



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



PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DOS MATERIAIS

**Otimização das propriedades térmicas de telhas de concreto
com a incorporação do resíduo de lã de ovinos pantaneiros**

NATHALIA LEITE BITTENCOURT FIGUEIREDO

Orientador: Prof. Dr. Diogo Duarte dos Reis

Campo Grande – MS
2025

INSTITUTO DE FÍSICA- INFI
Cidade Universitária | Unidade 5
Campo Grande | MS

NATHALIA LEITE BITTENCOURT FIGUEIREDO

**Otimização das propriedades térmicas de telhas de concreto
com a incorporação do resíduo de lã de ovinos pantaneiros**

Tese apresentada à Universidade Federal de Mato
Grosso do Sul - UFMS – Instituto de Física - INFI, para
obtenção do título de Doutora em Ciência dos
Materiais.

Campo Grande – MS
2025

*Dedico esse trabalho ao meu amado esposo Filipe,
companheiro em todos os momentos, e aos meus
meninos, Samuel, Noah e Isaac, que enchem meus
dias de amor, alegria e propósito.*

AGRADECIMENTOS

A Deus, por ter me sustentado em todos os momentos da minha vida e, em especial, nesta jornada. Por ser minha rocha, fé e esperança. Sem Sua presença constante, nada disso seria possível.

Ao meu amado esposo Filipe, por seu amor, paciência e companheirismo inabaláveis. Por acreditar em mim mesmo quando as forças pareciam faltar, por estar ao meu lado em cada desafio e celebrar comigo cada conquista. Seu apoio foi o alicerce que me sustentou nos momentos mais difíceis, e sua presença constante tornou possível a realização dessa tese.

Aos meus filhos, Samuel, Noah e Isaac, que mesmo tão pequenos (Isaac ainda sendo gerado em meu ventre), foram minha maior inspiração. A compreensão, o amor e a alegria deles me fortaleceram nos dias mais desafiadores e me lembraram, todos os dias, o verdadeiro propósito de seguir em frente.

A minha família, em especial a minha querida avó Maria Ideuza, por sempre acreditar no poder transformador do ensino. Foi ela quem lutou incansavelmente para que eu tivesse acesso à educação e pudesse alcançar lugares que, um dia, eu mesma não imaginei ser possível. Sua fé, dedicação e amor foram o alicerce que sustentou meus passos até aqui.

Ao meu orientador, Professor Diogo, um ser humano incrível, cuja serenidade e dedicação foram fundamentais nesta caminhada. Mesmo diante dos desafios e dos projetos que não seguiram como o planejado, manteve-se sempre calmo, paciente e confiante no meu potencial. Sua orientação, comprometimento e amizade tornaram minha trajetória acadêmica mais leve e significativa.

Ao Professor Christian, pelo empenho, paciência e pelos conselhos ao longo desta jornada. Agradeço por acreditar neste trabalho e por contribuir com sua experiência para esta pesquisa.

À empresa parceira Combase, em especial ao senhor Celso e ao Matheus, pela receptividade, confiança e por abrirem as portas da indústria para a realização deste trabalho. Agradeço pelo apoio técnico, pela disponibilidade e por não medirem esforços para que a fabricação das telhas fosse possível, viabilizando toda a produção sem qualquer custo ao projeto, o que reforça a relevância e a generosidade dessa parceria.

Ao Professor Dr. Fernando, pela valiosa contribuição a esta pesquisa, por meio da doação das amostras de lã de ovinos pantaneiros, fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho. Agraço também pela disponibilidade, atenção e incentivo ao longo desta jornada.

À Universidade Federal da Grande Dourados - UFGD, pelos laboratórios e estrutura física durante o meu percurso na pós-graduação de Ciência dos Materiais, em especial ao técnico Geison pela colaboração e ajuda durante os ensaios.

À Universidade Federal de Pelotas – UFPel, em especial ao professor Dr. Stefani, pela realização das análises laboratoriais na lâ, pela disponibilidade e pela gentileza em esclarecer dúvidas técnicas que contribuíram para o desenvolvimento desta pesquisa.

À Universidade Federal de Mato Grosso do Sul pelo suporte, estrutura física e aos seus professores que tão voluntariosamente dividiram seus conhecimentos e nos levaram a um patamar superior em conhecimento e pesquisa, com dedicação e empenho.

Aos meus queridos alunos Rayane, Geovana, Lucas, Lorena, Wesley, Luiz Felipe, Jennifer, Eduardo e Aécio, pela colaboração essencial na construção dos protótipos. A dedicação e o espírito de equipe transformaram essa etapa em um verdadeiro mutirão de aprendizado e parceria.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo suporte fundamental concedido durante o período desta pesquisa.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo apoio financeiro concedido por meio da bolsa de pesquisa, que possibilitou a realização deste trabalho.

