s.Pa | taxa de fluxo de vapor de água que passa através de um material por unidade de área e unidade de diferença de pressão de vapor, indicando a capacidade do material de permitir a passagem do vapor de água |
| Atraso térmico | h | intervalo de tempo que um material ou sistema leva para transmitir o calor de um lado para o outro e indica a capacidade do material ou sistema de retardar a transmissão de calor |
| Fator de decremento | - | quantifica a diferença de amplitude entre as curvas de temperatura interna e externa do ambiente, é um indicativo adimensional da capacidade do material ou sistema em atenuar as variações diárias do fluxo de calor |

De acordo com Hens (2012), cada material exibe uma diferença entre os processos de umidificação e desumidificação, que é representada por meio da isoterma de sorção. A isoterma de sorção é um gráfico obtido experimentalmente ao expor o material a diferentes níveis de umidade relativa do ar e determinando o teor de água em equilíbrio dentro do material. O autor explica que materiais que possuem um valor considerável de adsorção em baixas umidades relativas são chamados de materiais higroscópicos.

No caso da taipa, Losini et al. (2023b) realizaram ensaios laboratoriais para definir a isoterma de sorção e obtiveram a curva representada na Figura 5. A partir da análise do gráfico, nota-se a curva em ascendência pronunciada entre as umidades relativas do ar de 0 a 30%, portanto, a taipa pode ser considerada como higroscópica, ou seja, é sensível a variação da umidade do ambiente externo.

O trabalho de Li et al. (2023), aborda sobre a influência da água nas propriedades taipa. Os pesquisadores investigaram experimentalmente as alterações nas propriedades higrotérmicas da taipa antes e após a aplicação de um tratamento de hidrofobização, tratamento que envolve o uso de agentes repelentes de água para aumentar a hidrofobicidade dos materiais. Os resultados mostraram uma variação mínima nas propriedades higrotérmicas (menor que 20% na maioria dos casos), com uma redução significativa no coeficiente de absorção capilar, em torno de 80%.

Figura 5 - Isoterma de sorção da taipa de pilão. Fonte: Adaptado de Losini et al. (2023b).



Outro estudo sobre a variabilidade da condutividade térmica da taipa com relação à quantidade de água presente no elemento construtivo foi publicado por Losini et al. (2023b). Neste estudo, os autores demonstraram que para umidades relativas do ar de até 75%, a condutividade térmica da taipa pode aumentar até 19% em comparação com o valor da propriedade no estado seco. No entanto, quando exposta a umidades relativas superiores a 75%, o aumento da condutividade térmica chega a ser em torno de 40%.

Portanto, é evidente a importância de levar em consideração a influência da água nos sistemas construtivos à base de terra. Além disso, ressalta-se que embora seja uma técnica adotada há centenas de anos, a análise técnica da taipa ainda é uma área recente que está gradualmente ganhando destaque.

Conseqüentemente, a demanda por pesquisas e investigações adicionais continua a ser relevante. Neste contexto, a Tabela 2 apresenta um resumo de algumas propriedades higrotérmicas específicas da taipa. A fim de comparar com outros materiais da construção civil, a Tabela 3 apresenta um comparativo entre os valores médios de algumas propriedades higrotérmicas de materiais convencionais.

Tabela 2 - Revisão bibliográfica das propriedades higrotérmicas da taipa. Fonte: Autoral

| | Li et al. (2023) | Liang, Tan e Jiang (2022) | Juan et al. (2019) | Losini et al. (2023) |
|--|-----------------------|---------------------------|--------------------|----------------------|
| Espessura da taipa avaliada (m) | 0,30 | 0,37 | 0,40 | 0,50 |
| Condutividade térmica (W/m·K) | 0,79 | 0,66 | 0,72 | 1,40 - 1,80 |
| Massa específica (kg/m³) | 1833,90 | 2100,0 | 1795,60 | 2190,00 |
| Calor específico (J/kg·K) | 664 | 911 | 884 | 737 |
| Permeabilidade ao vapor de água (kg/m.s.Pa) | $1,1 \times 10^{-11}$ | $1,2 \times 10^{-11}$ | - | - |

Por meio da análise da Tabela 2 nota-se uma variação significativa nos valores das propriedades higrotérmicas da taipa. Tal variação pode ser atribuída a diversos fatores, entre os quais: diversidade na composição do solo utilizado na execução da taipa, diferenças nos métodos de compactação e cura, e até mesmo alterações sazonais ou geográficas que podem afetar o comportamento higrotérmico. Portanto, destaca-se a importância de realizar avaliações específicas dos valores das propriedades higrotérmicas da taipa para cada caso e considerar os fatores que influenciam o desempenho do material em diferentes contextos.

Além disso, vale ressaltar que as propriedades higrotérmicas mencionadas na Tabela 2 são características intrínsecas do material e tendem a permanecer constantes, independentemente da espessura das paredes. Dessa forma, destaca-se que a informação sobre a espessura da parede ensaiada foi incluída na Tabela 2 com intuito de fornecer um contexto adicional sobre a espessura típica das paredes de taipa consideradas nas pesquisas revisadas.

Tabela 3 - Valores das propriedades térmicas dos materiais da construção civil. Fonte: Autoral

| | | Condutividade térmica (W/m·K) | Massa específica (kg/m ³) | Calor específico (J/kg·K) | Transmitância Térmica (W/m ² ·K) | Atraso térmico (h) | Fator de decremento |
|-----------------------------|------------|-------------------------------|---------------------------------------|---------------------------|---|-------------------------------|-------------------------------|
| Taipa | valor | 0,7 – 1,1 | 1400 - 2100 | 664 | 1,3-1,6 | 7,00 | 0,12 |
| | referência | Silva e Milani (2022) | Mileto, Vegas e Cristini (2012) | Li et al. (2023) | Fernandes et al. (2019) | Samadianfard e Toufigh (2020) | Samadianfard e Toufigh (2020) |
| Concreto tradicional | valor | 2,86 | 2400 | 1010 | 4,40 | 2,49 | 0,84 |
| | referência | Asadi et al. (2023) | Asadi et al. (2023) | Asadi et al. (2023) | INMETRO (2013) | Asadi et al. (2023) | Asadi et al. (2023) |
| Blocos cerâmicos | valor | 0,7-1,3 | 1400-2400 | 545 | 2,99 | 2,51 | 0,94 |
| | referência | Harries e Sharma (2020) | Harries e Sharma (2020) | El Fgaier et al. (2015) | INMETRO (2013) | El Fgaier et al. (2015) | El Fgaier et al. (2015) |
| Bloco de concreto | valor | 1,0-1,70 | 1700-2400 | 1000 | 2,88 | 4,19 | 0,35 |
| | referência | Harries e Sharma (2020) | Harries e Sharma (2020) | Szokolay (2008) | Santos et al. (2015) | Santos et al. (2015) | Szokolay (2008) |

A partir da análise da Tabela 3, nota-se que as propriedades higrotérmicas dos principais materiais de construção apresentam intervalos de variação similares para condutividade térmica e massa específica. Já com relação ao calor específico e transmitância térmica as variações são mais acentuadas. Essa diversidade nas características dos materiais destaca a importância de uma seleção criteriosa dos materiais de construção, levando em consideração não apenas suas propriedades individuais, mas também sua interação e adequação ao ambiente construído.

Além disso, destaca-se na Tabela 3 o desempenho da taipa na característica de atraso térmico, que é em torno de 7 horas. Em contraste, os demais materiais convencionais apresentam atrasos térmicos inferiores, indicando uma capacidade menor de regulação térmica em comparação com a taipa. Essa diferença ressalta a importância de considerar não apenas a composição e as propriedades dos materiais, mas também sua capacidade de resposta térmica ao planejar e projetar estruturas com desempenho térmico otimizado.

Nesse cenário, uma solução viável para futuros projetos seria adotar paredes de taipa em áreas estratégicas da edificação, como aquelas voltadas para o norte, que recebem incidência solar significativa ao longo do ano. Logo, não é preciso que todas as paredes sejam de taipa, porém a adoção desse sistema em locais específicos, pode gerar melhorias consideráveis no desempenho de toda a envoltória.

2.4 – Modelos para análise de transferência de calor e umidade

A avaliação do desempenho energético da envoltória de uma residência é um processo complexo que leva em consideração vários fatores, incluindo o comportamento higrotérmico do sistema construtivo e os hábitos e rotinas dos usuários. Por meio dos programas de simulação computacional é possível modelar essas variáveis e obter uma previsão do comportamento termo energético da edificação. Isso permite aos arquitetos e engenheiros otimizar o projeto da edificação para maximizar o conforto térmico e minimizar o consumo de energia.

Um ponto ressaltado por Hamdaoui et al. (2021) é que há carência de um modelo de referência para o comportamento higrotérmico de um edifício, ou seja, ainda não há um método específico que sirva de base para pesquisas na área. Dessa forma, os autores fazem uma revisão dos principais métodos de simulação higrotérmica adotados na atualidade e classifica-os em:

- **Caixa branca:** modelos baseados no conhecimento físico e que focam na resolução de equações a fim de simular o comportamento do edifício. São modelos que utilizam equações higrotérmicas e princípios de balanço de energia para simular como o edifício responde às condições climáticas, comportamento dos ocupantes e outras variáveis relevantes. Logo, tendem a oferecer uma compreensão clara dos processos físicos envolvidos, mas requer muitos dados de entrada, exemplo: *EnergyPlus*.
- **Caixa preta:** envolvem a implementação de um modelo de previsão usando técnicas de aprendizado de máquina. Os modelos são chamados de "caixa preta" porque o usuário não pode ver ou entender como o modelo funciona internamente, exemplo: redes neurais artificiais (ANN).

Independente do modelo selecionado, o principal problema da simulação computacional de edifícios é a precisão dos resultados. Assim como discutido por Qin e Yang (2016), embora existam diversos softwares e programas disponíveis, a precisão dos resultados varia de acordo com vários fatores, como por exemplo: a qualidade e quantidade dos dados de entrada, a complexidade do modelo adotado, a precisão dos algoritmos de simulação e a validação dos resultados. Portanto, é importante compreender as limitações e as incertezas associadas aos resultados da simulação, e realizar a validação dos resultados de medições sempre que possível.

No que tange a simulação higrotérmica de edificações, há diversos softwares disponíveis. Dentre eles, optou-se pelo uso do *EnergyPlus*, que se destaca por ser uma ferramenta bem conhecida e de acesso gratuito. O programa permite simulações básicas ou avançadas, podendo incorporar trocas de calor e umidade, sendo, portanto, uma ferramenta versátil para realizar as simulações térmicas e higrotérmicas. Nesse contexto, de acordo com Qin e Yang (2016) os três principais modelos de simulação energética disponíveis no *EnergyPlus*, são:

- CTF (*Conduction Transfer Function*) - Função de Transferência de Condução
- EMPD (*Effective Moisture Penetration Depth*) - Profundidade efetiva de penetração de umidade
- HAMT (*Heat and Moisture Transfer*) – Transferência de Calor e Umidade

2.4.1 - CTF

O modelo *Conduction Transfer Function* (CTF) é uma abordagem eficiente para analisar a transferência de calor em elementos construtivos. É baseado na decomposição do comportamento térmico do material em funções de transferência, ele simplifica o cálculo dos fluxos de calor superficiais, dispensando a necessidade de conhecimento das temperaturas e fluxos internos. Este método fornece uma abordagem simplificada e eficiente para analisar a transferência de calor, permitindo a avaliação de diferentes estratégias de isolamento, materiais e configurações construtivas (ENERGY, 2022).

No entanto, à medida que o intervalo de tempo (*time step*) diminui, as equações de transferência de calor podem se tornar instáveis. Essa instabilidade é mais evidente em construções termicamente maciças, como a taipa. É importante

ressaltar que essa instabilidade não é uma falha do método CTF em si, mas sim resultado de erros de arredondamento e truncamento. Portanto, ao analisar termicamente a taipa recomenda-se considerar outros métodos que se adequem melhor às características específicas deste sistema construtivo (ENERGY, 2022).

Em um estudo realizado por Mellado et al. (2021), os autores utilizaram o método CTF do *EnergyPlus* para realizar uma série de simulações térmicas da taipa, considerando diferentes dados de entrada das propriedades térmicas. O estudo visa avaliar o impacto da utilização de valores dos parâmetros térmicos estimados e reais (medidos *in loco*) para determinar o conforto térmico dos usuários e demanda energética da edificação. Os resultados mostraram que a adoção de valores estimados das propriedades térmicas levou a um aumento de 102% na demanda energética durante o verão, em comparação com a utilização dos dados medidos *in loco*. Assim sendo, evidencia-se a necessidade de dados de entrada fiéis para utilização precisa do modelo.

2.4.2 - EMPD

O modelo EMPD (*Effective Moisture Penetration Depth*) é um recurso disponível no software *EnergyPlus*, utilizado para simular como a umidade é absorvida e liberada das superfícies de um edifício, ou seja, o fenômeno de adsorção e dessorção. Para isso, o modelo considera duas camadas fictícias de material com teor de umidade uniforme: uma camada superficial, que regula a umidade a curto prazo, e uma camada mais profunda, que regula a umidade em uma resposta mais lenta. O modelo calcula a transferência de umidade entre o ar e a camada superficial, bem como entre a camada superficial e a camada profunda. Essa transferência de umidade afeta tanto a umidade quanto a temperatura da zona, uma vez que o calor liberado ou absorvido durante o processo de adsorção é convertido de forma latente (com mudança de fase) para sensível (sem mudança de fase) (ENERGY, 2022).

Em um estudo de caso realizado por Huerto-Cardenas et al. (2021) os autores avaliaram a taxa de infiltração de ar em edifício histórico na Itália, a fim de comparar a precisão do modelo de simulação EMPD com o modelo padrão do *EnergyPlus* (CTF). Os resultados indicaram que o modelo de simulação EMPD calibrado apresentou os resultados mais precisos, demonstrando a importância de considerar as trocas de umidade no processo de simulação de edificações.

Um ponto ressaltado pela tese de Afonso (2011) é que para o modelo EMPD ser fiel à realidade, é preciso conhecer e adicionar como dados de entrada diversas características da envolvente, tipo de utilização, clima local e regime de ventilação. O estudo considerou vários cenários de simulação com diferentes dados de entrada e conclui-se que cada parâmetro promove uma melhoria específica, mas que em geral o modelo será otimizado com a inserção e interação do máximo de variáveis possíveis. Neste contexto, nota-se a importância de conhecer a edificação e aplicar tal conhecimento no detalhamento do modelo, a fim de obter resultados mais precisos e fiéis ao real comportamento higrotérmico da edificação.

2.4.3 – HAMT

O modelo HAMT (*Heat and Moisture Transfer*) é uma solução algorítmica de elementos finitos, disponível no *software EnergyPlus*, que avalia a transferência combinada de calor e umidade. Baseia-se em equações de balanço de calor e umidade derivadas das equações de conservação de energia e massa, e considera a transferência de calor e umidade através das camadas de material em uma superfície. O modelo descreve a capacidade de armazenamento, transporte e geração de calor, bem como a armazenagem de umidade, o transporte de umidade líquida e o transporte de vapor. Para simular esses processos, o HAMT considera uma série de parâmetros e propriedades dos materiais envolvidos (ENERGY, 2022).

Destaca-se que, assim como o modelo EMPD, o modelo HAMT também é utilizado para simular a transferência de umidade em materiais de construção, porém utilizam abordagens diferentes para representar a transferência de umidade nos elementos construtivos. O modelo EMPD foca na superfície do material e na penetração efetiva da umidade, enquanto o modelo HAMT considera a transferência de umidade através das diferentes camadas dos materiais e como essa transferência interage com a transferência de calor (ENERGY, 2022).

Em síntese, a principal diferença entre os modelos está na escala e no nível de detalhe das simulações. Embora o modelo HAMT proporcione uma compreensão detalhada de como a transferência de calor e umidade ocorre em diferentes camadas de materiais, requer mais dados de entrada do usuário e apresenta um tempo de simulação consideravelmente superior.

Em uma pesquisa sobre o impacto da adição de biopolímeros nas propriedades higrotérmicas da taipa, Losini et al. (2023) adotaram o modelo de simulação HAMT. Foram testados cinco biopolímeros no estudo, que são: casca de citros, fibras de lã de ovelha, sulfito de lignina, farinha de semente de uva e tanino. Em um primeiro momento os autores determinaram experimentalmente as propriedades higrotérmicas de espécimes de taipa com a adição dos biopolímeros, para posteriormente aplicarem os dados como parâmetros de entrada para simulação no *EnergyPlus*.

Neste contexto, ressalta-se que uma das principais dificuldades em trabalhar com simulações termoenergéticas com a taipa (independente do modelo) é a escassez de dados sobre as propriedades higrotérmicas. Assim como citado por Mellado et al. (2021), a precisão dos dados de entrada é fundamental para o modelo. Por se tratar de um material muito diverso e influenciado pelas características do solo adotado, o cenário ideal seria a determinação experimental dos dados. Porém, em virtude da necessidade de equipamentos específicos, esta não é uma solução viável para o presente estudo, e também para grande parte das obras residenciais.

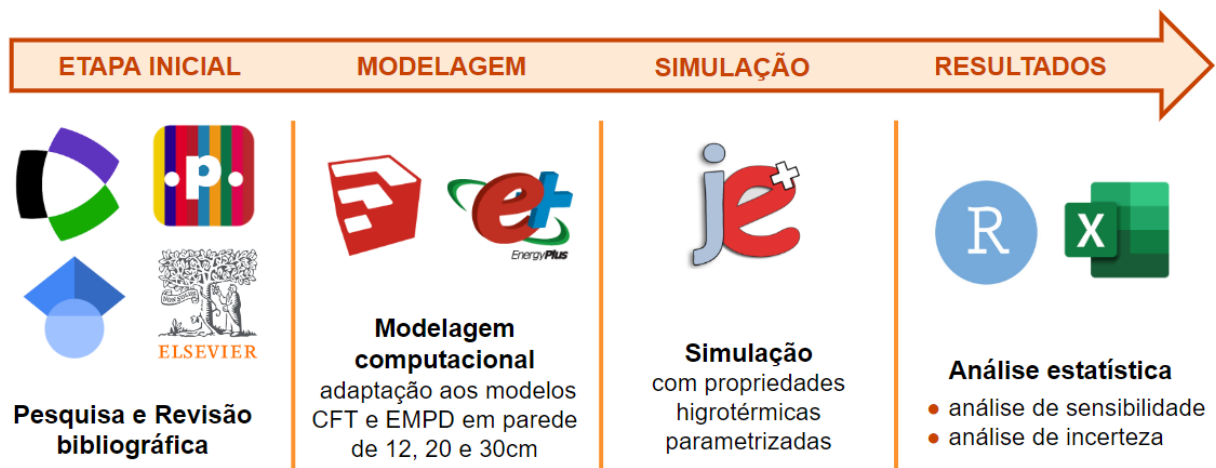
Desta forma, tendo em vista a utilização de valores estimados para as propriedades higrotérmicas da taipa, optou-se pela adoção do modelo EMPD ao invés do HAMT. Tal decisão ocorreu em virtude da possibilidade de introdução de erros significativos nos resultados, ocasionados pela estimação das propriedades do material. Apesar de sua abordagem simplificada, o modelo EMPD também avalia o desempenho higrotérmico da envoltória da edificação e requer menos dados de entrada em comparação com o HAMT.

Portanto, este trabalho avaliará o comportamento da edificação de taipa sobre duas perspectivas: considerando o modelo padrão de análises térmicas do *EnergyPlus* (modelo CFT) e considerando o comportamento higrotérmico da edificação (modelo EMPD). Enquanto o CTF oferece uma abordagem simplificada e eficiente para avaliar a transferência de calor, o EMPD considera a absorção e liberação de umidade das superfícies do edifício, possibilitando avaliar o comportamento higrotérmico da parede de taipa.

3 - MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia para a execução do projeto está subdividida em quatro etapas, conforme ilustrado na Figura 6. Essa subdivisão foi realizada com o intuito de fornecer uma explicação mais detalhada de cada uma das etapas. O passo a passo de execução da pesquisa é explicado nas subseções da metodologia.

Figura 6 - Diagrama da metodologia. Fonte: Autoral



3.1 – Etapa inicial – Pesquisa e revisão bibliográfica

Primeiramente foi realizado um processo exploratório e descritivo que visa analisar a produção científica nacional e internacional sobre as propriedades higrótérmicas e desempenho termoenergético da taipa. As principais ferramentas de buscas foram: a plataforma dos periódicos da CAPES, Google Acadêmico, Elsevier e *Web of Science*.

As palavras chaves utilizadas foram: desempenho térmico, propriedades higroscópicas, propriedades higrótérmicas, propriedades térmicas, comportamento térmico, simulação termo energética, taipa, taipa de pilão, construções com terra. Assim como a versão em inglês, ou seja: *thermal performance, hygroscopic properties, thermal properties, thermal behavior, thermoenergetic simulation, rammed earth, earth buildings, earth construction*.

Além disso, ressalta-se que não houve imposição de um limite de ano de publicação dos trabalhos, justificado pela escassez de trabalhos disponíveis sobre o tema. Dada a natureza específica do assunto, a restrição temporal poderia resultar na

exclusão de contribuições valiosas que ainda podem não ter sido completamente exploradas.

Assim sendo, o foco da revisão bibliográfica consistiu em explorar os avanços mais recentes no campo da pesquisa relacionada ao comportamento higrotérmico da taipa. Além de aprofundar o entendimento técnico sobre a taipa, a revisão visou estabelecer uma base de dados abrangentes sobre as características higrotérmicas deste material, visto que tais dados são essenciais como parâmetros de entrada em simulações computacionais.

Observa-se que a literatura específica sobre as propriedades da taipa é limitada, devido a uma diversidade de fatores que influenciam seu comportamento higrotérmico, bem como à escassez de estudos dedicados a esse tema.

3.2 – Modelagem computacional

A etapa de modelagem computacional envolve a organização dos scripts antes da realização das simulações. Desta forma, iniciou-se o processo com a modelagem detalhada de um cômodo residencial no software *SketchUp* (versão 2019), no qual inseriu-se dados sobre a zona térmica e detalhes construtivos. Na sequência exportou-se estes dados para o *EnergyPlus* (versão 9.4) por meio do plug-in do *Open Studio* (versão 3.5.0), que permite a exportação do arquivo na extensão IDF (*intermediate data format*). No ambiente do *EnergyPlus* gerou-se dois scripts: um considerando o modelo térmico CTF e o segundo utilizando o método EMPD, sendo que em cada script foram modeladas as características de uso e ocupação, bem com a inserção de dados sobre o uso de sistemas artificiais de aquecimento e refrigeração.

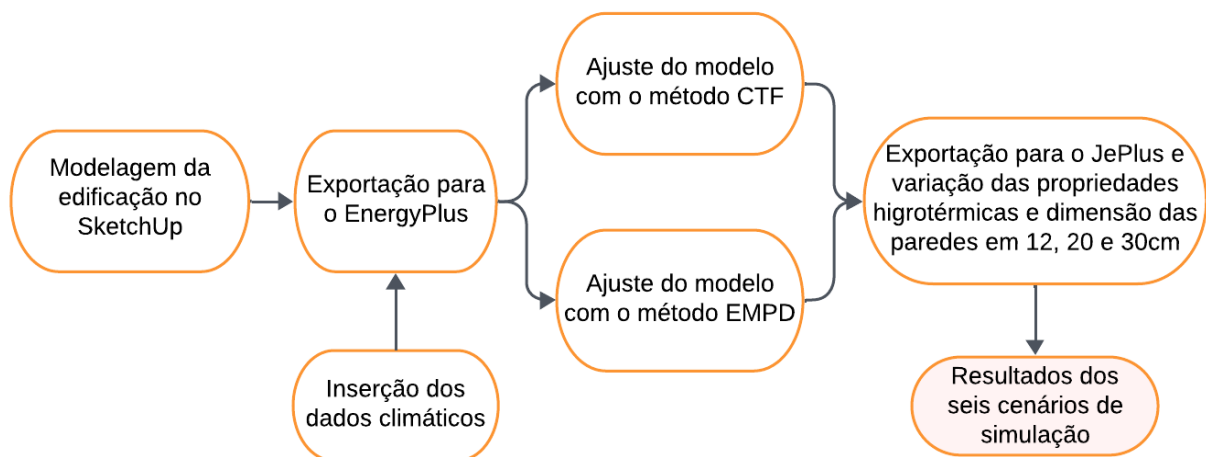
Posteriormente, os dois arquivos modelados no *EnergyPlus* foram exportados para o *JePlus* (versão 2.1.0), também na extensão IDF. No *JePlus* foram consideradas três diferentes espessuras de parede para cada modelo (CTF e EMPD). Para esta pesquisa considerou-se as espessuras da parede de 12, 20 e 30cm.

A seleção das espessuras foi baseada na norma NBR 17014 (2022), que preconiza que as paredes de taipa devem ter espessuras maiores ou iguais a 30cm. No entanto, no caso de adição de cimento, recomenda-se que as espessuras sejam maiores ou iguais a 12cm. Dessa forma, foram selecionadas as espessuras mínimas nos dois cenários: 12 e 30 cm, além de uma espessura intermediária de 20cm.

Além disso, para cada um dos seis cenários considerou-se um mesmo intervalo de variação para as propriedades higrotérmicas da taipa, ao invés de um valor fixo para cada propriedade. Diante da carência de informações ou de experimentos que resultem nos valores dessas propriedades, optou-se pela parametrização com base em dados anteriormente relatados na literatura. Essa abordagem permite estabelecer um intervalo de confiança para os valores das propriedades higrotérmicas da taipa, com o objetivo de contribuir para a construção de um banco de dados mais abrangente sobre esse sistema construtivo e, conseqüentemente, facilitar a execução de futuras edificações em taipa sob o aspecto da eficiência energética.

Um fluxograma detalhado é apresentado na Figura 7, a fim de oferecer uma visão mais clara do processo metodológico adotado, destacando as etapas-chave envolvidas na modelagem computacional e as simulações termoenergéticas. Nas subseções seguintes, será apresentado em detalhes cada uma das etapas citadas.

Figura 7 – Fluxograma da modelagem e simulação computacional. Fonte: Autoral.



Destaca-se que esta metodologia foi executada considerando dois padrões de uso e ocupação do ambiente simulado. A NBR 15575-1 (2021) prevê três modelos de uso e ocupação dos ambientes de permanência prolongada, são eles: dormitório, sala e uso misto. No projeto original, o ambiente avaliado é um dormitório, porém como o foco da pesquisa é avaliar a envoltória e não o desempenho da edificação, considerou-se então a rotina de uso e ocupação do tipo dormitório e do tipo misto, a fim de avaliar as possíveis diferenças de comportamento higrotérmico em diferentes horários do dia.

Como resultado, são gerados seis cenários de simulação para cada tipo de ocupação, totalizando doze cenários de simulação. Ou seja, para cada um dos dois cenários de uso e ocupação segue-se o passo a passo exposto na Figura 7.

3.2.1 – Modelagem da envoltória

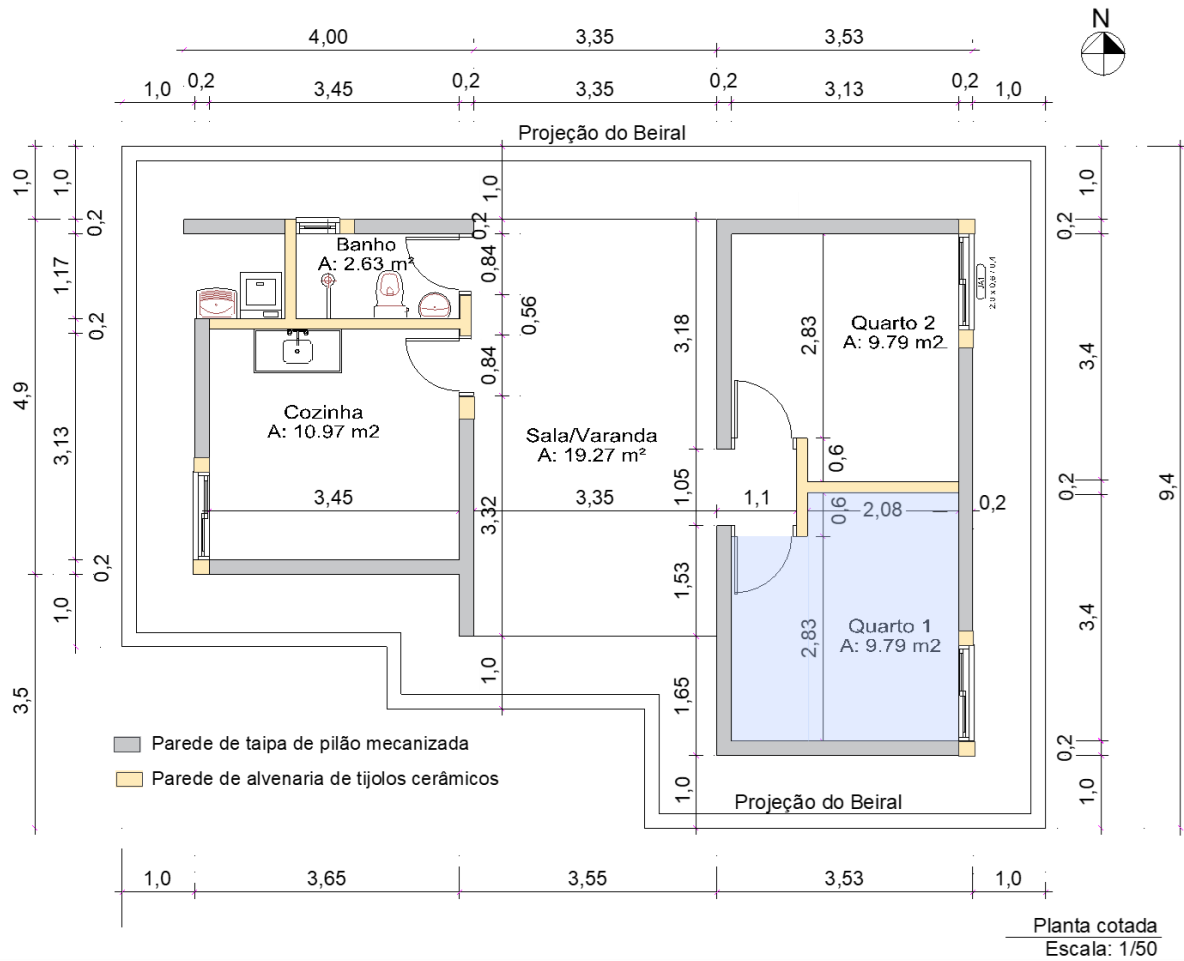
Selecionou-se como inspiração para a modelagem computacional uma edificação real construída com um sistema híbrido de taipa de pilão e alvenaria - Canteiro Experimental UFMS, situado no campus da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (UFMS), em Campo Grande/MS, dentro do Canteiro Experimental, da Faculdade de Engenharias, Arquitetura e Urbanismo e Geografia. Optou-se por este edifício pois é uma edificação em taipa, cujo processo construtivo foi documentado por Veraldo (2015), garantindo o acesso a informações e dimensões importantes para modelagem computacional (Figura 8).

Com relação ao projeto real do Canteiro Experimental, a planta baixa simplificada está representada na Figura 9 por meio da qual nota-se que a edificação possui paredes de taipa e em alvenaria convencional. A adoção do sistema híbrido de paredes ocorre em virtude da facilidade construtiva de inserir esquadrias e tubulações embutidas nas paredes de alvenaria.

Figura 8 – Foto da fachada norte do Canteiro Experimental UFMS. Fonte: Autoral



Figura 9 - Planta baixa do Canteiro Experimental UFMS. Fonte: Modificado de Veraldo (2015)



Como o foco desta pesquisa é avaliar o comportamento térmico das paredes de taipa, e não da edificação como um todo, selecionou-se apenas um cômodo para a modelagem computacional e as subsequentes simulações termoenergéticas. O cômodo escolhido foi o quarto 1 (Q1), destacado em azul na Figura 9. Essa seleção foi feita porque o quarto 1 é um ambiente de permanência prolongada e possui dimensões similares às dos outros cômodos da edificação.

Neste contexto, na Figura 10 é possível visualizar a recriação do espaço no *SketchUp*, na qual considerou-se as características construtivas expostas na Tabela 4. Com relação aos detalhes construtivos, o Q1 possui apenas uma porta de madeira compensada com dimensões de 2,1x0,8m² na fachada norte, junto com uma janela na fachada leste que mede 2,0x0,6m², feita com vidro temperado de 3mm e 30cm acima do nível do chão. Além disso, o beiral e a cobertura foram realizados com telha termoacústica do tipo sanduíche, enquanto o piso foi executado com concreto polido. O telhado possui inclinação de 12,5%, com a altura do pé direito variando entre 2,5 e 2,9m, assim como representado na Figura 10.

Figura 10 - Modelagem do Quarto 1 no SketchUp. Fonte: Autoral.

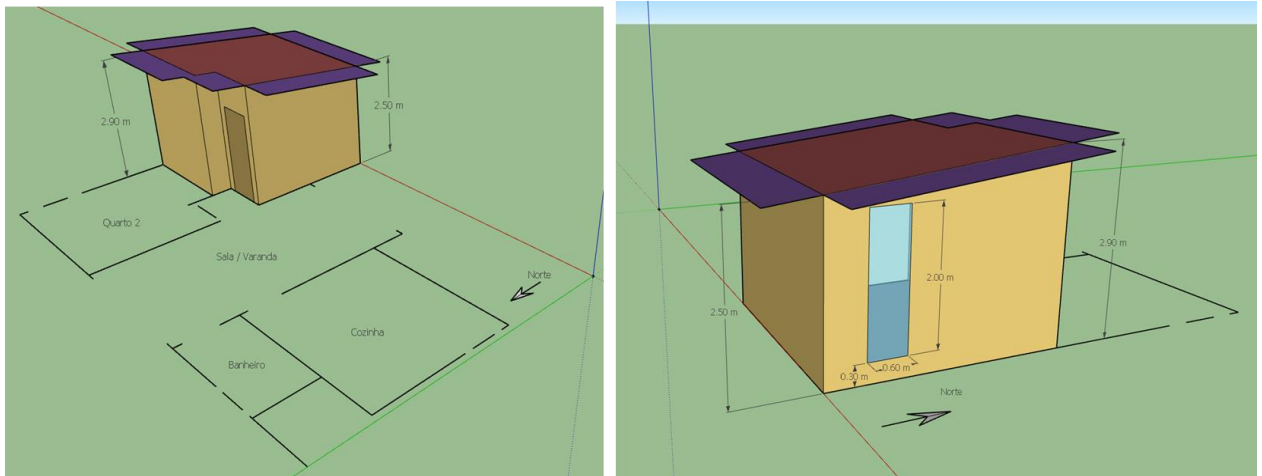


Tabela 4 – Detalhamento construtivo do Quarto 1 modelado no SketchUp. Fonte: Autoral.

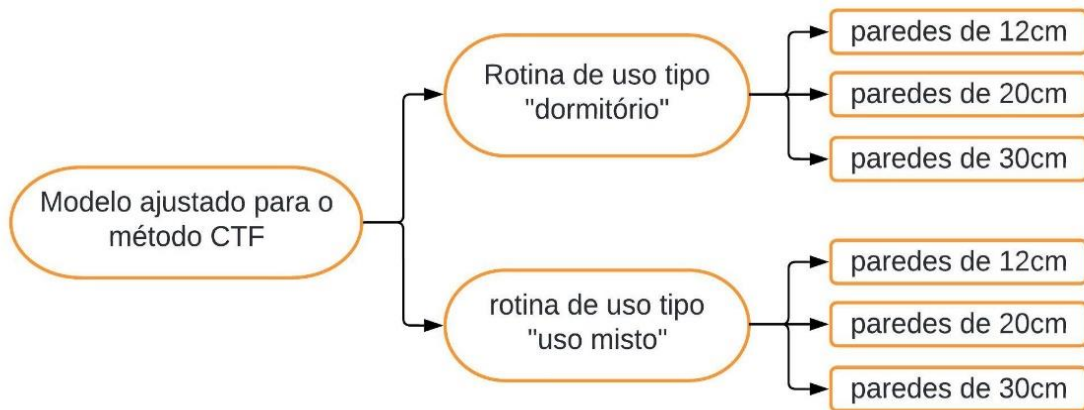
| Elemento | Direção | Área (m ²) | Detalhe Construtivo |
|-----------|---------|------------------------|---------------------------------|
| Parede | Norte | 6,85 | Taipa de pilão |
| | Norte | 1,66 | Taipa de pilão |
| | Sul | 8,97 | Taipa de pilão |
| | Leste | 8,80 | Taipa de pilão |
| | Oeste | 8,14 | Taipa de pilão |
| | Oeste | 1,94 | Taipa de pilão |
| Janela | Leste | 1,20 | Vidro temperado 3mm |
| Porta | Norte | 1,68 | Porta de compensado |
| Beiral | Norte | 2,82 | Telha termoacústica (sanduíche) |
| | Sul | 2,82 | Telha termoacústica (sanduíche) |
| | Leste | 2,98 | Telha termoacústica (sanduíche) |
| | Oeste | 2,55 | Telha termoacústica (sanduíche) |
| Piso | - | 12,44 | Concreto Polido |
| Cobertura | - | 12,51 | Telha termoacústica (sanduíche) |

Outro ponto importante é sobre a orientação solar da edificação. Assim como exposto na planta baixa (Figura 9) não se considerou variações angulares com relação ao eixo Norte. No entanto, é relevante ressaltar que foi realizada uma medição no local, por meio de bússola, e confirmou-se que a edificação está de fato orientada para o norte, portanto, seguindo a orientação real da edificação.

3.2.2 – Método CFT

Após a modelagem do Q1, gerou-se um arquivo do tipo IDF que foi exportado para o *EnergyPlus* por meio do plug-in do *Open Studio*. Para a simulação, foram adotadas as configurações de cargas internas, ventilação natural e rotina de uso e ocupação de acordo com a NBR 15575-1 (2021) para ambientes do tipo dormitório e uso misto. Portanto, seis cenários foram simulados para o método CTF, visto que foi variada a rotina de uso entre dormitório e uso misto, além da espessura das paredes entre 12, 20 e 30cm. A Figura 11 apresenta um fluxograma dos cenários avaliados.

Figura 11 – Cenários simulados para o método CTF. Fonte: Autoral.



As informações gerais consideradas na modelagem no *EnergyPlus* estão resumidas na Tabela 5. Para configurar o script do modelo CTF, definiu-se que o terreno se encontra no subúrbio e apresenta distribuição solar "*FullExterior*", que considera todas as superfícies que afetam a edificação. Com relação ao *timestep*, considerou-se o valor de 10 análises por hora.

Com relação a influência da vestimenta dos usuários existe a medida "clo", que é utilizada para descrever a resistência térmica oferecida pelas roupas ou vestimentas usadas por uma pessoa. Seguindo a sugestão proposta por Sousa e Silva (2021), para a cidade de Campo Grande, considerou-se que a vestimenta é de 1clo durante os meses de inverno (período de 20/06 até 21/09) e de 0,5clo no restante do ano.

Além das características da rotina de uso e ocupação, são consideradas também as propriedades dos materiais e sistemas construtivos adotados, as particularidades climáticas da cidade selecionada e os sistemas de resfriamento e aquecimento artificial implementados. Nesse contexto, a cidade escolhida para execução das simulações é Campo Grande, capital do estado de Mato Grosso do Sul.

Essa decisão é justificada por ser a cidade na qual o Canteiro Experimental está inserido, e também pela disponibilidade de um arquivo climático do tipo EPW (*energyplus weather data*) fornecido pelo INMET (Instituto Nacional de Meteorologia), o qual foi utilizado nas simulações.

Tabela 5 - Características da simulação. Fonte: Adaptado de NBR 15575-1 (2021)

| Componentes | Descrição |
|------------------------------------|--|
| Taxa de Ocupação | Considerou-se o padrão de ocupação do tipo dormitório (Figura 12) e do tipo uso misto (Figura 13). Em ambos os casos, consideraram-se dois ocupantes descansando, ou seja, com fração radiante de 0,30 e taxa metabólica de 1,0 met. |
| Iluminação artificial | Considerou-se o padrão de ocupação do tipo dormitório (Figura 12) e do tipo uso misto (Figura 13). Adotou-se densidade de potência instalada de 5,0 W/m ² , fração radiante de 0,32 e fração convectiva de 0,23. |
| Dias da semana | Considerou-se todos os dias da semana com a mesma rotina de uso, sem diferenciação entre semana e fim de semana ou feriados |
| Ventilação Natural | Considerou-se uma taxa de renovação do ar de 10 renovações por hora (ren/h) nos momentos sem ocupação do ambiente. Nos períodos de ocupação, somente o ar-condicionado está configurado para operar. |
| Sombreamento | Considerou-se um beiral de 80cm no entorno da edificação, feito com o mesmo material da cobertura, que é telha tipo sanduíche. |
| Sistema de climatização artificial | Acionado somente durante as horas de ocupação, o <i>setpoint</i> de acionamento para aquecimento e resfriamento do ambiente são respectivamente: 21 e 23°C. |

Vale ressaltar que, com relação ao sistema de climatização artificial, os valores dos *setpoints* para resfriamento e aquecimento (21 e 23°C) foram utilizados em referência à normativa NBR 15575-1 (2021). Contudo, para futuras pesquisas, recomenda-se a adoção de um intervalo mais condizente com o uso real, como por exemplo, entre 18 e 25°C.

Com relação ao método utilizado para modelar o sistema de ar-condicionado, optou-se pelo chamado de *Ideal Loads Air System* (Sistema de Ar de Cargas Ideais). Este método é uma abordagem simplificada no *EnergyPlus* para modelar sistemas de ar-condicionado, na qual o ar é aquecido ou resfriado diretamente até alcançar as condições desejadas de temperatura e umidade para a zona, sem considerar as complexidades dos componentes reais, como bobinas de aquecimento e resfriamento, trocadores de calor, entre outros. Outro ponto é que o aparelho de ar-condicionado

funciona considerando a rotina de uso e ocupação, ou seja, somente é acionado quando há ocupação no ambiente.

Os gráficos apresentados nas Figura 12 e Figura 13, respectivamente, mostram a rotina de uso e ocupação e também do uso da iluminação artificial nos dois cenários considerados nesta pesquisa. Observa-se que a parte da manhã é igual nos dois modelos, a principal diferença reside no início da ocupação na parte da tarde, que ocorre às 14h no caso do uso misto e somente às 22h no caso do dormitório.

Figura 12 - Padrões de uso e ocupação do tipo dormitório. Fonte: Adaptado de NBR 15575-1 (2021)

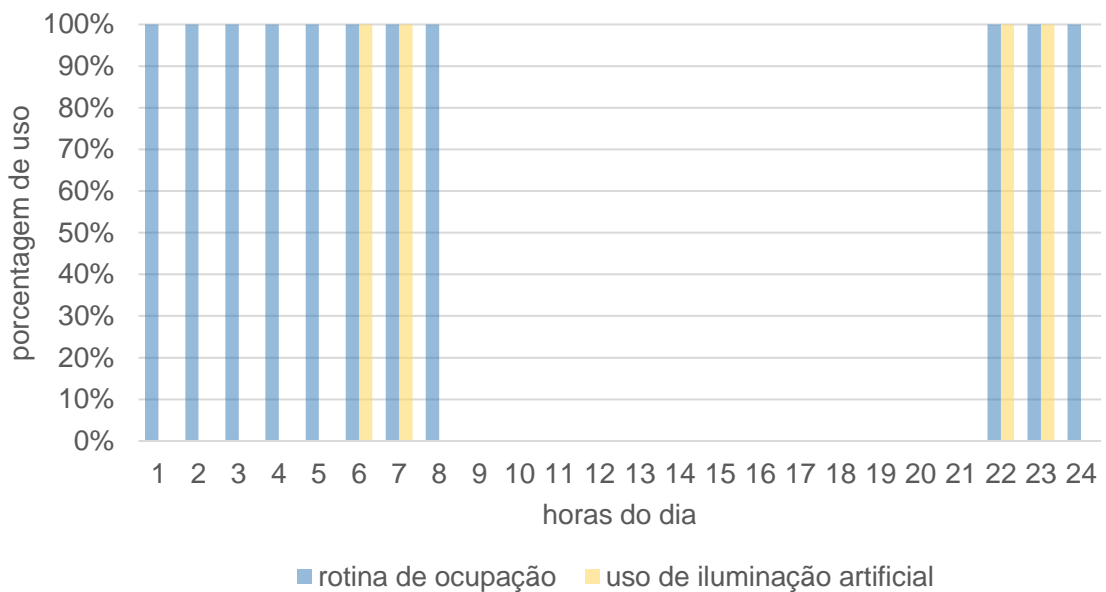
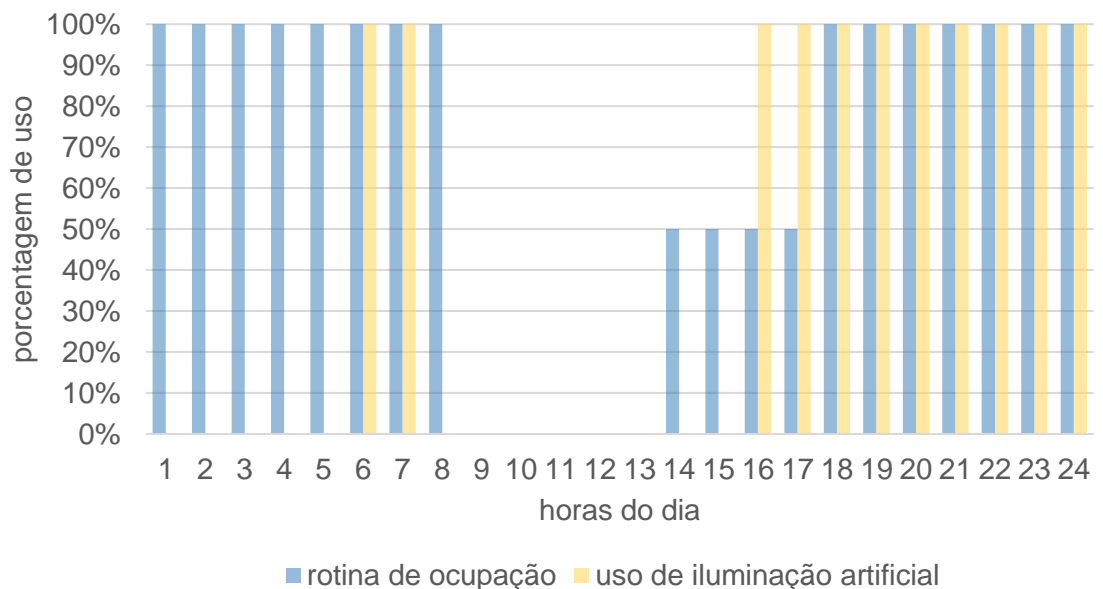


Figura 13 - Padrões de uso e ocupação do tipo uso misto. Fonte: Adaptado de NBR 15575-1 (2021)



Os dados de temperatura do solo ao longo ano para Campo Grande estão expostos na Tabela 6, dado obtido por meio do arquivo climático da cidade. Esta informação é utilizada pelo *EnergyPlus* para considerar as interações entre o solo e as estruturas construídas, o que impacta o desempenho termoenergético da edificação como um todo.