“Entrega o teu caminho ao Senhor, confia nele, e
ele o fará”.

(BÍBLIA SAGRADA. Salmos 37:5)

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA.....	1
2. OBJETIVOS.....	4
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
3.1 DESEMPENHO TÉRMICO	5
3.2 TELHAS DE CONCRETO.....	7
3.3 LÃ DE OVINOS PANTANEIROS.....	10
4. METODOLOGIA.....	13
4.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO - MECÂNICA DA LÃ DE OVINOS PANTANEIROS	14
4.1.1 ANÁLISES REALIZADAS NA AMOSTRA DE LÃ SUJA	15
4.1.1.1 AVALIAÇÃO DE SUAVIDADE	15
4.1.1.2 AVALIAÇÃO DE COR.....	15
4.1.1.3 COMPRIMENTO DE MECHA.....	16
4.1.1.4 FREQUÊNCIA DE ONDULAÇÕES.....	16
4.1.2 ANÁLISES REALIZADAS NA AMOSTRA DE LÃ LIMPA.....	16
4.1.2.1 DIÂMETRO DAS FIBRAS	16
4.1.2.2 RENDIMENTO	16
4.2 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DOS MATERIAIS CONSTITUINTES DA TELHA DE CONCRETO.....	17
4.2.1 MASSA ESPECÍFICA DO CIMENTO	17
4.2.2 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA E MÓDULO DE FINURA	18
4.3 PRODUÇÃO DAS TELHAS DE CONCRETO.....	20
4.3.1 MATERIAIS	20
4.3.2 TRAÇO.....	20
4.3.3 PREPARO, MOLDAGEM E CURA DAS TELHAS DE CONCRETO	21
4.4 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA, MECÂNICA E TÉRMICA DAS TELHAS DE CONCRETO	27
4.4.1 ABSORÇÃO DE ÁGUA	28
4.4.2 IMPERMEABILIDADE.....	28
4.4.3 RUPTURA À FLEXÃO	29
4.4.4 DESEMPENHO TÉRMICO - TRANSMITÂNCIA	29

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	32
6. CONCLUSÕES.....	49
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	51

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: ZONEAMENTO BIOCLIMÁTICO BRASILEIRO POR DESEMPENHO TÉRMICO E UMIDADE RELATIVA	6
FIGURA 2: TELHA DE CONCRETO ONDULADA CONVENCIONAL, COM DIMENSÕES DE 33 CM X 42 CM	7
FIGURA 3: REBANHO DE OVINOS PANTANEIROS CRIADOS NO BIOMA PANTANAL	10
FIGURA 4: ETAPAS DO PREPARO DA LÃ DE OVINOS PANTANEIROS A-) LÃ <i>IN NATURA</i> B-) LÃ LAVADA E C-) LÃ CARDEADA	13
FIGURA 5: FRASCO DE LE CHATELIER UTILIZADO PARA DETERMINAÇÃO DA MASSA ESPECÍFICA DO CIMENTO PORTLAND CII F40	17
FIGURA 6: A-) AMOSTRA DE AREIA B-) PENEIRADOR DE BANCADA UTILIZADO PARA A REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS	19
FIGURA 7: A-) ESTEIRA DE ENTRADA COM AREIA FINA B-) MISTURADOR PLANETÁRIO	22
FIGURA 8: PRÉ UMEDECIMENTO DA LÃ DE OVINOS PANTANEIROS PARA INCORPORAÇÃO NA MISTURA DE CONCRETO: A-) LÃ SECA, B-) LÃ SATURADA E C-) LÃ LEVEMENTO TORCIDA	23
FIGURA 9: ADIÇÃO DE LÃ MANUALMENTE NO MISTURADOR PLANETÁRIO	23
FIGURA 10: FOTOGRAFIA DO MISTURADOR PLANETÁRIO – TRAÇO COM ADIÇÃO DE LÃ DE OVINOS PANTANEIROS	24
FIGURA 11: A-) EXTRUSORA DE TELHAS DE CONCRETO E B-) PARTE INTERNA DA EXTRUSORA DE CONCRETO, CHAMADO DE GARFO COMPACTADOR	25
FIGURA 12: A-) FORMA DE ALUMÍNIO PARA TELHAS DE CONCRETO LADO EXTERNO B-) FORMA DE ALUMÍNIO PARA TELHAS DE CONCRETO LADO INTERNO	25
FIGURA 13: CARRINHOS DE TRANSPORTE COM AS TELHAS DE CONCRETO NA ESTUFA PARA PERÍODO DE CURA INICIAL	26
FIGURA 14: HIDROFUGADORA DE TELHAS DE CONCRETO	27
FIGURA 15: PROTÓTIPOS UTILIZADOS NO ENSAIO DE DESEMPENHO TÉRMICO, CORRESPONDENTES AOS TEORES DE 0%, 2%, 5% E 7% DE INCORPORAÇÃO DE LÃ DE OVINOS PANTANEIROS	30
FIGURA 16: HISTOGRAMA DO COMPRIMENTO DAS FIBRAS DE LÃ DE OVINOS PANTANEIROS APÓS O CORTE MANUAL	32
FIGURA 17: DIÂMETRO MÉDIO (μM) DA FIBRA DE OVINOS PANTANEIROS DESTACANDO A HETEROGENEIDADE DENTRO DA MESMA RAÇA	35
FIGURA 18: PORCENTAGENS DE RENDIMENTO DA LÃ APÓS LAVAGEM POR AMOSTRA	36

FIGURA 19: DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DE PARTÍCULAS DE DOIS MÓDULOS DE FINURA DE AREIA EM GRÁFICO SEMILOGARÍTMICO	38
FIGURA 20: GRÁFICO DOS RESULTADOS DO ENSAIO DE ABSORÇÃO NAS TELHAS DE CONCRETO TRAÇO REFERÊNCIA (0%) E TRAÇOS COM INCORPORAÇÃO DE 2%, 5% E 7% DE LÃ DE OVINOS PANTANEIROS	39
FIGURA 21: COMPARAÇÃO DA RESISTÊNCIA À FLEXÃO AOS 28 DIAS DAS TELHAS DE CONCRETO: TRAÇO REFERÊNCIA (0%) E TRAÇOS COM 2%, 5% E 7% DE LÃ DE OVINOS PANTANEIROS	41
FIGURA 22: FOTOGRAFIAS E TERMOGRAFIAS DAS TELHAS DE CONCRETO COM DIFERENTES TEORES DE ADIÇÃO DE LÃ DE OVINOS PANTANEIROS (0%, 2%, 5% E 7%).....	43
FIGURA 23: TEMPERATURA INTERNA DOS PROTÓTIPOS ANALISADOS	44
FIGURA 24: TEMPERATURA MÉDIA DA FACE DE CIMA E DA FACE DEBAIXO DA TELHA DOS PROTÓTIPOS ANALISADOS	46
FIGURA 25 VARIAÇÃO TÉRMICA INTERNA, EXTERNA E AMBIENTE DOS PROTÓTIPOS ANALISADOS	47

LISTA DE TABELAS

TABELA 1: VOLUME DE ÁGUA, VOLUME E PESO DE SABÃO, TEMPERATURA E TEMPO DE PERMANÊNCIA DAS SUBAMOSTRAS DE LÃ EM CADA CUBA DO TREM DE LAVAGEM.....	14
TABELA 2: MATERIAIS UTILIZADOS NA PRODUÇÃO DE TELHAS DE CONCRETO	20
TABELA 3: PROPORÇÃO DOS TRAÇOS (0%, 2%, 5% E 7%) E DOSAGEM DOS MATERIAIS PARA A PRODUÇÃO DE 90 TELHAS DE CONCRETO	21
TABELA 4: RESULTADOS DO ENSAIO DE MASSA ESPECÍFICA DO CIMENTO	37
TABELA 5: VALORES DE TRANSMITÂNCIA TÉRMICA (U) DAS TELHAS DE CONCRETO COM DIFERENTES TEORES DE LÃ DE OVINOS	48

LISTA DE SÍMBOLOS E ACRÔNIMOS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CNPQ	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
CO ₂	Dióxido de Carbono
IEA	Do inglês: <i>International Energy Agency</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ISO	Do inglês: <i>International Organization for Standardization</i>
MS	Mato Grosso do Sul
NBR	Norma Brasileira
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
ONU	Organização das Nações Unidas
PIB	Produto Interno Bruto
TC	Telha de concreto