Tabela 6 – Descrição da temperatura do solo em Campo Grande – MS durante o ano. Fonte: Autoral.

| Mês | Jan. | Fev. | Mar. | Abr. | Mai | Jun. | Jul. | Ago. | Set. | Out. | Nov. | Dez. |
|---------------------------------------|------|------|------|------|-----|------|------|------|------|------|------|------|
| Temperatura média do solo (°C) | 25 | 25 | 24 | 24 | 23 | 23 | 23 | 23 | 24 | 24 | 25 | 25 |

Com relação às propriedades dos materiais e sistemas construtivos utilizados é possível visualizar na Tabela 7 uma descrição dos componentes construtivos adotados. Ressalta-se que no caso das paredes de taipa variou-se os valores das propriedades higrotérmicas, sendo que tais valores estão representados na Tabela 10. Verifica-se que os outros elementos construtivos possuem valores fixos para as propriedades térmicas, ou seja, a variação ocorre exclusivamente nas paredes de taipa. Além disso, também se varia a espessura das paredes de taipa, realizando uma simulação independente para cada espessura. Dessa forma, é possível obter resultados para cada cenário e viabiliza a comparação entre os modelos.

Tabela 7 – Descrição das propriedades dos materiais utilizados no quarto 1. Fonte: Autoral.

| Material construtivo | Taipa de pilão | Concreto Polido | Chapa de alumínio | Poliestireno (EPS) | Madeira compensada |
|--|---------------------------|-----------------|---------------------|--------------------|--------------------|
| Local utilizado | parede | piso | telha termoacústica | | porta |
| Espessura (cm) | variável 12, 20 e 30 | 10,00 | 0,20 | 3,00 | 5,00 |
| Condutividade térmica (W/m.K) | variável ver Tabela 10 | 2,86 | 230,00 | 0,04 | 0,14 |
| Massa específica (kg/m³) | variável ver Tabela 10 | 2400 | 2700 | 16 | 530 |
| Calor específico (J/kg.K) | variável ver Tabela 10 | 1010 | 880 | 1420 | 1880 |
| Emissividade térmica (%) | 0,90 | 0,90 | 0,12 | 0,90 | 0,90 |
| Absortância solar (%) | 0,50 | 0,70 | 0,15 | 0,20 | 0,70 |
| Absortância visível (%) | 0,50 | 0,70 | 0,15 | 0,20 | 0,70 |

Além dos elementos construtivos apresentados na Tabela 7 considerou-se a janela sendo composta por vidro comum transparente de 3mm, configurado através da base de dados do *EnergyPlus* pelo material “*clear 3mm*”, que possui condutividade térmica de 0,90 W/m.K.

3.2.3 – Método EMPD

A modelagem da residência considerando o modelo EMPD segue todas as características descritas para o modelo CTF, com a adição de algumas propriedades higrotérmicas da taipa. Assim como exposto na Figura 14, são:

- fator de resistência à difusão de vapor de água;
- coeficiente da equação de umidade a, b, c, d;
- espessura da camada de revestimento;
- fator de resistência à difusão de vapor de água da camada de revestimento.

Destaca-se que este modelo (EMPD) segue as equações matemáticas propostas por Kerestecioglu et al. (1988), dessa forma é preciso como dado de entrada coeficientes específicos do material. Tais coeficientes foram pré-definidos pelos autores para uma série de materiais, sendo o mais próximo para a taipa o tijolo de barro (*earthenware blocks*), os quais possuem os seguintes valores:

- coeficiente a: 0,009420;
- coeficiente b: 5,393850;
- coeficiente c: 0,003607;
- coeficiente d: 0,205223.

Nesse contexto, devido à falta de valores específicos para o sistema construtivo de taipa, optou-se por adotar uma variação de $\pm 10\%$ a partir dos valores disponíveis para o tijolo de barro. Assim, a Tabela 8 apresenta os valores mínimos e máximos calculados para cada um dos coeficientes, que serão considerados como intervalo de variação destas propriedades para análise higrotérmica das paredes de taipa pelo método EMPD.

Tabela 8 – Valores dos coeficientes do material. Fonte: Adaptado de Kerestecioglu et al. (1988).

| | Valor mínimo | Valores para tijolo de barro | Valor máximo |
|----------------------|--------------|------------------------------|--------------|
| Coeficiente a | 0,0085 | 0,00942 | 0,0104 |
| Coeficiente b | 4,8545 | 5,39485 | 5,9332 |
| Coeficiente c | 0,0032 | 0,00361 | 0,0040 |
| Coeficiente d | 0,1847 | 0,20522 | 0,2257 |

Figura 14 - Dados de entrada necessários para o modelo EMPD. Fonte: *EnergyPlus* (versão 9.4).

Explanation of Object and Current Field

Object Description: Additional properties for moisture using EMPD procedure
HeatBalanceAlgorithm choice=MoisturePenetrationDepthConductionTransferFunction only
Has no effect with other HeatBalanceAlgorithm solution algorithms

Field Description: Material Name that the moisture properties will be added to. Additional material properties required to perform the EMPD model. Effective Mean Penetration Depth (EMPD)
ID: A1

| Field | Units | Obj1 |
|---|---------------|---------------|
| Name | | |
| Water Vapor Diffusion Resistance Factor | dimensionless | |
| Moisture Equation Coefficient a | dimensionless | |
| Moisture Equation Coefficient b | dimensionless | |
| Moisture Equation Coefficient c | dimensionless | |
| Moisture Equation Coefficient d | dimensionless | |
| Surface Layer Penetration Depth | m | autocalculate |
| Deep Layer Penetration Depth | m | autocalculate |
| Coating Layer Thickness | m | |
| Coating Layer Water Vapor Diffusion Resistance Factor | dimensionless | |

Outro dado de entrada necessário é o fator de resistência à difusão de vapor de água (*water vapor diffusion resistance factor*), que é uma medida da capacidade de um material de resistir à passagem do vapor de água através dele. Quanto maior o fator de resistência à difusão, maior a resistência do material à passagem do vapor de água. De acordo com Fraunhofer Ibp (2018), pode-se calcular este fator por meio da seguinte equação:

Equação 1 - Fator de resistência à difusão de vapor de água

$$\mu = \frac{\delta_a}{\delta_m}$$

Sendo:

- μ : fator de resistência à difusão de vapor de água [adimensional]
- δ_a : permeabilidade ao vapor de água do ar parado [kg/m.s.Pa]
- δ_m : permeabilidade ao vapor do material [kg/m.s.Pa]

Para determinar o δ_a será utilizado a equação apresentada por Fraunhofer (2018), na qual tem-se:

Equação 2 - Permeabilidade ao vapor de água do ar parado

$$\delta_a = \frac{1,968 \times 10^{-7} \times (\vartheta + 273)^{0,81}}{P}$$

Sendo:

- ϑ : temperatura do ar [°C]
- P : pressão barométrica [Pa]

Logo, considerando a pressão barométrica ao nível do mar sendo de 101.325Pa, em uma temperatura de 25°C, tem-se que a permeabilidade ao vapor de água do ar parado vale aproximadamente $1,96 \cdot 10^{-10}$ kg/m.s.Pa.

Para determinar o valor da permeabilidade ao vapor da taipa, adotou-se a equação proposta por Tan e Liang et al. (2022), que descreve a permeabilidade ao vapor de água dos materiais terrosos, com estudo específico em paredes em taipa de pilão. Os autores observaram que a permeabilidade ao vapor de água de materiais terrosos varia com a umidade relativa, logo, a partir da curva ajustada ao gráfico obtiveram uma equação que descreve a permeabilidade ao vapor de água desses materiais, em função da umidade relativa do ambiente externo.

Equação 3 - Permeabilidade ao vapor do material

$$\delta_m = 1,220 \times 10^{-11} + 5,114 \times 10^{-12} \times \varphi^{3,21}$$

Sendo:

- φ : umidade relativa do ar [%]

Portanto, considerando como exemplo uma umidade relativa do ar de 60% (0,6) tem-se que o valor da permeabilidade ao vapor da taipa é de aproximadamente $1,32 \cdot 10^{-11}$ kg/m.s.Pa. Logo, aplicando Equação 1, obtém-se que o fator de resistência à difusão de vapor de água da taipa de pilão será igual a 14,81. Neste contexto, a

Tabela 9 relaciona o valor do fator de resistência à difusão de vapor de água (μ), calculado a partir de diferentes valores de umidade relativa (φ).

Tabela 9 – Fator de resistência à difusão de vapor de água da taipa para cada umidade relativa.
Fonte: Autoral.

| φ | 10% | 20% | 30% | 40% | 50% | 60% | 70% | 80% | 90% | 100% |
|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| μ | 16,07 | 16,03 | 15,92 | 15,69 | 15,33 | 14,81 | 14,13 | 13,29 | 12,35 | 11,32 |

Por fim, é necessário obter o valor do fator de resistência à difusão de vapor de água da camada de revestimento (*coating layer water vapor diffusion resistance factor*). Considerando que a taipa de pilão é um elemento construtivo monolítico e que não há revestimento aplicado em nosso objeto de estudo, será considerado como sendo o valor zero tanto a espessura da camada de revestimento, quanto sua respectiva resistência à difusão de vapor de água.

Da forma análoga ao método CTF (ver Figura 11), simulou-se os mesmos seis cenários pelo método EMPD, considerando as duas rotinas de uso (dormitório e uso misto) e três espessuras de parede (12, 20 e 30cm).

Além disso, é importante ressaltar que o método EMPD foi aplicado exclusivamente nas paredes de taipa, enquanto o restante do modelo (piso, cobertura e aberturas) continuou a utilizar o método CTF, uma vez que apenas as propriedades higrotérmicas da taipa foram avaliadas no modelo. Dessa forma, nesta pesquisa a única diferença entre os scripts dos modelos CTF e EMPD reside na modelagem das paredes de taipa.

3.3– Simulação computacional

Nesta fase, os scripts modelados no *EnergyPlus* são exportados para o programa *JePlus* (versão 2.1.0). O *JePlus* é uma ferramenta projetada para automatizar e aprimorar o processo de simulação energética de edifícios, visto que oferece a capacidade de definir intervalos de variação para diversas variáveis e realizar simulações com diferentes cenários, possibilitando a parametrização das variáveis de interesse de forma eficiente e simplificada.

Logo, para os scripts do modelo de simulação CTF estabeleceu-se intervalos de variação para as propriedades de calor específico, condutividade térmica e massa específica. No caso do método de simulação EMPD, além das variáveis mencionadas

anteriormente, também foram definidos intervalos de variação para as propriedades de resistência à difusão de vapor de água e os coeficientes a, b, c, d. Os intervalos de variação adotados para cada uma dessas propriedades higrotérmicas estão detalhados na Tabela 10.

Tabela 10 - Valores das propriedades higrotérmicas consideradas nas simulações. Fonte: Autoral.

| | Valor mínimo | Valor máximo | Definição do intervalo |
|--|---------------------|---------------------|---|
| Condutividade térmica (W/m-K) | 0,70 | 1,10 | Valores definidos por revisão bibliométrica de Silva e Milani (2022) |
| Massa específica (kg/m³) | 1400,00 | 2200,00 | Valor mínimo definido por Mileto, Vegas e Cristini (2012) e valor máximo por Losini et. al (2023) |
| Calor específico (J/kg-K) | 650,00 | 950,00 | Valor mínimo definido por Li et al. (2023) e valor máximo por Liang, Tan e Jiang (2022) |
| Fator de resistência à difusão de vapor de água | 11,50 | 16,00 | Valores calculados, ver Tabela 9 |
| Coeficiente a | 0,0085 | 0,0104 | Valores calculados, ver Tabela 8 |
| Coeficiente b | 4,85 | 5,93 | Valores calculados, ver Tabela 8 |
| Coeficiente c | 0,0032 | 0,0040 | Valores calculados, ver Tabela 8 |
| Coeficiente d | 0,1847 | 0,2257 | Valores calculados, ver Tabela 8 |

Ressalta-se que o método CTF possui três variáveis independentes (condutividade térmica, massa específica e calor específico), cada uma variando dez vezes, resultando em um total de mil simulações. Por outro lado, para o método EMPD são consideradas oito variáveis, com cinco valores possíveis para cada uma, totalizando 390.625 cenários de simulação para cada espessura da parede de taipa.

Logo, observa-se que o valor máximo e mínimo de cada propriedade é a mesma em ambos os métodos, porém, a diferença é que para o CTF selecionou-se dez valores dentro deste intervalo, enquanto para o método EMPD selecionou-se cinco valores. Com relação ao tamanho da base de dados, considerando que o método CTF possui mil cenários simulados, optou-se por considerar uma amostra de mil cenários também para o EMPD, reduzindo possíveis erros associados a diferentes tamanhos de amostra entre os métodos. Vale lembrar que é possível definir o tamanho

da amostra aleatória no próprio *Jepplus*, logo os resultados finais já saem com mil linhas para cada cenário simulado.

O *Jepplus* fornece como resultado uma tabela abrangente contendo uma variedade de dados de saída após a conclusão das simulações. Neste trabalho específico, selecionou-se três variáveis de saída para cada cenário simulado, que são: carga térmica de resfriamento, a carga térmica de aquecimento e horas de desconforto durante a ocupação.

Como o nome sugere, a carga térmica indica a energia necessária para aquecer ou resfriar o ambiente ao longo do ano, expressa em kWh. Já o indicador das horas de ocupação em desconforto quantifica o tempo (horas) em que as condições de conforto térmico não são atendidas, durante a ocupação do ambiente. A seleção desses critérios foi feita com o objetivo de avaliar o desempenho térmico de um cômodo construído em taipa, abordando tanto a eficiência energética quanto o conforto dos usuários.

Com relação ao indicador de conforto térmico do usuário, o nome do dado de saída do *EnergyPlus* é: “*time not meeting the adaptive comfort models during occupied hours*” (tempo que não atende aos modelos de conforto adaptativo durante horários ocupados). Logo, nota-se que é um dado de saída baseado em um modelo de conforto térmico pré-existente, ou seja, o software de simulação apresenta algumas opções de modelos de conforto como resultado de saída.

Neste contexto, para esta pesquisa optou-se pela utilização da zona de conforto térmico determinada com base nas equações da ASHRAE Standard 55 (2010), com limites de aceitabilidade de 80% do modelo de conforto adaptativo. Essa escolha se justifica por dois motivos, primeiramente, a ASHRAE é amplamente reconhecida internacionalmente por seus rigorosos critérios de avaliação do conforto térmico, estabelecendo padrões que são referência na indústria. Em segundo lugar, o modelo de conforto adaptativo considera a capacidade dos ocupantes de se adaptarem a diferentes condições climáticas, tornando-o especialmente adequado para contextos onde a interação entre os ocupantes e o ambiente é dinâmica.

Com relação aos indicadores da carga térmica para resfriamento e aquecimento, como o nome sugere, é a quantidade de energia utilizada para climatizar o ambiente. Considera-se nesta avaliação somente as horas de ocupação e também os *setpoints* pré-definidos (ver Tabela 5).

Desta forma, após definir os dados de saída de interesse, procede-se com a execução da simulação no *Jepplus* para cada um dos cenários expostos na Figura 11. Além disso, cada simulação produz um arquivo de saída contendo mil linhas de dados, sendo que cada linha contém as propriedades higrotérmicas adotadas e os resultados dos três indicadores avaliados.

3.4- Análise estatística dos resultados

Para a realização da análise estatística, inicialmente foram consolidados os resultados das simulações através do programa Excel, criando-se um arquivo único como base de dados para todos os doze cenários simulados, ou seja, seis cenários para o método CTF e seis para o método EMPD.

Na sequência, esse arquivo foi utilizado para realizar as análises estatísticas no software *RStudio*, na versão 4.3.2. O *RStudio* é uma interface para a linguagem de programação em R, um recurso de código aberto que oferece diversas ferramentas para análise estatística de dados e geração de gráficos.

Dessa forma, para cada um dos doze cenários simulados considerando a variabilidade das propriedades higrotérmicas da taipa (parametrização das propriedades), gerou-se dados de saída para três indicadores. Ou seja, para a pesquisa considerou-se como indicadores os três dados de saída provenientes das simulações, que são:

- indicador 1: carga térmica de resfriamento anual (kWh);
- indicador 2: carga térmica de aquecimento anual (kWh);
- indicador 3: horas de desconforto durante a ocupação anual (h).

A fim de facilitar a interpretação dos resultados, a análise estatística foi dividida em dois subgrupos distintos: de sensibilidade e de incerteza. A análise de sensibilidade visa obter conclusões sobre a influência das variáveis em cada um dos indicadores avaliados. Já a análise de incerteza apresenta resultados relacionados ao intervalo de confiança e à densidade de ocorrência, fornecendo uma avaliação da confiabilidade e estabilidade dos resultados diante de variações e incertezas nos dados de entrada. Essa abordagem segmentada permite uma compreensão mais detalhada e abrangente dos resultados e, portanto, uma interpretação mais precisa.

3.4.1 - Análise de sensibilidade

Com o intuito de avaliar o quão sensível os indicadores estão relacionados com as propriedades higrotérmicas, pautou-se em três análises distintas, são elas:

- histograma de valores médios;
- coeficiente de correlação linear;
- análise de variância (ANOVA).

Também chamado de coeficiente de correlação de Pearson, o coeficiente de correlação linear é um valor adimensional que varia entre -1 e 1 e mede a interdependência linear entre as variáveis. Logo, caso as variáveis sejam dependentes de uma forma não linear, o coeficiente de correlação não apresentará resultados significativos.

De acordo com Bruce e Bruce (2019) o coeficiente de correlação linear é uma medida utilizada para estabelecer a associação entre duas variáveis contínuas. Além disso, os autores explicam que em um conjunto de dados de tamanho N, composto por duas variáveis x e y, é possível calcular o coeficiente de correlação linear (r) entre elas da seguinte forma:

Equação 4 – Cálculo do coeficiente de correlação linear

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{(N-1) \cdot s_x \cdot s_y}$$

Sendo:

- r : coeficiente de correlação linear
- x_i, y_i : valores das variáveis na observação i ;
- \bar{x}, \bar{y} : valores médios das variáveis;
- s_x, s_y : desvio padrão das variáveis.

Por meio deste coeficiente pode-se classificar a relação como proporcional (valor positivo) ou inversamente proporcional (valor negativo). No caso de o valor ser próximo a zero, a interpretação é que não há relação linear entre as variáveis. Neste trabalho classificou-se o nível de correlação entre as variáveis assim como expresso na Tabela 11.

Tabela 11 – Interpretação do coeficiente de correlação linear. Fonte: Autoral.

| Valor do r | Interpretação |
|----------------------|------------------------|
| $ r < 0,2$ | Correlação muito fraca |
| $0,2 \leq r < 0,5$ | Correlação fraca |
| $0,5 \leq r < 0,7$ | Correlação moderada |
| $0,7 \leq r < 0,9$ | Correlação forte |
| $ r \geq 0,9$ | Correlação muito forte |

Com relação a análise de variância (ANOVA), Pinheiro et al. (2012) explicam que é um procedimento estatístico utilizado para comparar médias entre vários grupos, com o intuito de verificar se há uma diferença estatisticamente significativa entre as variáveis. Realiza-se esta avaliação por meio do p-valor (valor-p), que quantifica o grau de evidência contra a hipótese nula em um teste estatístico.

No caso da ANOVA, a hipótese nula é que há diferença significativa entre as médias dos grupos. Portanto, considerando um nível de confiança de 95%, caso o p-valor seja menor do que 0,05 rejeita-se a hipótese nula e conclui-se que o grupo é estatisticamente significativo.

Logo, a análise de sensibilidade é uma ferramenta importante para avaliar a robustez do modelo e a influência das propriedades higrotérmicas dos indicadores selecionados. Assim sendo, objetiva-se identificar as propriedades higrotérmicas relevantes para a simulação termoenergética em construções com terra e determinar a significância da aplicação dos diferentes métodos de simulação termoenergética (CTF e EMPD) para a verificação do desempenho da taipa.

3.4.2 - Análise de incerteza

A análise de incerteza tem como objetivo avaliar e quantificar as variações e imprecisões nos dados de entrada. Assim sendo, para conduzir essa análise optou-se pela determinação do intervalo de confiança e gráficos de densidade de ocorrência. Tais análises são ferramentas importantes para auxiliar na compreensão da incerteza associada aos resultados, bem como em sua distribuição probabilística.

O intervalo de confiança é explicado por Bruce e Bruce (2019) como sendo uma ferramenta estatística que permite estimar a faixa de valores prováveis para uma variável desconhecida, com base em uma amostra dos dados. Essa estimativa é associada a um nível de confiança, que para esta pesquisa adotou-se como sendo

95%. Em outras palavras, cria-se um intervalo com valores máximos e mínimos, dentro do qual há 95% de probabilidade de conter o verdadeiro valor do parâmetro.