RESUMO

Diante da crescente demanda por soluções construtivas sustentáveis e energeticamente eficientes, este estudo propôs uma nova aplicação para a lã de ovinos pantaneiros em telhas de concreto, com o objetivo de melhorar o desempenho térmico das coberturas. A lã foi lavada, cardeada e cortada manualmente, e sua caracterização indicou diâmetro médio de 31,12 μm , textura áspera, coloração amarela e rendimento ao lavado de 71,58%, classificando-a como fibra de espessura média. Por não atender aos requisitos da indústria têxtil, essa lã mostra-se promissora para aplicações alternativas, como na construção civil. Telhas de concreto foram produzidas com 0%, 2%, 5% e 7% incorporação de lã em relação ao volume de cimento, através do processo industrial e avaliadas conforme as normas ABNT NBR 13858-2/2009 e ABNT NBR 15575-5/2021. O traço com 2% apresentou o melhor desempenho físico e mecânico, com menor absorção de água (4,81%) e maior resistência à flexão (2,45 MPa), representando um ganho de 1,7% em relação ao traço referência. Já o traço com 5% destacou-se pelo comportamento térmico, reduzindo a transmitância térmica para 5,09 $\text{W/m}^2\cdot\text{K}$ e proporcionando diferença interna de temperatura de até 4,2 $^{\circ}\text{C}$ nos protótipos experimentais. O aproveitamento desse resíduo demonstra ser uma alternativa técnica, econômica e ambientalmente viável, respeitando e atendendo as normas e os padrões do mercado.

Palavras-chave: lã de ovinos pantaneiros; telhas de concreto; eficiência energética; conforto térmico; sustentabilidade.

ABSTRACT

In view of the growing demand for sustainable and energy-efficient construction solutions, this study proposed a new application for Pantaneiro sheep wool in concrete roof tiles, aiming to improve the thermal performance of building coverings. The wool was washed, carded, and manually cut. Its characterization indicated an average fiber diameter of 31.12 μm , coarse texture, yellow coloration, and a washed yield of 71.58%, classifying it as a medium-thickness fiber. Since it does not meet the requirements of the textile industry, this wool shows promise for alternative applications, particularly in construction materials. Concrete roof tiles were produced with 0%, 2%, 5%, and 7% wool incorporation relative to the cement volume, using an industrial process and evaluated according to the standards ABNT NBR 13858-2:2009 and ABNT NBR 15575-5:2021. The 2% mixture exhibited the best physical and mechanical performance, with lower water absorption (4.81%) and higher flexural strength (2.45 MPa), representing a 1.7% increase compared to the reference mixture. The 5% mixture stood out in terms of thermal performance, reducing thermal transmittance to 5.09 $\text{W/m}^2\cdot\text{K}$ and providing an internal temperature reduction of up to 4.2 $^{\circ}\text{C}$ in experimental prototypes. The utilization of this residue proves to be a technically, economically, and environmentally viable alternative, compliant with current standards and market requirements.

Keywords: Pantaneiro sheep wool; concrete roof tiles; energy efficiency; thermal comfort; sustainability.

1. Introdução e Justificativa

O crescimento populacional e a migração urbana estão diretamente ligados à necessidade de habitação, contribuindo para o aumento da quantidade de obras comerciais, de infraestrutura e edificações, principalmente nos países em desenvolvimento. Estima-se que cerca de 70% da população mundial viverá em regiões urbanas até 2050 (ONU; Banco Mundial; Chavez, 2019). No Brasil, a construção civil se destaca como um dos setores que mais influencia o cálculo do Produto Interno Bruto (PIB) (Nascimento; Moraes; Lopes, 2022). Apesar desse crescimento, ainda existe um déficit habitacional de 7,7 milhões de moradias, que corresponde a 11% do número de residências existentes. Essa realidade evidencia a necessidade de investimentos contínuos no setor, mas também ressalta a importância de desenvolver estudos e tecnologias que reduzam os impactos ambientais decorrentes desse segmento (Agência IBGE, 2022; Agopyan; John, 2011; Givisiez; Oliveira, 2018; Loureiro; Empresa de Pesquisa Energética - EPE, 2022; Lucon et al., 2014).

O impacto da construção civil é evidenciado pelo consumo de cerca de 60% das matérias primas extraídas da litosfera. Em escala global, destaca-se o consumo de 16,6% de água potável, além de 25% da madeira de reflorestamento e aproximadamente 40% do total de energia produzida (Bribián; Capilla; Usón, 2011; Pomada et al., 2024). O setor também contribui com 38% das emissões globais de gases de efeito estufa, das quais 15% correspondem a emissões diretas de dióxido de carbono, sendo de 8 a 9% provenientes do cimento Portland. Tais números consolidam a construção civil como um dos principais alvos para a redução de impactos ambientais (Guggemos; Horvath, 2005; IEA International Energy Agency, 2022; Monteiro; Miller; Horvath, 2017).

Nesse cenário, a busca pela neutralidade de carbono até 2050 tem colocado o setor da construção como peça chave nas metas globais. Espera-se que todos os novos edifícios e, ao menos, 20% das construções existentes, alcancem a condição de “zero carbono” até 2030. Além disso, há um esforço mundial para reduzir a dependência de fontes não renováveis de energia na matriz energética mundial. Como resposta a esses desafios, a Organização das Nações Unidas (ONU) estabeleceu, em 2015, os novos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), baseados nos Objetivos de Desenvolvimento do Milênio. Trata-se de um plano de ação para 2030, estruturado em 17 objetivos de desenvolvimento e 169 metas. Entre eles, destacam-se o ODS 7, que busca garantir acesso sustentável, moderno e a preço acessível à energia para todos. Já o ODS 11, voltado para a construção de cidades mais

sustentáveis, e o ODS 12, que trata da produção e do consumo responsáveis, reduzindo assim qualquer forma de desperdício (ONU - Organização das Nações Unidas, 2022).

O impacto energético de construções de edifícios e infraestruturas é expressivo. Em 2015, resultou na emissão de 7×10^{12} kgCO₂ dos quais 4×10^{12} kgCO₂ foram atribuídos ao uso de materiais na construção. Além do próprio processo de fabricação e transporte desses materiais, o consumo de energia elétrica representa um fator essencial na manutenção do setor. A alta demanda por materiais de construção impulsiona diretamente o crescimento do consumo energético. Em agosto de 2022, o consumo de eletricidade do Brasil totalizou mais de 42.097 GWh, um aumento de 3,0% em relação ao mesmo mês de 2021. Esse é o maior consumo mensal de eletricidade desde setembro de 2013 (Fucheno, 2020).

Nesse contexto, destaca-se que a temperatura interna das edificações é fortemente influenciada pela radiação solar e por fontes internas de calor, como equipamentos e iluminação artificial. Entre os elementos construtivos, o telhado é o que mais contribui para o desempenho térmico, uma vez que está exposto à radiação durante todo dia, podendo representar até 72,3% da carga térmica recebida por uma edificação térrea (Mascaró; Mascaró, 1992; Santos; Porto; Silva, 2020). Logo, a cobertura assume um papel estratégico no controle da carga térmica e na eficiência energética da edificação, exigindo que as telhas apresentem propriedades físicas e térmicas adequadas (ABNT NBR 15575-5, 2021).

Dentre os diversos tipos de cobertura, a telha de concreto (TC) tem se destacado por sua resistência mecânica, durabilidade, baixa absorção de água, variedade de cores, impermeabilidade e facilidade de manuseio (Damasceno et al., 2015). Produzida a partir de uma mistura de cimento Portland, agregado miúdo, água e aditivos, as telhas de concreto ainda apresentam potencial para incorporação de insumos reciclados, favorecendo a sustentabilidade do processo construtivo (ABNT NBR 13858-2, 2009). Entretanto, apesar de suas qualidades técnicas e comerciais, uma de suas principais limitações está no comportamento térmico, pois tende a transferir o calor absorvido para o interior das edificações, impactando negativamente o conforto térmico dos ambientes internos (Damasceno et al., 2015).

Tendo em vista a melhoria do desempenho térmico das telhas de concreto, diversas pesquisas têm sido desenvolvidas com o objetivo de incorporar materiais alternativos capazes de reduzir a transferência de calor para o interior das edificações. Entre esses estudos, sobressaem-se o uso de rejeito de minério em telhas de concreto (Carvalho Eugênio et al., 2021a), a incorporação de borracha triturada (Supar et al., 2021), a utilização de resíduos sólidos urbanos (Poyyamozi et al., 2024), cinza de casca de arroz (Subashi De Silva et al., 2022a), além de fibras sintéticas, como as de polipropileno (Teixeira et al., 2014).

e de basalto (Chakartnarodom et al., 2020), e fibras naturais, como coco (Darsana et al., 2016a; Jagannadha Rao et al., 2024), e cana de açúcar (Ogundipe; Olorunnisola, 2023). Diante da necessidade de aprimorar o desempenho térmico das coberturas e de incorporar práticas mais sustentáveis na construção civil, surge a oportunidade de explorar fibras naturais ainda pouco investigadas, como a lã de ovinos pantaneiros.

A lã de ovinos pantaneiros é um descarte agroindustrial, abundante da ovinocultura regional que, devido à sua baixa qualidade para uso têxtil, costuma ser descartado de forma inadequada. Apesar disso, essa lã apresenta propriedades interessantes, como baixa condutividade térmica, média entre 0,035 e 0,045 W/m.K), alta capacidade de absorver até 30% de umidade sem perda significativa de desempenho térmico e elevada resiliência mecânica, que lhe permite suportar deformações de até 30% de alongamento antes da ruptura (Dénes; Florea; Manea, 2019; Hetimy et al., 2024). Diante dessas propriedades, a aplicação dessa lã em telhas de concreto apresenta-se como uma estratégia promissora tanto para melhorar o desempenho térmico das coberturas quanto para destinar adequadamente um descarte agroindustrial.