Destaca-se que a investigação das propriedades higrotérmicas da taipa é caracterizada pela escassez de dados de referência. Assim, a determinação de um intervalo de confiança é um resultado de extrema importância, pois pode auxiliar na tomada de decisões em futuros projetos, além de contribuir para a consolidação de uma base de dados mais confiável para este sistema construtivo. Dessa forma, é possível ter uma maior segurança na aplicação da taipa de pilão em contextos práticos de engenharia e arquitetura.

Adicionalmente, os gráficos de densidade de probabilidade surgem como uma representação gráfica da distribuição de probabilidade de uma variável contínua. Assim como explicado por Bruce e Bruce (2019), esta análise fornece uma visualização rápida da distribuição dos dados, visto que a densidade de probabilidade é representada no eixo vertical (ordenadas), enquanto os valores da variável são representados no eixo horizontal (abscissas).

Portanto, em suma, a análise de incerteza é utilizada nesta pesquisa como uma ferramenta para a avaliação crítica dos resultados obtidos. Desta forma, espera-se que essa análise contribua para a compreensão das características higrotérmicas do sistema construtivo, a consolidação de uma base de dados confiável e a tomada de decisões mais seguras para aplicação da taipa em diferentes projetos.

4 - RESULTADO E DISCUSSÕES

Os resultados foram expostos em três partes, sendo a primeira uma análise do arquivo climático da cidade de Campo Grande – MS para entendimento da influência do clima na simulação. A segunda parte foi a exposição do comportamento da taipa diante das diferentes rotinas de uso de ocupação para análise termoenergética do edifício-modelo. E a etapa final envolveu a análise estatística dos resultados para parametrização das propriedades higrótérmicas da taipa.

4.1 – Análise climática de Campo Grande - MS

Assim como citado anteriormente, optou-se pelo uso do arquivo climático da cidade de Campo Grande, capital do estado de Mato Grosso do Sul, por dois motivos principais: por ser a cidade na qual o Canteiro Experimental está inserido, e também pela disponibilidade de um arquivo climático do tipo EPW, fornecido pelo INMET (Instituto Nacional de Meteorologia).

Figura 15 – Mapa da zona bioclimática 6. Fonte: NBR 15220-3 (2005)



De acordo com a NBR 15220-3 (2005), a cidade de Campo Grande está inserida na zona bioclimática 6, correspondente à região central do país, assim como representado na Figura 15. Dentre as recomendações normativas para esta zona, inclui-se sombreamento das aberturas e uso vedações externas pesadas, com o intuito incluir nos projetos elementos com massa térmica para resfriamento.

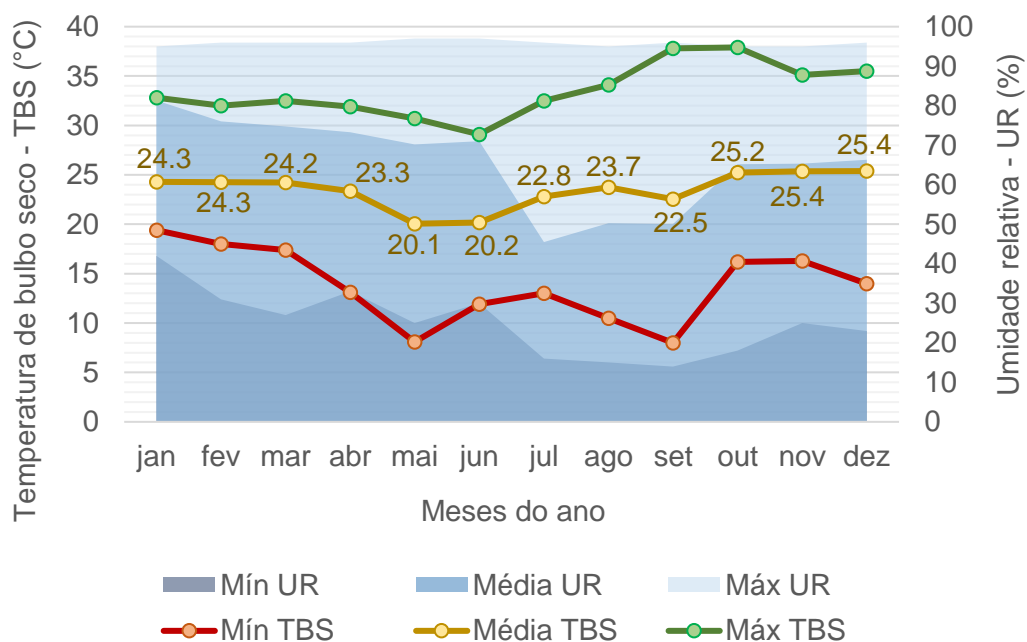
Assim sendo, nota-se que o sistema construtivo da taipa de pilão é compatível com a recomendação normativa de vedações externas pesadas, visto que apresenta alta massa térmica, com valores de condutividade térmica e calor específico favoráveis à inércia térmica.

Além da divisão do Brasil nas oito zonas bioclimáticas conforme estabelecido pela norma, o trabalho de García, Cóstola e Labaki (2023) propõe uma subdivisão em dez zonas climáticas após uma análise mais aprofundada dos arquivos climáticos e geográficos do país. Neste contexto, segundo os autores, a cidade de Campo Grande também está inserida na zona 6, que é descrita como sendo de clima quente e seco e inclui partes do bioma da mata atlântica, do cerrado e da caatinga.

Outra classificação para o clima é por meio do sistema internacional de classificação climática de Köppen-Geiger, utilizado para categorizar climas em diferentes regiões do planeta com base em critérios padronizados de temperatura e precipitação. Nesse sentido, de acordo com a Embrapa (2009), a classificação para a cidade de Campo Grande é Aw, que significa tropical com estação seca no inverno.

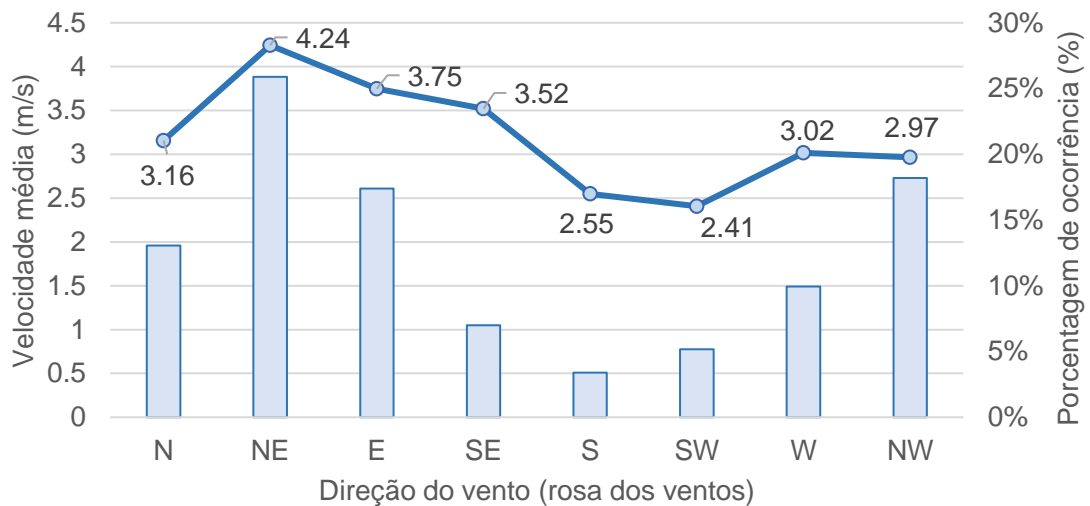
A partir do arquivo climático do tipo EPW fornecido pelo INMET, avaliou-se as variáveis climáticas considerando os dados climáticos de um ano base. Logo, a Figura 16 representa a temperatura de bulbo seco e umidade relativa do ar, com as mínimas, máximas e médias. Já a Figura 17 apresenta a porcentagem de ocorrência e velocidade do vento em cada direção da rosa dos ventos.

Figura 16 - Gráfico de temperatura e umidade da zona 6. Fonte: Autoral



Por meio da análise da Figura 16 observa-se que Campo Grande apresenta verões quentes e úmidos e invernos amenos e secos. Destaca-se que as chuvas se concentram entre os meses de outubro a abril, compondo a estação chuvosa, enquanto o período seco vai de maio a setembro.

Figura 17 – Gráfico de velocidade e direção do vento na zona 6. Fonte: Autoral



A partir da análise da Figura 17, nota-se que a direção predominante do vento é proveniente da direção nordeste, com 26% de porcentagem de ocorrência. Além disso, nesta direção também ocorrem os ventos com maiores velocidades, em média 4,24m/s. Um ponto interessante é a baixa frequência de ocorrência de ventos provenientes do sul do país, responsáveis pela dispersão de massas de ar frio, o que indica a predominância de influências climáticas mais quentes e tropicais na região.

Um dado interessante é que a NBR 15575-1 (2021) define intervalos para diferentes critérios de avaliação do desempenho térmico da envoltória de uma edificação, e o intervalo ao qual a edificação está inserida depende do valor médio da temperatura de bulbo seco da cidade. No caso de Campo Grande, a temperatura média de bulbo seco é de 23,4°C, portanto, a cidade se enquadra no intervalo 1 da norma, cuja definição é apresentar médias inferiores a 25°C.

4.2 – Comportamento termoenergético da taipa

Para analisar o comportamento termoenergético da taipa utilizou-se como ferramenta gráficos e histogramas de valores médios dos seguintes indicadores: carga térmica para resfriamento, carga térmica para aquecimento e horas de desconforto durante a ocupação. A análise dos histogramas de valores médios dos resultados permitiu visualizar a distribuição dos dados e identificar padrões ou tendências do comportamento termoenergético da taipa em relação às diferentes espessuras da parede e também a influência das rotinas de ocupação do edifício-modelo como tipo dormitório e tipo uso misto.

4.2.1 – Carga térmica de resfriamento anual

A Figura 18 apresenta os histogramas das médias da carga térmica para resfriamento anual considerando os métodos de simulação CTF e EMPD, e as rotinas de uso do tipo dormitório (detalhada na Figura 12) e uso tipo misto (detalhada na Figura 13). Além disso, é possível visualizar na Tabela 12 os valores médios, desvio padrão e variância para cada cenário.

Observa-se que no caso da rotina do tipo dormitório há um aumento progressivo da demanda energética para resfriamento à medida que a espessura da parede aumenta. Por outro lado, para a rotina de uso misto verifica-se uma redução decrescente na demanda energética conforme a espessura da parede aumenta. Essas constatações sugerem uma correlação significativa entre o padrão de ocupação e o consumo energético do ambiente.

Além disso, também ocorreu uma variação na amplitude dos valores de carga térmica de resfriamento do ambiente. Nos cenários de uso tipo dormitório, os valores máximos da demanda energética são em torno de 1000 kWh, enquanto no caso de uso misto atingiram cerca de 2300 kWh, mostrando um aumento de mais de 100% entre ambas situações de uso.

Figura 18 - Histograma da carga térmica de resfriamento. Fonte: Autoral.

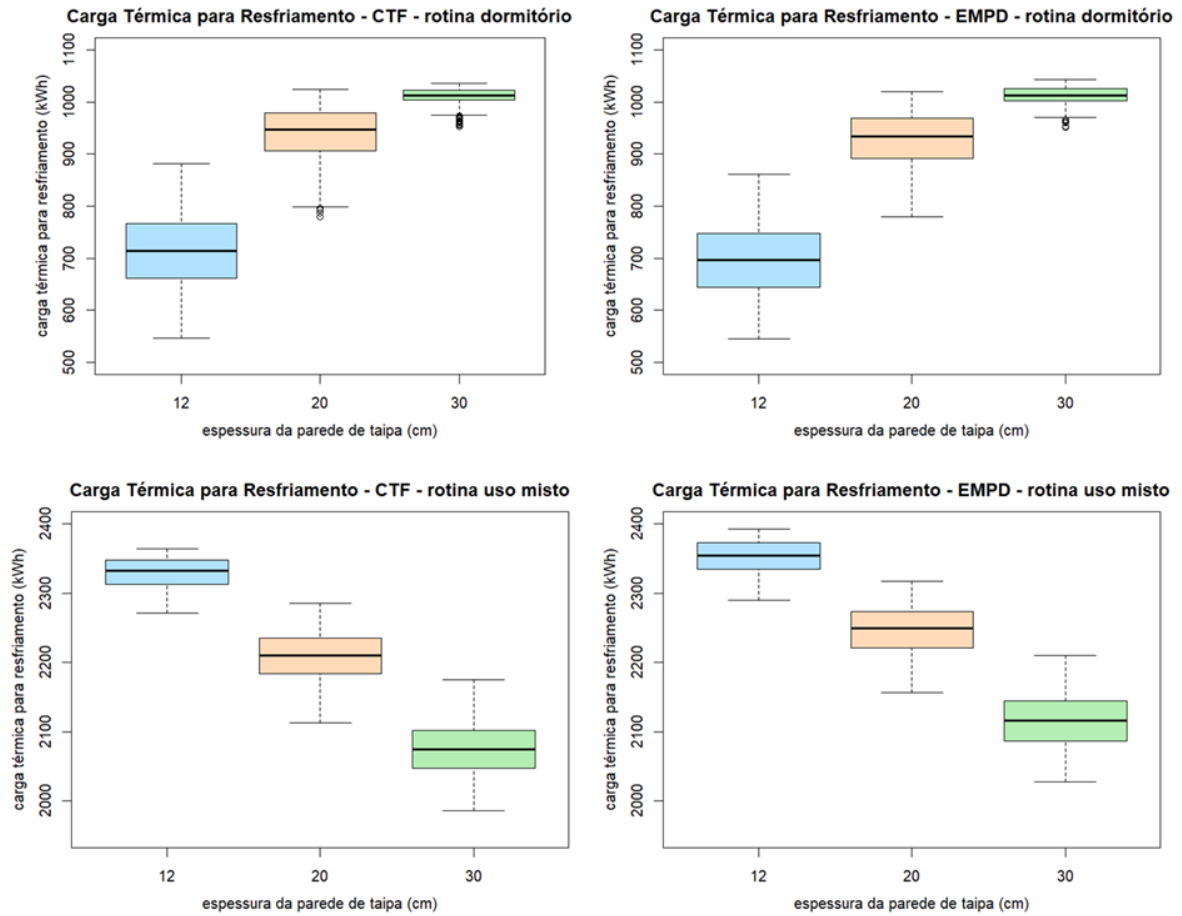


Tabela 12 – Valor médio e desvio padrão da carga térmica de resfriamento. Fonte: Autoral

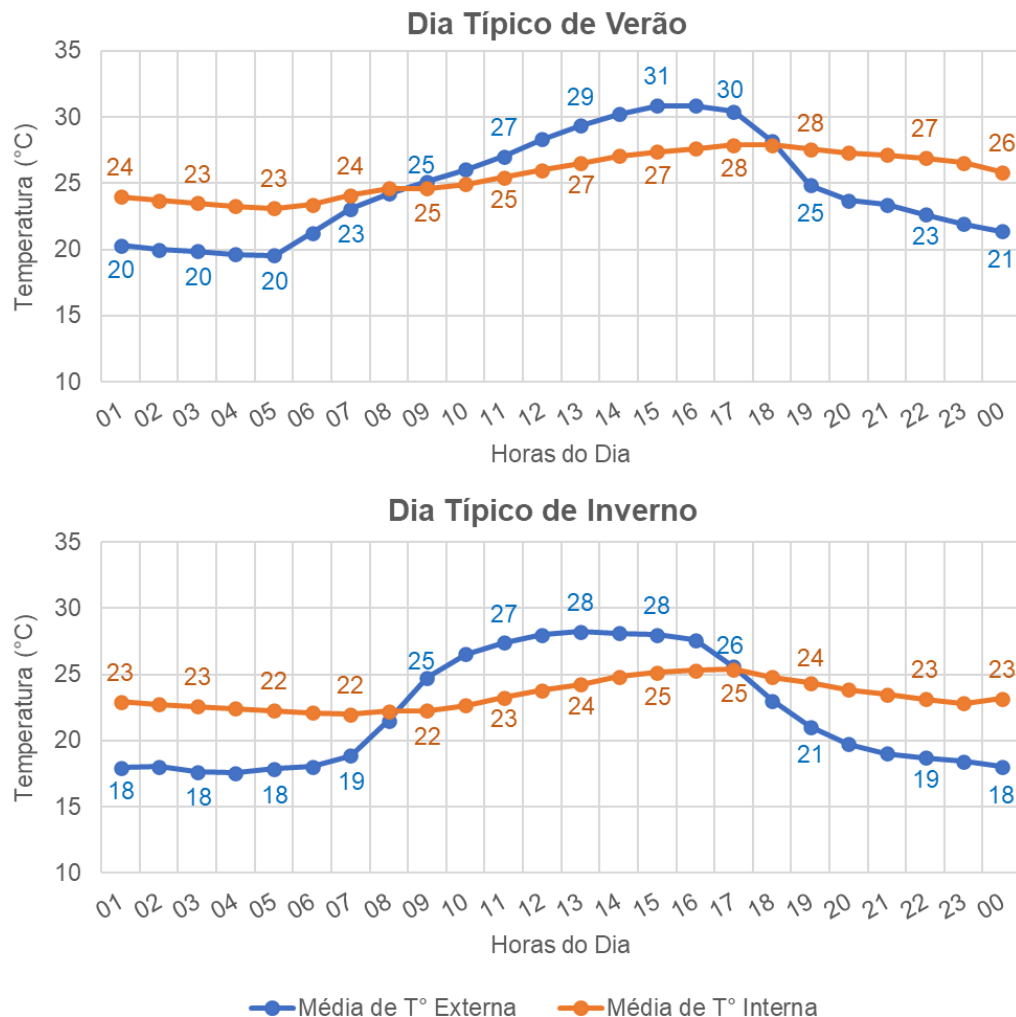
| | Espessura (cm) | Método | Valor Médio (kWh) | Desvio Padrão | Coefficiente de Variação |
|------------------------------------|----------------|--------|-------------------|---------------|--------------------------|
| Rotina de ocupação tipo dormitório | 12 | EMPD | 696,96 | 70,60 | 10,13% |
| | | CTF | 713,99 | 69,65 | 9,76% |
| | 20 | EMPD | 927,59 | 54,43 | 5,87% |
| | | CTF | 939,54 | 50,02 | 5,32% |
| | 30 | EMPD | 1011,35 | 18,46 | 1,83% |
| | | CTF | 1011,41 | 14,84 | 1,47% |
| Rotina de ocupação tipo uso misto | 12 | EMPD | 2352,57 | 23,29 | 0,99% |
| | | CTF | 2329,91 | 21,11 | 0,91% |
| | 20 | EMPD | 2246,71 | 35,35 | 1,57% |
| | | CTF | 2208,93 | 34,98 | 1,58% |
| | 30 | EMPD | 2115,94 | 39,32 | 1,85% |
| | | CTF | 2074,75 | 37,12 | 1,79% |

Com base nos dados simulados e considerando uma parede de taipa com 20 cm de espessura, realizou-se uma análise da variação horária da temperatura em um dia típico de inverno e um de verão, cujos resultados são apresentados na Figura 19.

Assim sendo, durante o verão nota-se que o pico da temperatura externa ocorre às 15h com uma média de 30,9°C. Por outro lado, o pico de temperatura no interior do ambiente ocorre às 18h, com 27,9°C. Ou seja, ocorreu um atraso térmico de 3h.

Já para o inverno, o pico de temperatura externa ocorre às 13h com uma temperatura média de 28,2°C. E no ambiente interno, o pico foi às 17h, com uma temperatura média de 25,4°C, o que indica um atraso térmico de 4h.

Figura 19 – Gráficos de temperatura horária média em um dia típico de verão e inverno em Campo Grande - MS. Fonte: Autoral.



Portanto, o atraso térmico da edificação simulada com paredes de taipa atingiu valores entre 3 e 4h. Por outro lado, observa-se na Tabela 3 que o valor do atraso térmico de paredes de taipa pode chegar a aproximadamente 7 horas, enquanto nas paredes de blocos cerâmicos esse valor é em torno de 2 horas.

Assim, conforme a simulação do presente estudo e revisão da literatura, o pico de calor que ocorre nas horas mais quentes do dia pode alcançar o interior do ambiente após 7h no caso das paredes de taipa e 2h no caso das paredes de blocos cerâmicos. Isso ressalta a importância do atraso térmico no comportamento térmico dos ambientes, uma vez que ele influencia diretamente as demandas energéticas ao longo do dia.

Adicionalmente, observa-se que o aumento da espessura da parede está atrelada ao aumento da massa térmica. Logo, a parede terá uma maior inércia térmica, que se refere à capacidade do material de resistir a mudanças em sua temperatura. Assim, paredes mais espessas possuem uma inércia térmica maior, demandando mais tempo para esfriar e, portanto, um maior consumo energético.

Outro ponto é o tempo de ocupação e consequente uso do aparelho de ar-condicionado. Assim como exposto por Samadianfard e Toufigh (2020), o desempenho energético dos edifícios não é apenas influenciado pelas propriedades dos materiais, mas também pelos ocupantes e seus hábitos comportamentais. Porém, quantificar esse parâmetro parece ser difícil, por isso há normas, como a NBR 15575-1 (2021), que estipulam rotinas de uso e ocupação a fim de padronizar as simulações, mas que por vezes acabam não sendo fiéis à realidade.

Tendo em vista que a rotina de ocupação do tipo dormitório inicia-se às 22h e termina às 8h, avalia-se somente o período noturno e início da manhã no ambiente interno, com um total de 10h. Por outro lado, na rotina de ocupação do tipo uso misto conta com o uso do ar-condicionado a partir das 14h até as 8h do dia seguinte, contemplado um período total de 18h durante o dia. Portanto, a rotina de ocupação do tipo uso misto conta com 8h a mais de ocupação do que do tipo dormitório, o que representa um aumento de 80%. Dessa forma, é esperado que o consumo energético seja maior, visto que há um aumento considerável nas horas de ocupação, logo horas de possível utilização dos equipamentos de climatização artificial.

Com relação às análises numéricas dos valores médios de consumo energético, apresentada na Tabela 12, observa-se que o coeficiente de variação é superior no cenário de ocupação tipo dormitório, indicando que uma maior

variabilidade nas demandas energéticas ao longo do tempo. Por outro lado, o menor coeficiente no caso da ocupação do tipo mista sugere uma demanda energética mais consistente e previsível ao longo do tempo.

Com intuito de colocar em perspectiva o consumo médio anual da energia elétrica para refrigeração, é preciso converter a carga térmica de refrigeração para o consumo energético real do aparelho de ar-condicionado. Para isso, é possível aplicar a Equação 5, que assim como explicado por Borgnakke e Sonntag (2012) é obtido ao dividir a carga térmica pelo coeficiente de performance (COP).

Equação 5 – Equação do consumo energético real

$$\text{Consumo energético real} = \frac{\text{Carga térmica}}{\text{COP}}$$

Logo, ao aplicar a Equação 5 considerando a parede de taipa com 20cm, simulada com o método EMPD e com rotina de ocupação do tipo uso misto, a carga térmica para resfriamento é 2.246,71kwh. Adotando-se um valor médio do COP de 3, obtém-se um consumo energético real anual de 748,9kwh.