Assim, este estudo propõe uma nova abordagem para o aproveitamento da lã de ovinos de baixa qualidade em telhas de concreto, com o objetivo de melhorar o desempenho térmico das coberturas. Além de contribuir para a eficiência energética das edificações, a proposta busca reduzir o descarte inadequado desse resíduo agroindustrial, agregando valor a um subproduto pouco explorado na construção civil.

2. Objetivos

2.1 Objetivo Geral

Avaliar o efeito da incorporação de lã de ovinos pantaneiros em telhas de concreto, com ênfase no estudo dos desempenhos térmico, mecânico e físico, de modo a verificar sua viabilidade técnica e potencial de aplicação como alternativa sustentável na construção civil.

2.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar as matérias primas utilizadas: cimento, areia e lã de ovinos, de forma a compreender suas propriedades físicas.
- Produzir telhas de concreto com diferentes teores de lã de ovinos: 2%, 5% e 7% e comparar com o traço referência (0%).
- Analisar o desempenho físico e mecânico das telhas produzidas, incluindo absorção de água, impermeabilidade e resistência à flexão, conforme a ABNT NBR 13858-2/2009.
- Avaliar o desempenho térmico das telhas de concreto por meio do método teórico de cálculo da transmitância térmica conforme NBR 15220-2 (ABNT, 2022), considerando a zona bioclimática de Dourados/MS segundo a NBR 15220-3 (ABNT, 2024a) e, por meio de medições experimentais em protótipos construídos no laboratório de engenharia civil da UFGD.

3. Revisão bibliográfica

3.1 Desempenho Térmico

O desempenho térmico de uma edificação é resultado das interações que ocorrem entre a envoltória, os sistemas instalados, os usuários e o meio externo (Hensen; Lamberts, 2019). As características térmicas da envoltória, em particular a resistência térmica do isolamento utilizado, impactam o desempenho térmico da estrutura do edifício (Alyami et al., 2022). Esse desempenho depende, sobretudo, das trocas de calor que acontecem de forma simultânea nas construções por três mecanismos principais: condução, que ocorre através de elementos sólidos como paredes, pisos e coberturas, convecção, relacionada à movimentação de fluidos, representada no edifício pela troca de calor entre superfícies e o ar, e, radiação, proveniente da propagação de ondas eletromagnéticas entre corpos, como a absorção da radiação solar pelas coberturas e sua posterior emissão para o ambiente interno (Lv et al., 2022).

Quando essas interações estão equilibradas, o desempenho térmico garante conforto aos usuários, ao mesmo tempo em que reduz o consumo de energia elétrica (Bentoumi, 2024). A avaliação do comportamento térmico pode ser feita de forma simplificada, a partir das propriedades térmicas das fachadas e das coberturas, ou por meio de simulação computacional.