Neste contexto, o anuário estatístico de energia elétrica 2023 (EPE, 2023), o consumo médio anual residencial per capita na região centro-oeste é de 187,9kWh. Como na simulação considerou-se o edifício-modelo habitado por duas pessoas, o consumo médio seria por volta de 376kWh, valor aproximadamente 50% menor do que o obtido para simulação com ocupação tipo uso misto, somente para refrigeração. Assim sendo, há indicativos de que o consumo energético obtido pela simulação não se aproxima dos prováveis valores reais da habitação.

Um ponto que deve ser destacado é que o ambiente foi simulado considerando o uso de ventilação natural somente nos momentos sem ocupantes. Ou seja, durante todo o período em que o aparelho de climatização artificial está programado para ser acionado não há ventilação, logo não estão sendo aplicadas as estratégias passivas da NBR 15220-3 (2005) previstas para zona 6, na qual Campo Grande está inserida.

Neste contexto, Fernandes et al. (2019) discutem que no caso da taipa é essencial considerar o efeito combinado de outras estratégias passivas e da inércia térmica, pois são fatores de grande influência no desempenho térmico. Ressalta-se que o presente estudo adotou condições de contorno com o intuito de reduzir variáveis no modelo e ater-se ao objetivo de comparar os diferentes métodos de simulação, embora no caso da simulação de uma edificação real tais variáveis devam ser consideradas ao estimar o consumo energético total.

Outra colocação é com relação a variação dos valores médios de carga térmica de resfriamento obtidos por meio dos métodos EMPD e CTF. De forma geral, o método EMPD possui médias superiores ao método CTF, porém tal diferença não ultrapassa a ordem dos 2%. Portanto, considerando um nível de significância de 95%, conclui-se que não há diferença significativa entre os resultados obtidos pelos diferentes métodos de simulação termoenergética. Logo, é possível adotar o método simplificado do CTF sem perdas significativas nos resultados simulados.

4.2.2 – Carga térmica de aquecimento anual

Com relação a carga térmica para aquecimento, observa-se na Figura 20 que para ambas as rotinas de uso há uma redução na demanda energética à medida que se aumenta a espessura das paredes. Além disso, nota-se que a média dos valores de demanda energética para aquecimento é da mesma ordem de grandeza em todos os cenários, com valores médios inferiores a 150kWh por ano. Diferentemente do indicador da carga térmica para resfriamento, neste caso a elevada inércia térmica da taipa apresenta um ganho favorável no comportamento higrotérmico do edifício-modelo, independente da rotina de uso e ocupação do ambiente, visto que o armazenamento de calor no interior da parede reduz a necessidade do consumo energético para aquecimento do ambiente.

Outra questão é que a zona climática na qual Campo Grande está inserida é caracterizada por ser uma zona de clima quente, com médias de temperatura sempre superiores a 20°C (Figura 16). Portanto, dado que o *setpoint* para aquecimento é de 21°C (ver Tabela 5), é esperado que a demanda energética para aquecimento seja baixa em comparação com outras demandas energéticas da edificação.

Dessa forma, observa-se que a base de dados da demanda energética para aquecimento é significativamente menor em comparação com o indicador de resfriamento, contribuindo assim para um maior coeficiente de variação nos diferentes cenários avaliados, conforme demonstrado na Tabela 13.

Um ponto interessante é que, enquanto para a carga térmica de resfriamento a diferença entre os métodos de simulação EMPD e CTF é na ordem de 2%, no caso do indicador da carga térmica de aquecimento este valor é na ordem dos 7%. Tal porcentagem já representa uma diferença significativa entre os modelos, visto que ao considerar um nível de confiança de 95%, variações acima de 5% são

estatisticamente significativas, com a ressalva de que o tamanho da base de dados pode influenciar este resultado, aumentando a variabilidade dos resultados.

Figura 20 - Histograma da carga térmica de aquecimento. Fonte: Autoral.

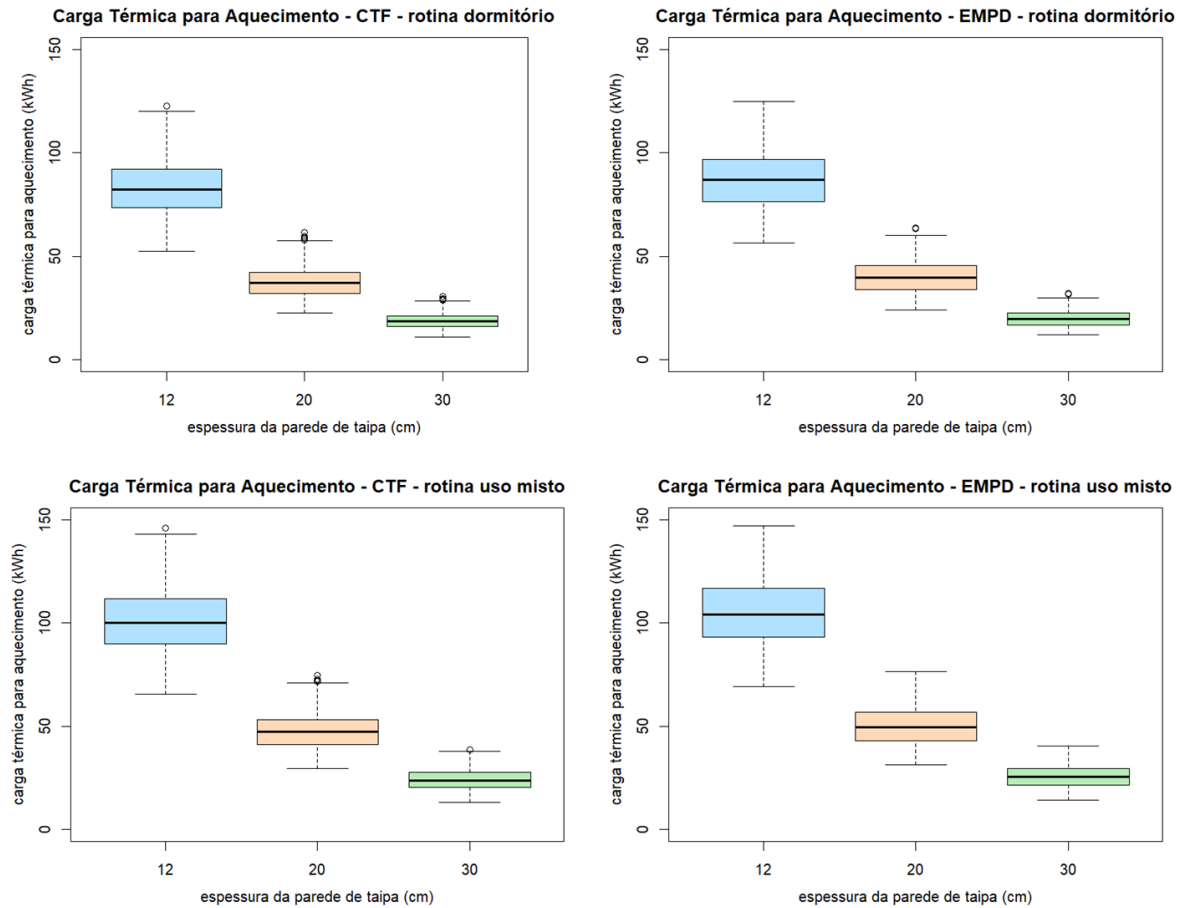


Tabela 13 – Valor médio e desvio padrão da carga térmica para aquecimento. Fonte: Autoral.

| | Espessura (cm) | Método | Valor Médio (kWh) | Desvio Padrão | Coefficiente de Variação |
|------------------------------------|----------------|--------|-------------------|---------------|--------------------------|
| Rotina de ocupação tipo dormitório | 12 | EMPD | 87,30 | 14,59 | 16,71% |
| | | CTF | 83,03 | 13,23 | 15,94% |
| | 20 | EMPD | 40,05 | 8,46 | 21,13% |
| | | CTF | 37,59 | 7,26 | 19,31% |
| | 30 | EMPD | 19,94 | 4,26 | 21,37% |
| | | CTF | 18,71 | 3,58 | 19,12% |
| Rotina de ocupação tipo uso misto | 12 | EMPD | 104,95 | 16,37 | 15,59% |
| | | CTF | 101,06 | 15,39 | 15,22% |
| | 20 | EMPD | 50,22 | 9,47 | 18,87% |
| | | CTF | 47,59 | 8,46 | 17,78% |
| | 30 | EMPD | 25,69 | 5,58 | 21,75% |
| | | CTF | 24,02 | 4,93 | 20,55% |

4.2.3 – Horas de desconforto durante a ocupação anual

Com relação ao indicador das horas de desconforto durante a ocupação, observa-se na Figura 21 que para ambas as rotinas de uso há uma redução nas horas de desconforto dos usuários à medida que se aumenta a espessura das paredes.

A partir da análise da Tabela 14, nota-se que as médias de horas de desconforto nos cenários de ocupação tipo dormitório são superiores as médias de horas de desconforto do tipo uso misto. Ressalta-se que há uma diferença de 80% entre a quantidade de horas consideradas em cada cenário, ou seja, nos cenários de uso tipo dormitório tem-se 10h de ocupação por dia, enquanto nos cenários de uso tipo misto considera-se 18h por dia.

Assim sendo, a fim de poder comparar a variação nas médias, adicionou-se uma coluna sobre porcentagem de horas de desconforto térmico no ano, calculada para cada cenário considerando as diferentes somatórias de horas totais ocupadas. Dessa forma, é possível constatar que, de modo geral, a porcentagem de horas em desconforto considerando a rotina de ocupação do tipo misto é 20% menor do que do tipo dormitório.

Tal diferença reside nas diferentes horas do dia consideradas para cada rotina de ocupação. Devido à elevada massa térmica das paredes de taipa, o pico de temperatura no interior do ambiente ocorre na parte da noite. E como 80% das horas totais da rotina de ocupação do tipo dormitório ocorrem à noite, é esperado que as médias totais de horas de desconforto do usuário sejam mais altas. Ou seja, em dias mais quentes, no cenário de ocupação tipo uso misto a climatização do ambiente pode ser acionada já no período da tarde, diferente da ocupação do tipo dormitório na qual a climatização somente pode ser acionada durante o período da noite.

Além disso, percebe-se que há uma redução aproximada de 50% entre o desconforto térmico no ambiente com as paredes de 12 e 20cm, e por outro lado uma redução aproximada de 40% entre as paredes de 20 e 30cm. Portanto, há uma significativa redução nas horas de desconforto do usuário dentro da edificação à medida que a espessura das paredes aumenta, fato que novamente ressalta o impacto que a espessura da parede tem no desempenho térmico do edifício.

Figura 21 - Histograma das horas de desconforto durante a ocupação. Fonte: Autoral.

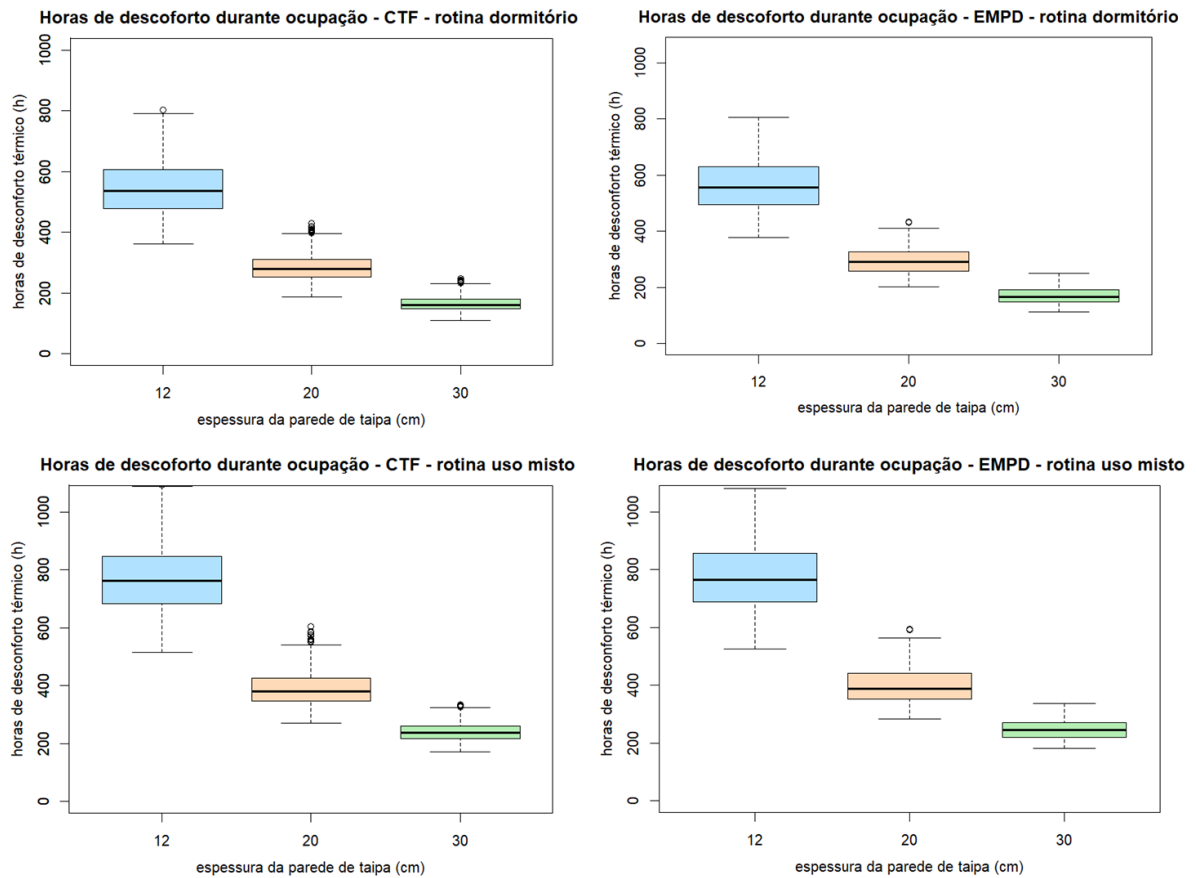


Tabela 14 – Valor médio e desvio padrão das horas de desconforto durante a ocupação. Fonte: Autoral.

| | Espessura (cm) | Método | Valor Médio (kWh) | Desvio Padrão | Coefficiente de Variação | Porcentagem de horas de desconforto térmico no ano |
|------------------------------------|----------------|--------|-------------------|---------------|--------------------------|--|
| Rotina de ocupação tipo dormitório | 12 | EMPD | 563,87 | 92,71 | 16,44% | 15,45% |
| | | CTF | 544,65 | 86,53 | 15,89% | 14,92% |
| | 20 | EMPD | 293,97 | 49,04 | 16,68% | 8,05% |
| | | CTF | 284,13 | 42,96 | 15,12% | 7,78% |
| | 30 | EMPD | 171,34 | 29,64 | 17,30% | 4,69% |
| | | CTF | 164,64 | 25,89 | 15,72% | 4,51% |
| Rotina de ocupação tipo uso misto | 12 | EMPD | 776,09 | 116,74 | 15,04% | 11,81% |
| | | CTF | 770,05 | 114,57 | 14,88% | 11,72% |
| | 20 | EMPD | 398,64 | 64,24 | 16,11% | 6,07% |
| | | CTF | 390,72 | 59,27 | 15,17% | 5,95% |
| | 30 | EMPD | 246,54 | 34,83 | 14,12% | 3,75% |
| | | CTF | 239,43 | 31,03 | 12,96% | 3,64% |

Um aspecto importante é com relação a influência do clima nos resultados observados. Em geral, a cidade de Campo Grande apresenta clima quente e seco, com temperaturas médias ao longo do ano variando entre 20 e 25°C (ver Figura 16). Por outro lado, as médias máximas chegam a atingir 38°C, mostrando a variação a qual os usuários estão sujeitos no decorrer do ano.

Logo, considerando que o intervalo de conforto térmico previsto pela NBR 16401-2 (2008) varia entre 22,5 e 25,5°C para umidade relativa de 65%, nota-se que as condições climáticas em Campo Grande podem frequentemente exceder esse intervalo, o que pode impactar no conforto térmico dos ocupantes. Porém, ao acionar o sistema de climatização considerando o *setpoint* estipulado, espera-se alcançar um equilíbrio entre o conforto dos usuários e o consumo de energia da edificação.

Neste contexto, destaca-se a importância de pesquisas similares a executada por Yu et al. (2022), na qual os autores determinaram a espessura ideal da taipa para uma região da China, considerando os fatores climáticos da região. Logo, sugere-se a execução de pesquisas semelhantes considerando as diferentes condições climáticas presentes no Brasil.

Outro ponto é que a variação das médias de horas de desconforto do usuário entre os métodos de simulação EMPD e CTF foram da ordem de 3%. Logo, considerando um nível de significância de 95%, verifica-se que não há diferença significativa entre os resultados obtidos pelos diferentes métodos de simulação termoenergética avaliados.

4.3 Análise estatística das simulações

A análise estatística foi especificamente aplicada aos cenários de simulação considerando a rotina de uso do tipo uso misto. Optou-se por seguir desta forma pois o foco foi avaliar a influência de cada propriedade higrotérmica nos indicadores da carga térmica para resfriamento e aquecimento e horas de desconforto. Logo, cenários simulados que abrangem uma amplitude maior de horas, possibilitam uma investigação mais minuciosa dos resultados alcançados.

4.3.1 - Análise de sensibilidade

4.3.1.1 - Valores médios das propriedades higrotérmicas da taipa

Na Tabela 15 estão os valores médios, desvio padrão e coeficiente de variação das propriedades higrotérmicas da taipa. Nota-se que não há diferença significativa entre os resultados obtidos para as diferentes espessuras das paredes. Isto ocorreu porque o intervalo de valores máximos e mínimos de cada propriedade foi previamente selecionado e é o mesmo para todos os cenários avaliados. Dessa forma, a variação nos valores obtidos é decorrente da seleção aleatória da base de dados, e a rotina de uso não influencia neste caso.

Evidencia-se que a espessura e o método de análise não afetam diretamente o valor intrínseco da propriedade do material. As características físicas e higrotérmicas da taipa são inerentes ao próprio material e, portanto, tendem a permanecer constantes independente de variações na geometria e nos métodos de avaliação.

Assim sendo, tendo em vista que o método CTF utilizou toda a base de dados nas simulações, enquanto o método EMPD utilizou uma amostra da base de dados, observa-se que o coeficiente de variação permanece constante entre os dois métodos de simulação, o que indica que a amostra selecionada para realização das análises estatísticas com o método EMPD foram consistentes.

Com relação aos valores médios das propriedades higrotérmicas da taipa, há uma diferença entre 2 e 3% entre os valores obtidos para o método EMPD e o método CTF. Tais diferenças estão associadas a seleção aleatória dos valores das propriedades durante as simulações, e não representam um argumento válido para diferenciar os métodos.

Tabela 15 - Valor médio e desvio padrão das propriedades higrotérmicas da taipa. Fonte: Autoral.

| | Espessura (cm) | Método | Valor Médio | Desvio Padrão | Coefficiente de Variação |
|--|---------------------------|---------------|------------------------|--------------------------|---|
| Calor Específico (W/m.K) | 12 | EMPD | 780,060 | 84,619 | 10,85% |
| | | CTF | 795,000 | 86,212 | 10,84% |
| | 20 | EMPD | 776,460 | 84,203 | 10,84% |
| | | CTF | 795,000 | 86,212 | 10,84% |
| | 30 | EMPD | 776,460 | 84,203 | 10,84% |
| | | CTF | 795,000 | 86,212 | 10,84% |
| Massa específica (kg/m³) | 12 | EMPD | 1786,724 | 289,349 | 16,19% |
| | | CTF | 1854,500 | 290,246 | 15,65% |
| | 20 | EMPD | 1793,156 | 278,077 | 15,51% |
| | | CTF | 1854,500 | 290,246 | 15,65% |
| | 30 | EMPD | 1793,156 | 278,077 | 15,51% |
| | | CTF | 1854,500 | 290,246 | 15,65% |
| Condutividade térmica (J/kg.K) | 12 | EMPD | 0,897 | 0,143 | 15,93% |
| | | CTF | 0,889 | 0,121 | 13,58% |
| | 20 | EMPD | 0,898 | 0,140 | 15,59% |
| | | CTF | 0,889 | 0,121 | 13,58% |
| | 30 | EMPD | 0,898 | 0,140 | 15,59% |
| | | CTF | 0,889 | 0,121 | 13,58% |
| Fator de resistência à difusão de vapor de água | 12 | EMPD | 13,380 | 1,871 | 13,98% |
| | 20 | | 13,526 | 1,872 | 13,84% |
| | 30 | | 13,526 | 1,872 | 13,84% |
| Coefficiente a | 12 | EMPD | 0,0093 | 0,0006 | 6,15% |
| | 20 | | 0,0093 | 0,0006 | 6,11% |
| | 30 | | 0,0093 | 0,0006 | 6,11% |
| Coefficiente b | 12 | EMPD | 5,2708 | 0,2967 | 5,63% |
| | 20 | | 5,2711 | 0,2901 | 5,50% |
| | 30 | | 5,2711 | 0,2901 | 5,50% |
| Coefficiente c | 12 | EMPD | 0,00359 | 0,00028 | 7,80% |
| | 20 | | 0,00358 | 0,00028 | 7,82% |
| | 30 | | 0,00358 | 0,00028 | 7,82% |
| Coefficiente d | 12 | EMPD | 0,2053 | 0,0142 | 6,90% |
| | 20 | | 0,2040 | 0,0143 | 7,02% |
| | 30 | | 0,2040 | 0,0143 | 7,02% |

4.3.1.2 – Coeficiente de correlação linear

Calculou-se os coeficientes de correlação linear entre os indicadores termoenergéticos e as propriedades higrotérmicas em cada um dos cenários avaliados. Esta abordagem permite obter uma visão panorâmica sobre quais propriedades exercem maior influência em cada indicador, além de avaliar o impacto da espessura da parede e do método de simulação.

Tendo em vista que o coeficiente de Pearson é calculado entre duas variáveis, foram realizados cálculos para todas as propriedades higrotérmicas em relação a cada indicador termoenergético - carga térmica de resfriamento, carga térmica de aquecimento e horas de desconforto térmico.

No caso das propriedades comuns aos dois métodos de simulação (calor específico, massa específica e condutividade térmica), os resultados são apresentados de forma separada para cada um dos indicadores termoenergéticos, respectivamente nas Tabela 16, Tabela 17 e Tabela 18. Já com relação às propriedades exclusivas do método EMPD (difusão ao vapor, coeficientes a, b, c, d), os resultados são apresentados de forma conjunta para todos os indicadores termoenergéticos na Tabela 19.

Tabela 16 – Coeficiente de correlação linear da carga térmica de resfriamento. Fonte: Autoral.

| | | Espessura (cm) | Calor Específico | Massa Específica | Condutividade Térmica |
|--------------------------------------|-------------|-----------------------|-------------------------|-------------------------|------------------------------|
| Carga Térmica de Resfriamento | EMPD | 12 | 0,20 | 0,30 | 0,89 |
| | | 20 | -0,27 | -0,41 | 0,85 |
| | | 30 | 0,48 | -0,32 | 0,80 |
| | CTF | 12 | 0,06 | 0,10 | 0,93 |
| | | 20 | -0,34 | -0,49 | 0,80 |
| | | 30 | -0,37 | -0,53 | 0,76 |

Tabela 17 - Coeficiente de correlação linear da carga térmica de aquecimento. Fonte: Autoral.

| | | Espessura (cm) | Calor Específico | Massa Específica | Condutividade Térmica |
|-------------------------------------|-------------|-----------------------|-------------------------|-------------------------|------------------------------|
| Carga Térmica de Aquecimento | EMPD | 12 | -0,35 | -0,55 | 0,74 |
| | | 20 | -0,29 | -0,47 | 0,81 |
| | | 30 | -0,42 | -0,26 | 0,86 |
| | CTF | 12 | -0,41 | -0,60 | 0,69 |
| | | 20 | -0,35 | -0,51 | 0,78 |
| | | 30 | -0,32 | -0,46 | 0,82 |

Tabela 18 - Coeficiente de correlação linear das horas de desconforto durante ocupação. Fonte: Autoral.

| | | Espessura (cm) | Calor Específico | Massa Específica | Condutividade Térmica |
|---------------------------------------|------|----------------|------------------|------------------|-----------------------|
| Horas de Desconforto durante Ocupação | EMPD | 12 | 0,60 | -0,66 | 0,34 |
| | | 20 | 0,73 | -0,54 | 0,94 |
| | | 30 | 0,40 | -0,25 | 0,98 |
| | CTF | 12 | 0,52 | -0,70 | 0,36 |
| | | 20 | 0,68 | -0,57 | 0,95 |
| | | 30 | 0,82 | -0,45 | 0,98 |

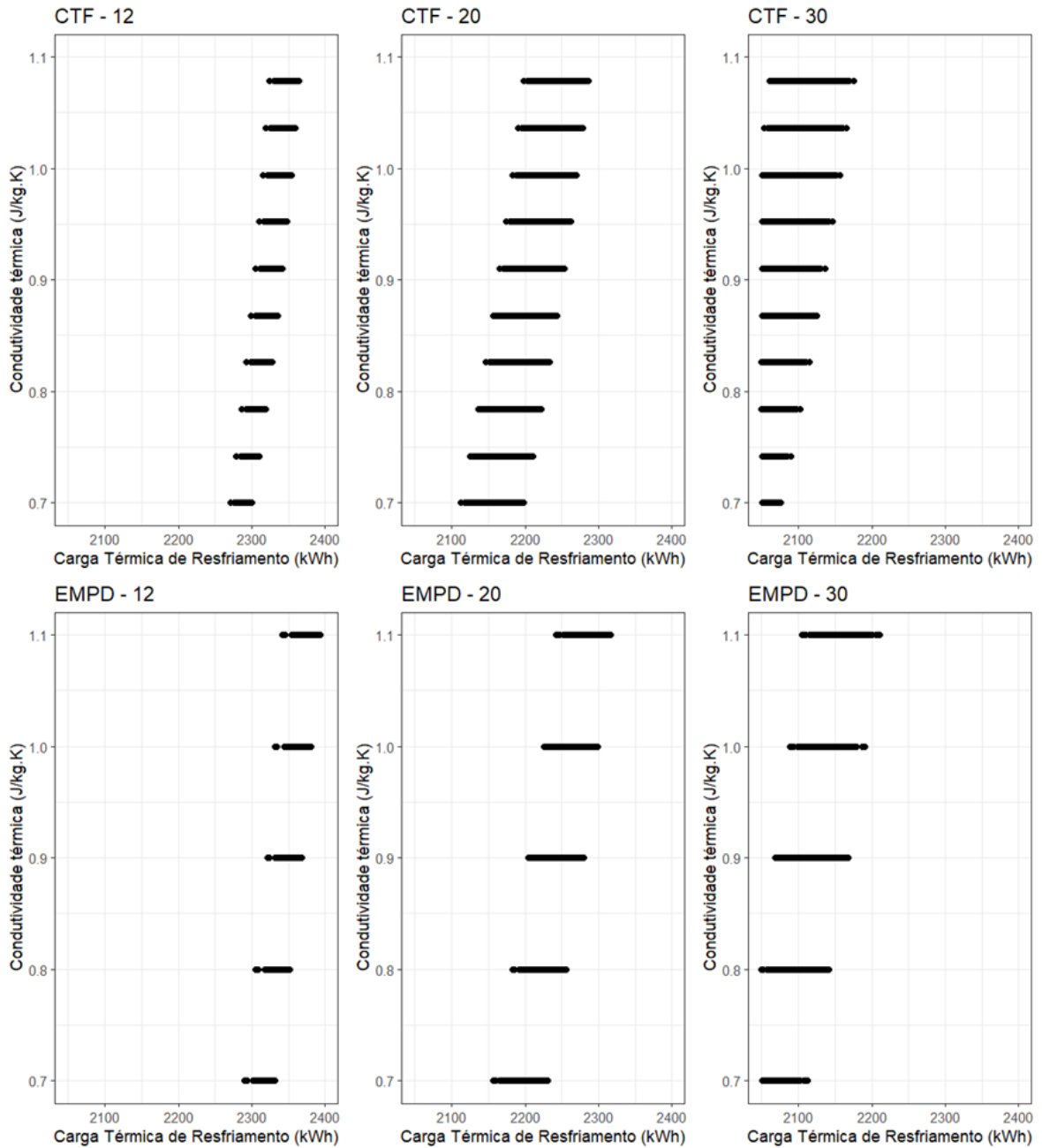
Tabela 19 – Coeficiente de correlação linear das variáveis exclusivas do método EMPD. Fonte: Autoral.

| | Espessura (cm) | Difusão ao vapor | Coeficiente a | Coeficiente b | Coeficiente c | Coeficiente d |
|---------------------------------------|----------------|------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Carga térmica de resfriamento | 12 | -0,05 | 0,04 | 0,01 | 0,04 | 0,07 |
| | 20 | -0,06 | 0,01 | 0,02 | 0,02 | 0,02 |
| | 30 | -0,05 | 0,01 | 0,03 | 0,02 | 0,01 |
| Carga térmica de aquecimento | 12 | -0,02 | 0,00 | 0,04 | 0,01 | 0,00 |
| | 20 | -0,02 | 0,01 | 0,04 | 0,02 | 0,01 |
| | 30 | -0,02 | 0,01 | 0,04 | 0,02 | 0,01 |
| Horas de desconforto durante ocupação | 12 | -0,01 | -0,02 | 0,04 | 0,01 | -0,01 |
| | 20 | -0,02 | 0,00 | 0,04 | 0,01 | -0,01 |
| | 30 | -0,02 | 0,01 | 0,04 | 0,02 | 0,00 |

Partindo da análise dos valores dos coeficientes de correlação linear por meio da interpretação proposta na Tabela 11, nota-se que a condutividade térmica é a propriedade higrotérmica com maior influência em todos os indicadores termoenergéticos, apresentando resultados moderados a muito fortes. O calor específico também apresenta destaque com coeficiente moderado para o indicador da carga térmica para resfriamento.

Dessa forma, gerou-se gráficos de dispersão dos seis cenários simulados para a condutividade térmica, considerando as diferentes espessuras da parede e métodos de simulação. Por meio da análise da Figura 22, observa-se uma tendência crescente, na qual à medida que se aumenta o valor da condutividade térmica, eleva-se também o valor do indicador de carga térmica de resfriamento. Este comportamento corrobora para observação de que há uma elevada correlação linear entre os indicadores e a condutividade térmica.

Figura 22 – Gráfico de dispersão da condutividade térmica em função da carga térmica de resfriamento. Fonte: Autoral



Outra análise interessante é que em praticamente todos os cenários a massa específica apresenta valores de coeficientes de Pearson negativos, que podem ser interpretados como uma relação inversamente proporcional. Dessa forma, em geral a massa específica apresenta uma correlação fraca a moderada com os indicadores avaliados, mas de forma inversamente proporcional, ou seja, quanto maior a massa específica, menor o valor dos indicadores termoenergéticos.

Entretanto, vale lembrar que a relação entre massa específica e desempenho térmico é multifacetada e pode variar dependendo de uma série de fatores, entre os quais a inércia térmica. Assim como explicado por Harries e Sharma (2020), a inércia térmica é uma propriedade que permite aos materiais “absorverem, armazenarem e posteriormente libertarem quantidades significativas de calor, contribuindo para a estabilização da temperatura interior”. Logo, materiais mais densos tendem a possuírem maior massa térmica e conseqüentemente maior inércia térmica, o que explica a correlação inversamente proporcional entre a massa específica e a demanda energética da edificação.

Outro ponto é que as propriedades do material solo diferem dos outros materiais da construção civil de classificação cerâmica porosa. Isso ocorre porque os sistemas construtivos que utilizam a terra crua, ou seja, o solo que não passou por tratamentos térmicos, possuem em sua composição os argilominerais com estrutura morfológica porosa, o que contribui para uma maior massa térmica em relação aos demais materiais de construção convencionais.

Com relação às propriedades higrótérmicas exclusivas do método EMPD, os resultados apresentados na Tabela 19 indicam que todos possuem correlação muito fraca com os indicadores termoenergéticos avaliados. Tal fato pode indicar que estas propriedades não exercem influência significativa nos resultados do comportamento higrótérmico da taipa, e conseqüentemente a ausência de diferença significativa entre os métodos de simulação CTF e EMPD.

4.3.1.3 – ANOVA

A análise de variância (ANOVA) é uma técnica estatística que permite determinar quais fatores exercem um impacto significativo sobre as variáveis de interesse. Neste estudo, os indicadores termoenergéticos foram considerados como a variável independente e comparados com as variáveis dependentes propriedades higrótérmicas da taipa. Adotou-se um nível de significância de 95% para todas as análises estatísticas realizadas. Além disso, destaca-se que o teste da ANOVA foi executado para cada um dos seis cenários avaliados, ou seja, considerando as espessuras de 12, 20 e 30cm e os métodos de simulação CTF e EMPD.

Um ponto importante é sobre os graus de liberdade entre grupos, que é diferente entre os métodos do CTF e EMPD, visto que os graus de liberdade refletem o número de categorias menos um. Dessa forma, no método CTF, onde são utilizadas

dez observações por parâmetro, os graus de liberdade são calculados como o número de categorias menos um. Portanto, para dez observações, isso resulta em nove graus de liberdade entre grupos. Já no método EMPD, que utiliza cinco observações por parâmetro, os graus de liberdade entre grupos são quatro. Esses valores refletem a distribuição adequada de graus de liberdade para análises estatísticas para cada distribuição de dados, conforme detalhado nas tabelas 20 a 25.

Com relação às paredes de 12cm, nota-se que as propriedades calor específico, massa específica e condutividade térmica, comum ao método EMPD (Tabela 20) e CTF (Tabela 21) foram todas consideradas significativas para explicar o modelo de simulação. Já com relação às propriedades exclusivas do método EMPD, os coeficientes a e b não se mostraram significativas no modelo de simulação.

Tabela 20 – ANOVA EMPD para parede de 12cm. Fonte: Autoral.

| | Graus de Liberdade | Soma dos Quadrados | Média dos Quadrados | F | p-valor | É significativo? |
|--|---------------------------|---------------------------|----------------------------|----------|----------------|-------------------------|
| Calor específico | 4 | 21843,0 | 5461,0 | 194,59 | < 2e-16 | sim |
| Massa específica | 4 | 72226,0 | 18057,0 | 643,46 | < 2e-16 | sim |
| Condutividade térmica | 4 | 417953,0 | 104488,0 | 3723,54 | < 2e-16 | sim |
| Fator de resistência à difusão de vapor de água | 4 | 1441,0 | 360,0 | 12,84 | 3,5E-10 | sim |
| Coeficiente a | 4 | 47,0 | 12,0 | 0,42 | 0,79 | não |
| Coeficiente b | 4 | 149,0 | 37,0 | 1,33 | 0,25 | não |
| Coeficiente c | 4 | 502,0 | 125,0 | 4,47 | 0,001 | sim |
| Coeficiente d | 4 | 782,0 | 195,0 | 6,96 | 1,6E-05 | sim |

Tabela 21 – ANOVA CTF para parede de 12cm. Fonte: Autoral.

| | Graus de Liberdade | Soma dos Quadrados | Média dos Quadrados | F | p-valor | É significativo? |
|------------------------------|---------------------------|---------------------------|----------------------------|----------|----------------|-------------------------|
| Calor específico | 9 | 1426653,0 | 158517,0 | 37442,0 | <2e-16 | sim |
| Massa específica | 9 | 3043966,0 | 338218,0 | 79888,0 | <2e-16 | sim |
| Condutividade térmica | 9 | 372164,0 | 41352,0 | 9767,0 | <2e-16 | sim |

Com relação às paredes de 20cm, nota-se que as propriedades calor específico, massa específica e condutividade térmica, comuns aos métodos EMPD (Tabela 22) e CTF (Tabela 23), foram todas consideradas significativas para explicar o modelo de simulação. Já com relação às propriedades exclusivas do método EMPD, o coeficiente a é o único não-significativo para explicar o modelo.

Tabela 22 – ANOVA EMPD para parede de 20cm. Fonte: Autoral.

| | Graus de Liberdade | Soma dos Quadrados | Média dos Quadrados | F | p-valor | É significativo? |
|--|---------------------------|---------------------------|----------------------------|----------|----------------|-------------------------|
| Calor específico | 4 | 94334,0 | 23583,0 | 3074,69 | < 2e-16 | sim |
| Massa específica | 4 | 214732,0 | 53683,0 | 6998,93 | < 2e-16 | sim |
| Condutividade térmica | 4 | 928813,0 | 232203,0 | 30273,55 | < 2e-16 | sim |
| Fator de resistência à difusão de vapor de água | 4 | 2076,0 | 519,0 | 67,65 | < 2e-16 | sim |
| Coeficiente a | 4 | 71,0 | 18,0 | 2,30 | 0,06 | não |
| Coeficiente b | 4 | 508,0 | 127,0 | 16,54 | 4,1E-13 | sim |
| Coeficiente c | 4 | 194,0 | 48,0 | 6,31 | 5,1E-05 | sim |
| Coeficiente d | 4 | 235,0 | 59,0 | 7,65 | 4,5E-06 | sim |

Tabela 23 – ANOVA CTF para parede de 20cm. Fonte: Autoral.

| | Graus de Liberdade | Soma dos Quadrados | Média dos Quadrados | F | p-valor | É significativo? |
|------------------------------|---------------------------|---------------------------|----------------------------|----------|----------------|-------------------------|
| Calor específico | 9 | 729187,0 | 81021,0 | 2168,9 | < 2e-16 | sim |
| Massa específica | 9 | 1589104,0 | 176567,0 | 4726,7 | < 2e-16 | sim |
| Condutividade térmica | 9 | 145079,0 | 16120,0 | 431,5 | < 2e-16 | sim |

Com relação às paredes de 30cm, nota-se que as propriedades calor específico, massa específica e condutividade térmica, comuns aos métodos EMPD (Tabela 24) e CTF (Tabela 25) foram todas consideradas significativas para explicar o modelo de simulação. Já com relação às propriedades exclusivas do método EMPD, o coeficiente d foi a única propriedade classificada como não significativa ao modelo.

Tabela 24 – ANOVA EMPD para parede de 30cm. Fonte: Autoral.

| | Graus de Liberdade | Soma dos Quadrados | Média dos Quadrados | F | p-valor | É significativo? |
|--|---------------------------|---------------------------|----------------------------|----------|----------------|-------------------------|
| Calor específico | 4 | 99647,0 | 249237,0 | 75393,22 | < 2e-16 | sim |
| Massa específica | 4 | 192416,0 | 48104,0 | 14551,28 | < 2e-16 | sim |
| Condutividade térmica | 4 | 349355,0 | 87339,0 | 26419,69 | < 2e-16 | sim |
| Fator de resistência à difusão de vapor de água | 4 | 1910,0 | 478,0 | 144,46 | < 2e-16 | sim |
| Coeficiente a | 4 | 194,0 | 49,0 | 14,68 | 1,2E-11 | sim |
| Coeficiente b | 4 | 626,0 | 157,0 | 47,37 | < 2e-16 | sim |
| Coeficiente c | 4 | 55,0 | 14,0 | 4,13 | 0,003 | sim |
| Coeficiente d | 4 | 26,0 | 6,0 | 1,94 | 0,101 | não |

Tabela 25 – ANOVA CTF para parede de 30cm. Fonte: Autoral.

| | Graus de Liberdade | Soma dos Quadrados | Média dos Quadrados | F | p-valor | É significativo? |
|------------------------------|---------------------------|---------------------------|----------------------------|----------|----------------|-------------------------|
| Calor específico | 9 | 37035,0 | 4115,0 | 76,53 | < 2e-16 | sim |
| Massa específica | 9 | 90741,0 | 10082,0 | 187,52 | < 2e-16 | sim |
| Condutividade térmica | 9 | 40113,0 | 4457,0 | 82,90 | < 2e-16 | sim |

Resumidamente, observou-se que em todos os cenários as propriedades térmicas de calor específico, massa específica e condutividade térmica são significativas para o modelo de simulação. Com relação às propriedades higrótérmicas exclusivas do método EMPD, o fator de resistência à difusão de vapor de água foi influente em todos os cenários, mas no caso dos coeficientes do material, não houve um consenso. Portanto, nota-se que alguns fatores são influentes em determinadas espessuras e outros não.

Dessa forma, entende-se que as propriedades físicas intrínsecas do material são todas significativas para avaliar os modelos. Contudo, com relação aos coeficientes do material, que são dados necessários para simulação no *EnergyPlus* com o método EMPD, é possível utilizar valores aproximados sem perdas significativas nas análises do modelo. Ou seja, no caso da taipa, que não possui valores fixos dos coeficientes nas tabelas de Kerestecioglu et al. (1988), é possível adotar valores de um material similar sem variações significativas no modelo de simulação, no caso, pode-se adotar os coeficientes disponibilizados pelos autores para tijolos de barro.

4.3.2 - Análise de incerteza

Para a análise de incerteza dos resultados, dividiu-se o estudo em duas partes. A primeira é referente ao intervalo de confiança dos três indicadores, associado com os gráficos de densidade de ocorrência. Na segunda parte, focou-se na avaliação do intervalo de confiança das propriedades higrotérmicas da taipa e apresenta-se sugestões de diretrizes de projeto para aplicação dos resultados.

4.3.2.1 – Intervalo dos indicadores e densidade de ocorrência

Em uma primeira análise, a base de dados original foi mantida, separada pelo método de simulação e pelas espessuras da taipa. Então, calculou-se o intervalo de confiança dos indicadores termoenergéticos de carga térmica para resfriamento e aquecimento, além das horas de desconforto por ocupação, com 95% de confiança. O objetivo foi analisar se há diferença significativa entre os valores máximos e mínimos desses indicadores, assim como entre os intervalos.

Na sequência, foram gerados gráficos de densidade de frequência para cada um dos indicadores. Esta técnica estatística é amplamente empregada para investigar a distribuição de frequência de uma variável em um conjunto de dados. De acordo com Bruce e Bruce (2019), essa abordagem é fundamental para compreender com que frequência diferentes valores ocorrem em uma amostra ou população, permitindo a identificação de padrões e tendências nos dados.

Dessa forma, foram criados gráficos de frequência de ocorrência para cada um dos três indicadores termoenergéticos, considerando os seis cenários para cada um deles. Ou seja, foram simuladas três espessuras de parede de taipa utilizando os

métodos EMPD e CTF. Portanto, cada indicador possui seis gráficos de densidade de ocorrência, permitindo análises individuais sobre o comportamento da base de dados e seus diferentes aspectos.

Neste contexto, segue uma análise conjunta do intervalo de confiança e dos gráficos de frequência de ocorrência para um dos parâmetros, a fim de facilitar a apresentação dos dados e discussão.

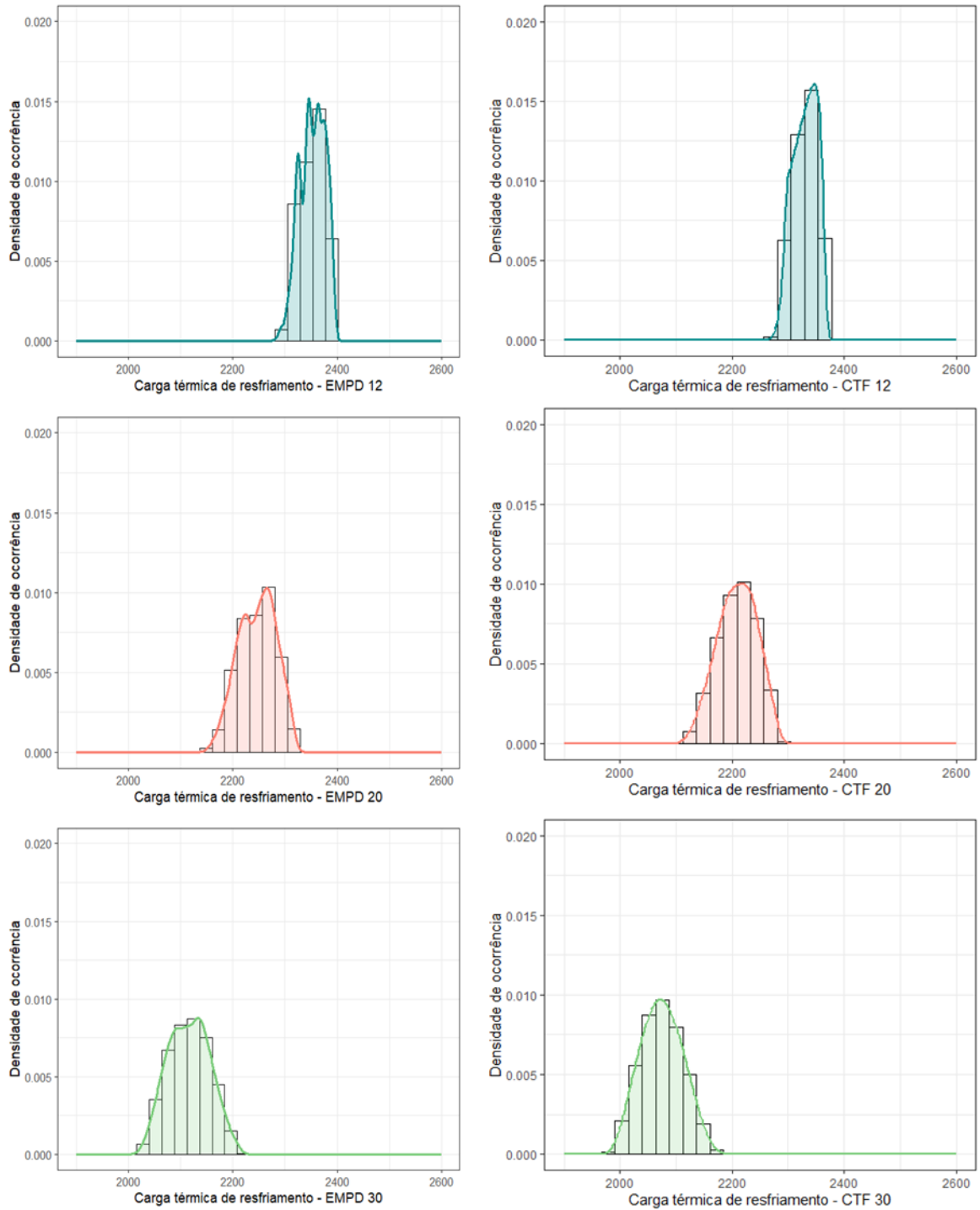
Com relação ao indicador da carga térmica de resfriamento, a Tabela 26 apresenta os resultados para as diferentes espessuras da parede. Nota-se que a diferença em percentual obtida para os intervalos de confiança dos métodos de simulação EMPD e CTF é inferior a 2% em todas as espessuras. Dessa forma, não há diferença significativa entre os resultados, e afirma-se que é possível utilizar o método simplificado do CTF para obter resultados de simulação satisfatórios em construções com terra.