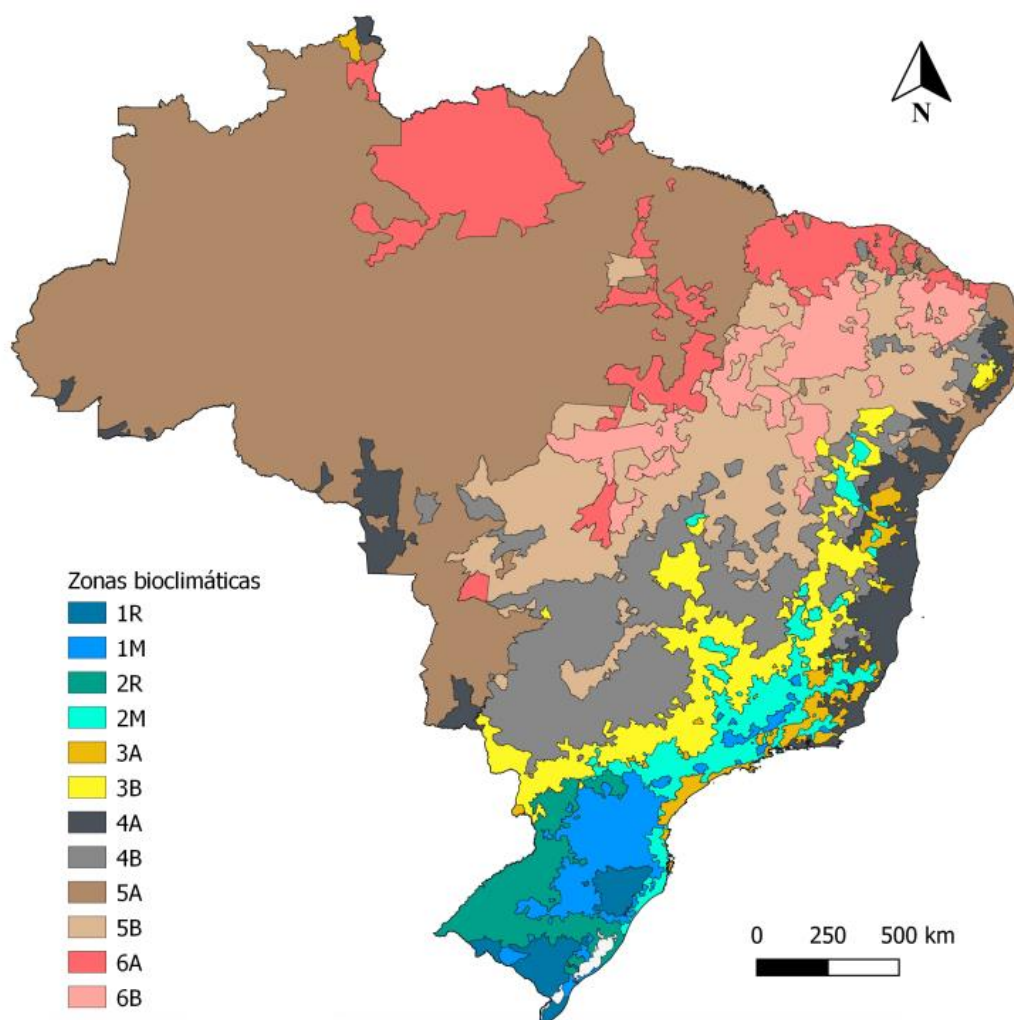
No Brasil, a preocupação com o desempenho térmico das edificações teve maior relevância nos últimos anos, consolidando-se com a publicação da norma ABNT NBR 15575-1, lançada em 2008 e atualizada em 2024, que define requisitos mínimos de desempenho, vida útil e garantia para os principais sistemas que compõem as edificações. A norma estabelece dois procedimentos principais para a avaliação do desempenho térmico da unidade habitacional: procedimento simplificado e simulação computacional. Em adição, a medição das propriedades térmicas dos materiais e elementos construtivos é obrigatória, conforme indicado na seção 11.2.1. Caso os sistemas construtivos não atendam aos critérios do procedimento simplificado, recorre-se ao procedimento de simulação computacional.

No método simplificado, a parte 5 da NBR 15575 (ABNT, 2021), avalia a conformidade com os requisitos e critérios com base na transmitância térmica e capacidade térmica adequados as diferentes zonas bioclimáticas brasileiras. A definição desses parâmetros é detalhada na NBR 15220-1 onde, capacidade térmica (CT) é relacionada a quantidade de calor necessária para variar a temperatura de um sistema em uma unidade, expressa em joules por kelvin (J/K) (ABNT, 2024b). Já a transmitância térmica (U) é a

quantidade de calor que atravessa um elemento construtivo em função da diferença de temperatura entre os ambientes interno e externo, sendo um indicador da eficiência do material em resistir a passagem de calor. A transmitância térmica é expressa em watts por metro quadrado kelvin, ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$) (Lamberts; Dutra; Pereira, 2019).

Os valores de referência para U e CT variam conforme as zonas bioclimáticas brasileiras, estabelecidas pela ABNT NBR 15220-3 2024, que organiza o território nacional em seis zonas para subsidiar as técnicas de construção das edificações quanto ao desempenho térmico, conforme Figura 1.

Figura 1 – Zoneamento bioclimático brasileiro por desempenho térmico e umidade relativa



Fonte: Adaptado de NBR 15220-3 (ABNT, 2024a).