Referente a análise da densidade de ocorrência para o indicador da carga térmica de resfriamento, os gráficos estão expostos na Figura 23. Assim sendo, é possível notar que as curvas normais dos dados são similares entre os métodos EMPD e CTF, porém com pequenas variações decorrentes da espessura das paredes. Observa-se que com o aumento da espessura da parede ocorre um deslocamento horizontal na curva, ou seja, um menor consumo energético para resfriamento. Além disso, nota-se um amortecimento das curvas no eixo da ordenadas, o que indica uma menor frequência de ocorrência de dados.

Tabela 26 – Intervalo de confiança da carga térmica de resfriamento. Fonte: Autoral.

| Variável | Espessura (m) | Método | Valor mínimo | Intervalo de Confiança (95%) | | Valor máximo |
|-------------------------------------|---------------|--------|--------------|------------------------------|----------|--------------|
| | | | | Inferior | Superior | |
| Carga térmica de resfriamento (kWh) | 12 | EMPD | 2289,42 | 2350,37 | 2354,48 | 2392,58 |
| | | CTF | 2271,18 | 2328,19 | 2331,64 | 2364,03 |
| | 20 | EMPD | 2156,91 | 2243,82 | 2249,58 | 2316,53 |
| | | CTF | 2112,96 | 2206,06 | 2211,79 | 2285,56 |
| | 30 | EMPD | 2027,55 | 2112,73 | 2119,15 | 2210,13 |
| | | CTF | 1985,79 | 2071,72 | 2077,78 | 2175,05 |

Figura 23 - Densidade de ocorrência da carga térmica de resfriamento (kWh). Fonte: Autoral.



Com relação ao indicador da carga térmica para aquecimento, a Tabela 27 apresenta os resultados do intervalo de confiança para as diferentes espessuras da parede. Assim como no caso da carga térmica para resfriamento, a diferença em percentual obtida para os intervalos de confiança dos métodos EMPD e CTF é inferior a 2%. Logo, para este indicador também não há diferença significativa entre os métodos de simulação.

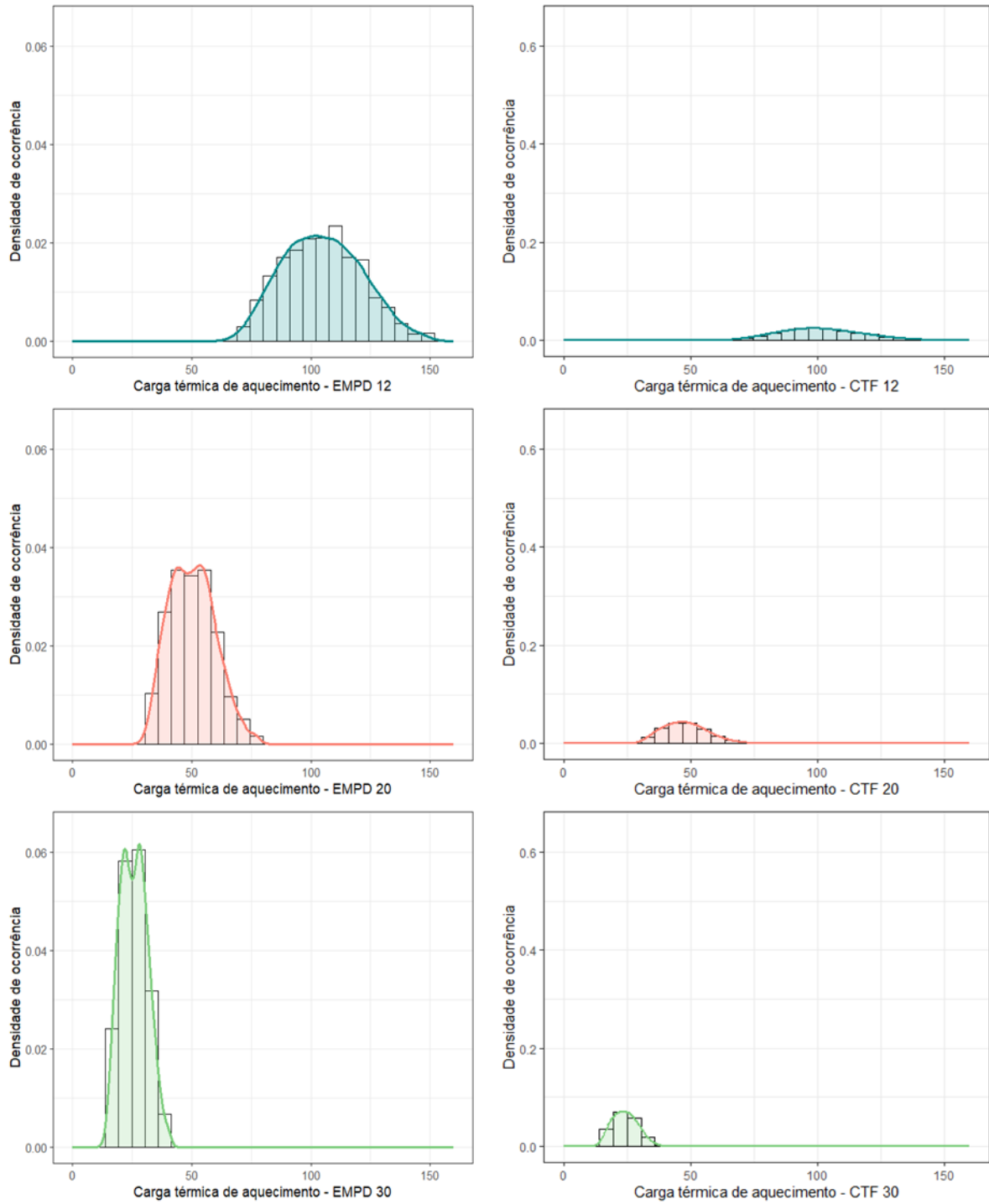
Referente a análise da densidade de ocorrência para o indicador da carga térmica para aquecimento, representada na Figura 24, observa-se que embora a posição no eixo das abcissas seja similar entre os métodos EMPD e CTF, a densidade de ocorrência é significativamente diferente. Ou seja, considerando o caso da parede de 12cm, embora para ambos os métodos o centro da curva seja em torno de 100kWh, para o método de simulação EMPD a densidade de ocorrência é aproximadamente 0,2 enquanto para o método de simulação CTF é inferior a 0,05.

Dessa forma, uma afirmação possível é que existe uma disparidade na frequência de ocorrência de horas que exigem aquecimento artificial ao utilizar os métodos de simulação EMPD ou CTF. Uma das razões para essa disparidade é que esse indicador possui a menor quantidade de dados diferentes de zero na base de dados, já que a necessidade de aquecimento artificial na cidade de Campo Grande é rara. Ou seja, o tamanho da base de dados pode ter influenciado esse resultado.

Tabela 27 - Intervalo de confiança da carga térmica de aquecimento. Fonte: Autoral.

| Variável | Espessura (m) | Método | Valor mínimo | Intervalo de Confiança (95%) | | Valor máximo |
|------------------------------------|---------------|--------|--------------|------------------------------|----------|--------------|
| | | | | Inferior | Superior | |
| Carga térmica de aquecimento (kWh) | 12 | EMPD | 69,28 | 103,61 | 106,28 | 147,04 |
| | | CTF | 65,54 | 99,81 | 102,32 | 145,82 |
| | 20 | EMPD | 31,39 | 49,45 | 51,01 | 76,54 |
| | | CTF | 29,47 | 46,91 | 48,29 | 74,67 |
| | 30 | EMPD | 14,34 | 25,23 | 26,15 | 40,27 |
| | | CTF | 13,03 | 23,62 | 24,42 | 38,77 |

Figura 24 - Densidade de ocorrência carga térmica de aquecimento (kWh). Fonte: Autoral.



Com relação ao indicador das horas de desconforto durante a ocupação, a Tabela 28 apresenta os resultados do intervalo de confiança do indicador considerando-se as diferentes espessuras da parede. Neste caso, a diferença percentual entre os valores obtidos pelo método EMPD e CTF é inferior a 3%, porém continua sendo uma diferença não significativa estatisticamente. Pois, considerando um nível de significância de 95%, qualquer variação inferior a 5% pode ser considerada não significativa.

Dessa forma, corrobora-se que para os três indicadores termoenergéticos avaliados neste trabalho é possível utilizar para simulação termoenergética o método CTF sem perdas significativas com relação ao método EMPD. Mesmo que a construção com taipa seja um sistema construtivo higroscópico e que de acordo com Losini et al. (2023b) seja necessário considerar o impacto das variações da umidade relativa ao estudar a taipa, para edificações localizadas na zona bioclimática 6 é possível considerar somente o método simplificado do CTF para simulações termoenergéticas.

Outro aspecto a ser observado dentro dos indicadores termoenergéticos é que de modo geral a parede de 30cm demonstra um melhor desempenho energético e conforto térmico ao usuário. Isso se deve principalmente à elevada massa térmica da taipa, que funciona como um "amortecedor térmico", estabilizando a temperatura interna do ambiente e diminuindo a dependência de sistemas de climatização artificial para alcançar essa performance térmica.

Tabela 28 - Intervalo de confiança das horas de desconforto durante a ocupação. Fonte: Autoral.

| Variável | Espessura (m) | Método | Valor mínimo | Intervalo de Confiança (95%) | | Valor máximo |
|---|---------------|--------|--------------|------------------------------|----------|--------------|
| | | | | Inferior | Superior | |
| Horas de desconforto térmico durante a ocupação (kWh) | 12 | EMPD | 525,83 | 766,57 | 785,62 | 1080,00 |
| | | CTF | 514,00 | 760,69 | 779,40 | 1112,33 |
| | 20 | EMPD | 283,33 | 393,41 | 403,88 | 594,33 |
| | | CTF | 270,17 | 385,89 | 395,56 | 603,83 |
| | 30 | EMPD | 180,67 | 243,69 | 249,38 | 337,33 |
| | | CTF | 171,83 | 236,91 | 241,96 | 334,67 |

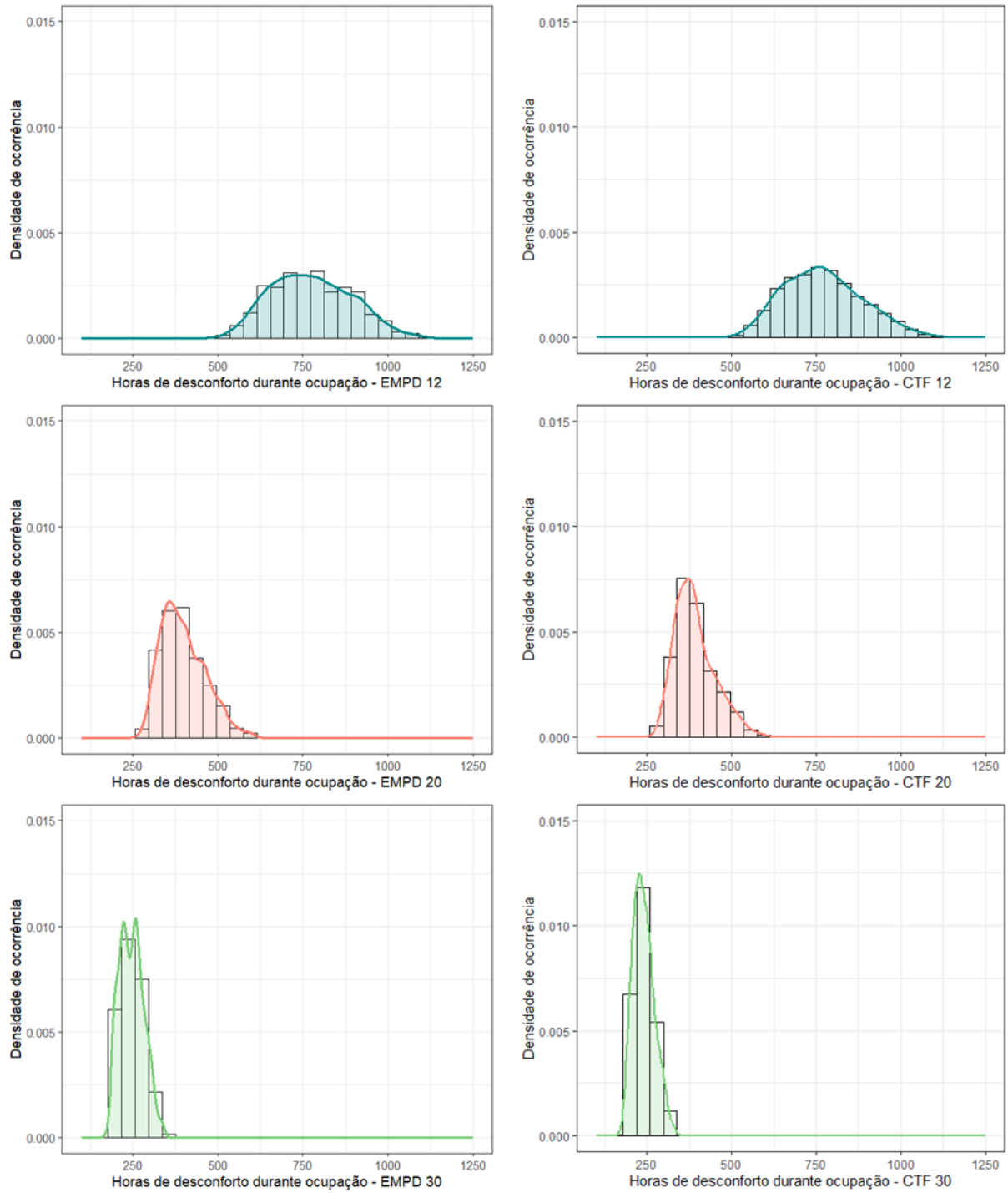
Segundo Ávila, Puertas e Gallego (2021) ao estudar o sistema construtivo taipa, a espessura da parede é uma variável tão importante quanto as propriedades físicas do sistema construtivo. Neste contexto, Serrano et al. (2017) defendem que embora maiores espessuras apresentem melhor desempenho, acabam acarretando algumas desvantagens, como maior custo para execução técnica e perda do espaço interno do ambiente construído.

Porém, uma possível solução para otimizar a espessura da parede de taipa com o custo e desempenho energético é proposta no estudo de Yu et al. (2022). Os autores se propuseram a fazer um estudo de diferentes configurações de parede de taipa, variando a espessura e incorporando uma camada isolante, com o intuito de identificar o cenário mais favorável para a cidade de Pequim. Sugere-se, portanto, futuras pesquisas nesse sentido no Brasil, visando encontrar o sistema construtivo ideal de construções com taipa para as diferentes zonas bioclimáticas do país.

Por fim, o gráfico de densidade de ocorrência do indicador de horas de desconforto durante a ocupação está representado na Figura 25. Os resultados são semelhantes aos do indicador de carga térmica para resfriamento, isto é, o formato da curva é similar entre os métodos de simulação EMPD e CTF, mas com pequenas variações nas diferentes espessuras da parede. Porém, nota-se uma intensificação da densidade de ocorrência à medida que a espessura da parede aumenta.

Em suma, a análise de densidade de frequência é uma outra forma de visualizar os dados expostos anteriormente por meio das tabelas e histogramas de valores médios. Esta análise gráfica facilitou a visualização da influência da espessura da parede de taipa no desempenho térmico das edificações. Ou seja, evidenciou os benefícios de paredes mais espessas para reduzir o consumo energético para resfriamento e aquecimento e também aumentar o conforto térmico dos ocupantes.

Figura 25 - Densidade de ocorrência horas de desconforto (h). Fonte: Autoral.



4.3.2.2 – Intervalo de confiança das variáveis e diretrizes de projeto

A determinação do intervalo de confiança proporciona uma estimativa da variabilidade das propriedades térmicas, fornecendo uma base sólida para a tomada de decisões na etapa de projeto e contribuindo para o avanço do conhecimento científico no campo da ciência dos materiais. Dessa forma, esta seção apresenta o intervalo com 95% de confiança para as propriedades higrotérmicas da taipa de pilão.

Ressalta-se que neste trabalho um dos objetivos é a parametrização das propriedades higrotérmicas, logo, optou-se pela determinação de um intervalo de confiança por meio de um intervalo de valores máximo e mínimo previamente fixados. Além disso, vale lembrar que as propriedades higrotérmicas abordadas neste trabalho são inerentes ao material, logo, não dependem da espessura da parede.

Portanto, para esta análise, toda a base de dados foi utilizada, ou seja, uniu-se a base de dados das espessuras de 12, 20 e 30cm. Logo, ao considerar os dados de todas as espessuras de parede, foi possível obter uma avaliação abrangente e precisa das características do sistema construtivo da taipa.

Tabela 29 – Parametrização das propriedades higrotérmicas da taipa. Fonte: Autoral.

| Variável | Método | Valor mínimo | Intervalo de Confiança (95%) | | Valor máximo |
|--|--------|--------------|------------------------------|----------|--------------|
| | | | Inferior | Superior | |
| Calor específico (W/m.K) | EMPD | 650,0 | 748,19 | 780,42 | 950,0 |
| | CTF | | 737,43 | 799,06 | |
| Massa específica (kg/m³) | EMPD | 1400,0 | 1780,08 | 1999,82 | 2400,0 |
| | CTF | | 1840,85 | 2025,14 | |
| Condutividade térmica (J/kg.K) | EMPD | 0,70 | 0,88 | 0,91 | 1,10 |
| | CTF | | 0,88 | 0,93 | |
| Fator de resistência à difusão de vapor de água | EMPD | 11,50 | 13,2 | 13,6 | 16,00 |
| Coeficiente a | EMPD | 0,00850 | 0,00928 | 0,00935 | 0,01040 |
| Coeficiente b | EMPD | 4,85 | 5,26 | 5,36 | 5,95 |
| Coeficiente c | EMPD | 0,0032 | 0,0035 | 0,0036 | 0,0040 |
| Coeficiente d | EMPD | 0,185 | 0,203 | 0,205 | 0,225 |

Assim sendo, os resultados expostos na Tabela 29 apresentam os valores máximos e mínimos adotados para as propriedades higrotérmicas da taipa, bem como o intervalo de confiança estimado superior e inferior, com um nível de confiança de 95%. A partir da análise destes valores, conclui-se que todos seguem uma distribuição normal e que não há diferença significativa entre os intervalos parametrizados pelos métodos de simulação EMPD e CTF.

A partir dos intervalos de confiança obtidos para as diferentes propriedades higrotérmicas da taipa, é possível relacionar com os valores disponíveis em normas nacionais vigentes. Dessa forma, estão representados na Tabela 30 os seguintes pontos: o comparativo das propriedades higrotérmicas entre os valores máximo e mínimo obtidos por meio da revisão bibliográfica, os intervalos de confiança estimados nesta parametrização, e os valores disponíveis na norma de Desempenho de edificações - NBR 15220-2 (2005), e na norma específica do sistema construtivo Taipa de pilão - NBR 17014 (2022).

Tabela 30 – Comparativo entre os valores das propriedades higrotérmicas parametrizadas e normatizadas. Fonte: Autoral.

| | Referência | Valor |
|--|------------------------------------|--------------|
| Massa específica (kg/m³) | Valores máximo e mínimo de revisão | 1400 - 2400 |
| | Intervalo de confiança estimado | 1780 - 2025 |
| | NBR 15220-2 (2005) | 1500 |
| | NBR 17014 (2022) | 1750 - 2200 |
| Condutividade térmica (W/m.K) | Valores máximo e mínimo de revisão | 0,7 – 1,1 |
| | Intervalo de confiança estimado | 0,88 - 0,93 |
| | NBR 15220-2 (2005) | 0,30 |
| | NBR 17014 (2022) | 0,35 – 1,1 |

A Tabela 30 apresenta somente as propriedades de massa específica e condutividade térmica, pois são as únicas propriedades higrotérmicas disponíveis nas normas citadas. Observa-se que a norma da taipa, a NBR 17014 (2022) apresenta intervalos de valores que englobam o intervalo estimado nesta pesquisa. Desta forma, corrobora-se que os resultados obtidos estão dentro da faixa de valores esperados, logo, que condizem com a normativa brasileira. Portanto, é válido utilizar os intervalos estimados para as propriedades higrotérmicas da taipa.

Evidencia-se que o resultado obtido para os intervalos de confiança são uma contribuição estatística para facilitar o uso da taipa de pilão em projetos nos quais não é viável a execução de ensaios laboratoriais para determinar as propriedades higrotérmicas específicas. Logo, cumpre-se o objetivo de disponibilizar uma estimativa para as propriedades higrotérmicas da taipa, mas com o adendo que sempre que possível o ideal é determinar as propriedades higrotérmicas reais da edificação. Visto que, de acordo com Fernandes et al. (2019), são necessários mais estudos sobre o real desempenho térmico da taipa.

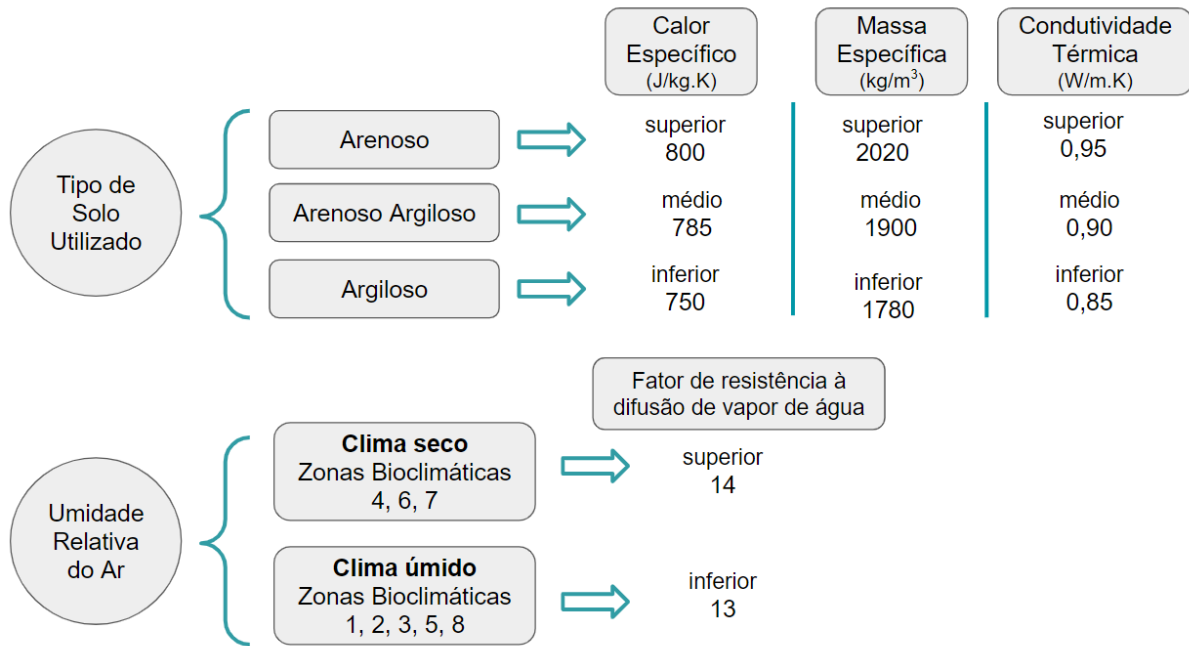
Um aspecto importante é sobre a variabilidade da composição da terra utilizada na execução das paredes de taipa e sua influência no valor das propriedades higrotérmicas. Isto é, a composição mineralógica do solo apresenta grande influência nas propriedades térmicas do elemento construtivo. De acordo com Zhang et al. (2017), o quartzo (principal mineral da areia) possui uma alta condutividade térmica em comparação com os outros minerais presentes no solo, logo, a presença de quartzo em solos arenosos influencia diretamente no valor final das propriedades higrotérmicas dos sistemas construtivos que utilizarem este tipo de material.

Dessa forma, recomenda-se que ao utilizar solo com maior predominância de areia em sua composição, opte-se por valores mais próximos ao intervalo máximo para as propriedades de massa específica, calor específico e condutividade térmica.

Outro aspecto é sobre a influência do clima no qual a edificação avaliada está inserida, pois assim como exposto na Tabela 9, a permeabilidade ao vapor da água da taipa é calculado com base na umidade relativa do ar. Quanto maior a umidade relativa do ar, menor a permeabilidade ao vapor da água da taipa. Desta forma, tendo em vista a relação inversamente proporcional entre o fator de resistência à difusão de vapor de água e permeabilidade ao vapor da água (ver Equação 1), recomenda-se que em clima mais úmido, opte-se pelo valor mais próximos ao intervalo máximo da propriedade fator de resistência à difusão de vapor de água da taipa.

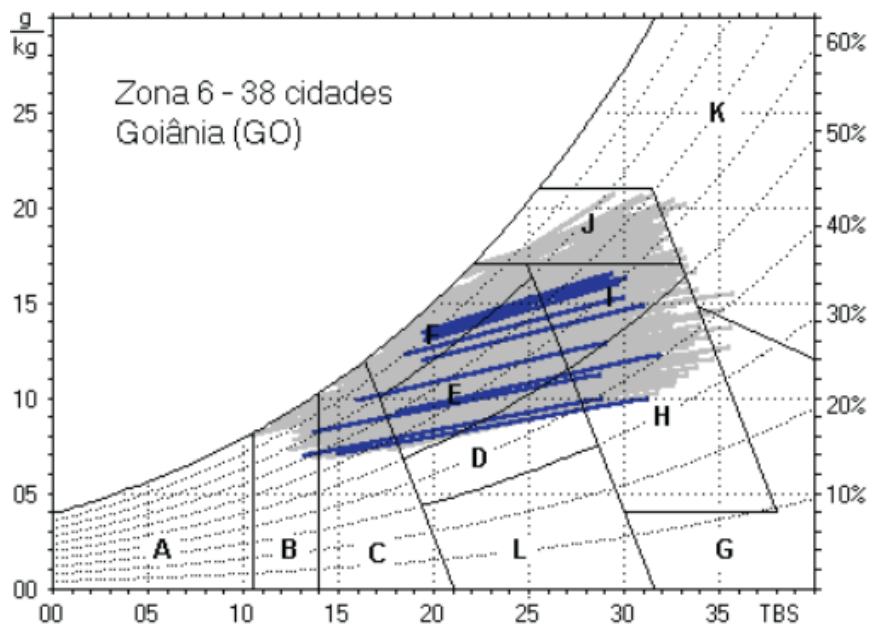
Neste contexto, gerou-se um diagrama resumindo as recomendações dos valores das propriedades higrotérmicas a serem adotados em diferentes situações, ou seja, diretrizes de projeto. Assim como exposto acima, os dois principais fatores que impactam no momento de selecionar o valor máximo ou mínimo do intervalo de confiança são o tipo de solo utilizado na taipa e o clima no qual a edificação está inserida. Portanto, a Figura 26 apresenta um resumo dos valores sugeridos para cada cenário a fim de facilitar a utilização das propriedades da taipa em futuros projetos.

Figura 26 – Diretrizes de projeto: intervalo de confiança das propriedades higrotérmicas da taipa.
 Fonte: Autoral



Em relação aos tipos de solos, adotou-se a classificação proposta por Neves et al. (2009), que varia granulometricamente entre areia, argila, silte e suas diversas combinações intermediárias. Foram selecionados os tipos arenoso, areno-argiloso e argiloso por representarem os solos mais adequados para a execução da taipa.

Figura 27 – Carta psicrométrica da zona bioclimática 6. Fonte: NBR 15220-3 (2005)



Já com relação à classificação entre clima úmido ou seco, adotou-se como base as cartas psicrométricas de cada zona, propostas pela NBR 15220-3 (2005). Tem-se como exemplo a da zona bioclimática 6, exposta na Figura 27. Classificou-se como clima seco as zonas nas quais as médias anuais (linhas azuis na carta psicrométrica) possuam umidade relativa inferior a 40%, como também necessitam de estratégias de condicionamento térmico passivo característicos de climas secos, ou seja, que possuam recomendação de estratégia passiva D, G, H ou L, que de acordo com a norma significam respectivamente:

- D: uso de ventilação natural para resfriamento;
- G: uso de sombreamento para reduzir a carga térmica;
- H: uso de isolamento térmico para manter a temperatura interna;
- L: uso de massa térmica para estabilidade térmica.

Como exemplo, temos a carta psicrométrica da cidade de Campo Grande, representada na Figura 27. Nota-se que em alguns períodos do ano a média da umidade relativa do ar fica abaixo de 40%, o que é indicado pelas linhas curvas que interceptam o gráfico. Além disso, para essa zona, são recomendadas as estratégias passivas D e H, que, de acordo com a norma NBR 15220-3 (2005), são adequadas para períodos de baixa umidade.

Os intervalos de confiança e diretrizes de projeto estabelecidos nesta pesquisa representam uma contribuição significativa para o estudo e compreensão da taipa de pilão, visto que oferece uma base sólida das propriedades higrotérmicas deste sistema construtivo. Embora fundamentados em uma revisão bibliográfica abrangente, ressalta-se a necessidade de validação experimental específica para cada contexto de projeto. Esta abordagem não apenas assegura a precisão dos valores das propriedades, mas também promove avanços na compreensão do desempenho térmico da taipa em condições reais de uso.

5 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

No setor da construção civil, há uma crescente demanda por métodos construtivos sustentáveis, o que tem levado à redescoberta e valorização de técnicas tradicionais. Entre elas, a taipa tem ganhado destaque, especialmente devido ao seu impacto positivo tanto do ponto de vista social quanto ambiental.

Nesse contexto, compreender as propriedades higrotérmicas da taipa é de suma importância, visto que este estudo possibilita uma análise mais abrangente do desempenho energético das construções com terra, utilizando diferentes processos de simulações computacionais. Portanto, é possível melhorar o conforto térmico dos usuários e a eficiência energética das edificações ao longo de sua vida útil, além de contribuir para a escolha de materiais e técnicas construtivas que melhor se alinhem aos princípios de sustentabilidade.

Assim sendo, um dos principais resultados obtidos neste estudo foi a constatação de que não há diferença significativa entre os métodos de simulação termoenergética EMPD e CTF. Portanto, conclui-se que para as edificações localizadas na zona bioclimática 6 (clima quente e seco), é possível considerar exclusivamente o método simplificado do CTF para simulações termoenergéticas em edificações com taipa de pilão. Dessa forma, o processo de simulação pode ser simplificado, permitindo uma abordagem mais eficiente na avaliação do desempenho energético das construções com terra.

Outro ponto importante foi a identificação do impacto significativo da rotina de ocupação do edifício no desempenho energético, destacando a importância de considerar, além das características da construção, também os padrões de uso e ocupação ao longo do tempo. Logo, ressalta-se a necessidade de uma abordagem holística na avaliação do desempenho energético das edificações, levando em consideração tanto os aspectos físicos da construção quanto os padrões de uso e ocupação dos usuários.

Além disso, destaca-se a influência da espessura da parede de taipa nos resultados finais dos indicadores termoenergéticos carga térmica para resfriamento e aquecimento e horas de desconforto térmico. Corrobora-se que quanto mais espessa a parede, maior o conforto do usuário e menor o consumo energético da edificação. Porém, ressalta-se que paredes espessas acarretam em desvantagens como a perda

do espaço interno e maior investimento inicial para construção, logo, é preciso definir um equilíbrio entre as vantagens e viabilidade técnica para construção com taipa.

Uma consideração importante sobre o método EMPD é com relação a possibilidade de adotar os coeficientes do tijolo de barro para construções com taipa no *EnergyPlus* sem perdas significativas para o modelo. Isso simplifica o processo de modelagem e simulação, oferecendo uma abordagem mais prática e eficiente para profissionais envolvidos no projeto e construção de edificações com terra.

Destaca-se também a definição de um intervalo de confiança para os valores das propriedades higrotérmicas da taipa, o que representa um avanço na padronização das especificidades e incentivo na replicabilidade de sistemas construtivos com terra na construção civil.

Porém, ressalta-se a necessidade da realização de mais pesquisas que executem ensaios sobre as propriedades higrotérmicas da taipa, a fim de expandir a base de dados e melhorar a precisão do intervalo de confiança das propriedades. Assim sendo, sugere-se a realização de novas pesquisas que envolvam a determinação empírica das propriedades higrotérmicas da taipa.

Também como sugestão para trabalhos futuros, propõe-se pesquisas que comparem os resultados termoenergéticos da simulação com paredes de taipa considerando o método CTF, EMPD e HAMT em zonas bioclimáticas que englobam climas quentes e úmidos, nos quais espera-se que haja uma diferença significativa entre os métodos de simulação.

Além disso, sugere-se a realização de estudos para determinar a espessura ideal das paredes de taipa em diferentes climas do Brasil, especialmente em regiões quentes e secas, bem como em áreas quentes e úmidas. O objetivo é reduzir o consumo energético das edificações através da adoção de espessuras otimizadas no projeto. Um aspecto relevante a ser considerado é a análise das expectativas de climas futuros, pois compreender esses padrões climáticos é essencial para projetar edifícios e cidades mais resilientes.

6 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AFONSO, M. I. A. S. P. **Simulação higrotérmica de edifícios**: aplicação do EMPD no cálculo da humidade interior. 2011. 102 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2011.
- AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIRCONDITIONING ENGINEERS, Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy, **ASHRAE Standard 55**. Atlanta, 2010.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15220-3**: Desempenho térmico de edificações - Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. Rio de Janeiro, 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15575-1**: Edificações habitacionais — Desempenho Parte 1: Requisitos gerais. Rio de Janeiro, 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15575-4**: Edificações habitacionais — Desempenho - Parte 4: Requisitos para os sistemas de vedações verticais internas e externas — SVVIE. Rio de Janeiro, 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16401-2**: Instalações de ar-condicionado - Sistemas centrais e unitários - Parte 2: Parâmetros de conforto térmico. Rio de Janeiro, 2008.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 17014**: Taipa de pilão — Requisitos, procedimentos e controle. Rio de Janeiro, 2022.
- ÁVILA, F; PUERTAS, E; GALLEGO, R. Characterization of the mechanical and physical properties of unstabilized rammed earth: A review. **Construction and Building Materials**, v. 270, p. 121435, 2021.
- BEN-ALON, L. et al. Life cycle assessment (LCA) of natural vs conventional building assemblies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 144, p. 110951, 2021.
- BORGNAKKE, C; SONNTAG, R. E. **Fundamentals of thermodynamics**. 8 ed. John Wiley & Sons, 2012.
- BRUCE, A.; BRUCE, P. **Estatística Prática para Cientistas de Dados**. Tradução: Luciana Ferraz. 1 ed. brasileira. Rio de Janeiro: Alta Books, 2019.

- BUI, Q. B. et al. Durability of rammed earth walls exposed for 20 years to natural weathering. **Building and Environment**, v. 44, n. 5, p. 912–919, 2009.
- CALDAS, L. R.; MARTINS, A. P. de S.; TOLEDO FILHO, R. D. Construção com terra no Brasil: avaliação ambiental da taipa de pilão. **PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção**, Campinas, SP, v. 12, p. e021015, 2021.
- DIÁRIO DA REPÚBLICA DE PORTUGAL. **Portaria n° 138-I/2021** - Ambiente e ação climática e infraestrutura e habitação. 2021.
- DOS SANTOS, J. C. P. et al. Comportamento térmico de fechamentos em alvenaria estrutural para a Zona Bioclimática 2 brasileira. **Revista Matéria**, v. 20, n. 4, p. 1030–1047, 2015.
- DURANTE, L. C. et al. conforto térmico e consumo de energia em habitação: estudo comparativo de sistemas construtivos. **Encontro Nacional De Tecnologia Do Ambiente Construído**, v. 18, n. 1, p. 1-8, 2020.
- EL FGAIER, F. et al. Thermal performance of unfired clay bricks used in construction in the north of France: Case study. **Case Studies in Construction Materials**, v. 3, p. 102–111, 2015.
- EMBRAPA, Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Levantamento de reconhecimento de baixa intensidade dos solos do município de Campo Grande**. Rio de Janeiro, 2009. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/32168/1/REL-TECNICO-SOLOS-CAMPO-GRANDE.pdf>. Acesso em maio de 2024.
- ENERGYPLUS DOCUMENTATION. **Input Output Reference**. U.S. Department of Energy. 2022.
- EPE EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Anuário Estatístico de Energia Elétrica**. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dadosabertos/publicacoes/anuario-estatistico-de-energia-eletrica>. Acesso em jan. de 2024.
- FERNANDES, J. et al. Passive strategies used in Southern Portugal vernacular rammed earth buildings and their influence in thermal performance. **Renewable Energy**, v. 142, p. 345–363, 2019.
- FRAUNHOFER. **WUFI Passes Benchmark Test of EN 15026**. 2018. Disponível em: https://wufi.de/download/EN15026_en.pdf. Acesso em abr. de 2023.
- GARCÍA, A. W; CÓSTOLA, D; LABAKI, L. C. **Proposta de zoneamento climático brasileiro para edificações residenciais**. 1° ed. ed. São Paulo: 2023.

- GIESEKAM, J.; BARRETT, J. R.; TAYLOR, P. Construction sector views on low carbon building materials. **Building Research and Information**, v. 44, n. 4, p. 423–444, 2016.
- GIUFFRIDA, G. et al. Design optimisation strategies for solid rammed earthwalls in mediterranean climates. **Energies**, v. 14, n. 2, 2021.
- GIUFFRIDA, G.; CAPONETTO, R.; NOCERA, F. Hygrothermal properties of raw earth materials: A literature review. **Sustainability (Switzerland)**, v. 11, n. 19, 2019.
- HALL, M.; ALLINSON, D. Analysis of the hygrothermal functional properties of stabilised rammed earth materials. **Building and Environment**, v. 44, n. 9, p. 1935–1942, 2009.
- HAMDAOUI, M. A. et al. A review on physical and data-driven modeling of buildings hygrothermal behavior: Models, approaches and simulation tools. **Energy and Buildings**, v. 251, p. 111343, 2021.
- HARRIES, K. A.; SHARMA, B. Nonconventional and vernacular construction materials: characterisation, properties and applications. 2 ed. Duxford, England; Cambridge, Massachusetts; Oxford, England: **Woodhead Publishing**, 2020.
- HENS, H. Building physics, heat, air and moisture: fundamentals and engineering methods with examples and exercises. 2 ed. Berlin: **Ernst & Sohn**, 2012.
- HUERTO-CARDENAS, H. E. et al. Impact of moisture buffering effect in the calibration of historical buildings energy models: A case study. **Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems**, v. 9, n. 3, 2021.
- JUAN, X. et al. The comparative study on the climate adaptability based on indoor physical environment of traditional dwelling in Qinba mountainous areas, China. **Energy and Buildings**, v. 197, p. 140–155, 2019.
- KENNEDY, J. F.; SMITH, M. G; WANEK, C. Praise for The Art of Natural Building- Revised and Updated. 2. ed. Canada: **New Society Publishers**, 2015.
- KERESTECIOGLU, A. et al. Theoretical and computational Investigation of Algorithms for Simultaneous Heat and Moisture Transport in Buildings, **Task 2 Final Report**. 1988.
- LI, X. et al. Experimental and numerical analysis of the hygric performance of earthen buildings after façade hydrophobization treatment. **Case Studies in Construction Materials**, v. 19, 2023.
- LIANG, J.; TAN, J.; JIANG, B. Thermal and humid environment of rammed-earth dwellings in Northwest Sichuan. **Indoor and Built Environment**, v. 31, n. 3, p. 645–656, 2022.

- LOSINI, A. E. et al. Biopolymers impact on hygrothermal properties of rammed earth: from material to building scale. **Building and Environment**, v. 233, 2023a.
- LOSINI, A. E. et al. Hygrothermal characterization of rammed earth according to humidity variations. In: **E3S Web of Conferences**. EDP Sciences, 2023b.
- LOVEC, V. B.; JOVANOVIC-POPOVIC, M. D.; ZIVKOVIC, B. D. The thermal behavior of rammed earth wall in traditional house in Vojvodina: Thermal mass as a key element for thermal comfort. **Thermal Science**, v. 2018, p. 1143–1155, 2018.
- MELLADO, M. M. Á. et al. Evaluation of the Thermal Comfort and Energy Demand in a Building with Rammed Earth Walls in Spain: Influence of the Use of In Situ Measured Thermal Conductivity and Estimated Values. **Buildings**, v. 11, n. 12, 2021.
- MILANI, P. da S.; IUNES, M. C. Aspectos Ambientais do Ciclo de Vida da Taipa de Pilão: Berço a Berço. **MIX Sustentável**, v. 9, n. 3, p. 117–130, 2023.
- MILETO, C.; VEGAS, F.; CRISTINI, V. Rammed earth conservation: proceedings of the first International Conference on Rammed Earth Conservation. 1. ed. Valencia, Spain: **Taylor & Francis Group**, 2012.
- NARLOCH, P. et al. The effect of soil mineral composition on the compressive strength of cement stabilized rammed earth. **Materials**, v. 13, n. 2, 2020.
- NEVES, C. M. M. et al. Seleção de solos e métodos de controle na construção com terra – práticas de campo. **Rede Ibero-americana PROTERRA**, 2009. Disponível em: <http://www.redproterra.org>. Acesso em maio 2024.
- PINHEIRO, J. I. D. et al. Probabilidade e Estatística. 1 ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2012.
- QIN, M.; YANG, J. Evaluation of different thermal models in EnergyPlus for calculating moisture effects on building energy consumption in different climate conditions. **Building Simulation**, v. 9, n. 1, 2016.
- SAMADIANFARD, S.; TOUFIGH, V. Energy Use and Thermal Performance of Rammed-Earth Materials. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 32, n.10, 2020.
- SERRANO, S. et al. Rammed earth walls in Mediterranean climate: Material characterization and thermal behaviour. **International Journal of Low-Carbon Technologies**, v. 12, n. 3, p. 281–288, 1 set. 2017.
- SILVA, F. B; BRITO, A. C. Efeito da variação das características higrotérmicas do concreto no comportamento higrotérmico de uma parede. **Ambiente Construído**, v. 24, 2024.

- SILVA, M. T. C da; MILANI, A. P. da. Vista do Condutividade térmica do material construtivo solo-cimento: um estudo bibliométrico. n: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 19., 2022. **Anais [...]**. Porto Alegre: ANTAC, 2022.
- SOUSA, F. P. **Manual de introdução à simulação do desempenho de edifícios: um curso para iniciantes no software EnergyPlus**. 1. ed. Campo Grande: Ed. do Autor, 2021
- SZOKOLAY, S. V. Introduction to architectural science: the basis of sustainable design. 2 ed. Boston; London. **Elsevier/Architectural Press**, 2008.
- TAIPAL. **Casa Mantiqueira**. Disponível em: <<http://taipal.com.br/obras-realizadas/taipa-com-madeira-laminada/casa-mantiqueira-gui-paoliello-arquiteto/>>. Acesso em maio de 2024.
- TAN, J. et al. Influence of Non-Constant Hygrothermal Parameters on Heat and Moisture Transfer in Rammed Earth Walls. **Buildings**, v. 12, n. 8, 2022.
- TORGAL, F.; JALALI, S. A Sustentabilidade dos Materiais de Construção. 2 ed. Portugal. **Gráfica Vilaverdense**, 2010.
- TRECHSEL, H. R.; BOMBERG, M. Moisture control in buildings: the key factor in mold prevention. 2 ed. **ASTM International**, 2009.
- VERALDO, A. C. **Análise do processo construtivo de taipa mecanizada: estudo de caso da sede do canteiro experimental da UFMS**. 2015. Dissertação (Mestrado em Eficiência Energética e Sustentabilidade) – Universidade Federal do Mato Grosso do Sul, Campo Grande, 2015.
- YU, S. et al. Research on Optimization of the Thermal Performance of Composite Rammed Earth Construction. **Energies**, v. 15, n. 4, 1 fev. 2022.
- ZHANG, L. et al. Thermal conductivity of cement stabilized earth blocks. **Construction and Building Materials**, v. 151, p. 504–511, 2017.