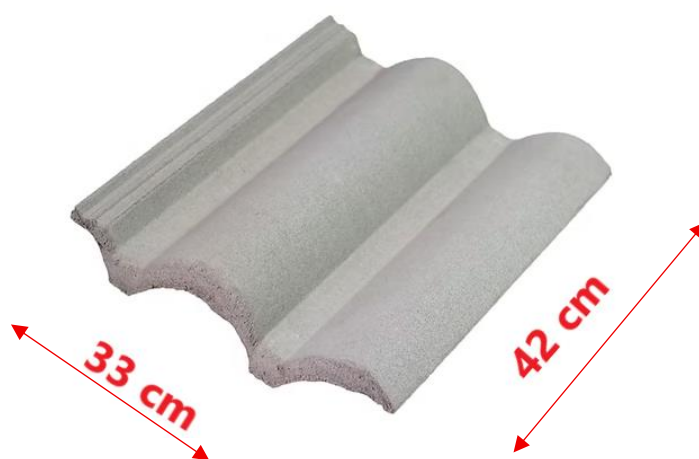
As zonas bioclimáticas são divididas segundo as variáveis climáticas como temperatura, umidade e radiação solar. São definidas gradualmente de “muito fria” a “muito quente” e subdivididas em função da carga térmica.

Dessa forma, observa-se que o desempenho térmico das edificações no Brasil depende fortemente da adequação dos materiais construtivos às condições climáticas específicas de cada zona bioclimática. No caso de Dourados/MS, classificada como zona 4B, torna-se estratégico o emprego de coberturas leves e isoladas, capazes de reduzir significativamente a transferência de calor para o ambiente interno. Portanto, a incorporação de resíduos agroindustriais com propriedades isolantes em telhas de concreto surge como alternativa promissora, alinhando-se tanto às exigências normativas quanto às metas globais de eficiência energética e sustentabilidade.

3.2 Telhas de concreto

As telhas de concreto configuram-se como elementos de cobertura amplamente utilizados em edificações residenciais, rurais e industriais, destacando-se pela durabilidade, resistência mecânica e diversidade estética. Tradicionalmente compostas por cimento Portland, agregados miúdos, água e aditivos, podem ainda receber pigmentos que ampliam sua aplicação arquitetônica (Damasceno et al., 2015; Valcarenghi; Piovesan, 2011). A difusão desse material ao longo das últimas décadas decorre, entre outros fatores, da escassez de argila para telhas cerâmicas em determinadas regiões e da busca por alternativas mais eficientes sob o ponto de vista construtivo e ambiental (Diniz; Campos, 2025; Valcarenghi; Piovesan, 2011). A Figura 2 apresenta um exemplo típico de telha de concreto convencional.

Figura 2 – Telha de concreto ondulada convencional, com dimensões de 33 cm x 42 cm



Fonte: Adaptado de <https://www.combasedourados.com.br/product-page/telha-cor-p%C3%A9rola>, 2025.

Do ponto de vista normativo, no Brasil as telhas de concreto estão submetidas à NBR 13858-2 (ABNT, 2009), que estabelece requisitos de desempenho físico e mecânico, incluindo absorção de água, resistência à ruptura por flexão, permeabilidade e dimensões. Estudos realizados em fábricas e laboratórios demonstram que, embora atendam a critérios básicos de qualidade, há variações significativas em função do traço e do tipo de aditivo empregado, sendo recorrente a redução da resistência mecânica quando se introduzem materiais leves ou isolantes (Valcarenghi; Piovesan, 2011; Damasceno et al., 2015).

Pesquisas recentes têm buscado superar limitações técnicas relacionadas ao elevado peso e à alta porosidade das telhas de concreto, que impactam tanto no dimensionamento estrutural quanto na manutenção (Peixoto et al., 2010; Batista, 2024). Uma vertente importante é a incorporação de agregados leves e materiais alternativos com potencial de isolamento térmico. Damasceno e colaboradores (2015) verificaram que a adição de vermiculita, poliestireno e aditivos incorporadores de ar contribui para a redução da temperatura na face interna das telhas, embora resulte em menor resistência à flexão. De forma semelhante, Batista (2024) produziu telhas de concreto leve com esferas de poliestireno expandido (EPS), obtendo reduções de massa específicas próximas a 11% sem comprometer os critérios mínimos de desempenho estabelecidos pela norma. Esses resultados corroboram a viabilidade do uso de agregados leves em formulações sustentáveis, ainda que impliquem adaptações quanto ao controle da microestrutura e da resistência mecânica.

Além do desempenho térmico e estrutural, pesquisas recentes destacam a interface das telhas de concreto com tecnologias sustentáveis e de eficiência energética. Poyyamozhi et al. (2024) demonstraram a viabilidade de incorporar cinza volante proveniente da incineração de resíduos sólidos urbanos como substituto parcial da areia em telhas de concreto, simultaneamente integrando sistemas fotovoltaicos às peças. Essa estratégia, além de reduzir a extração de recursos naturais, confere duplo papel às telhas: material de cobertura e gerador de energia limpa. A utilização de materiais residuais como cinzas e a aplicação de refletores de alumínio para otimizar a captação solar resultaram em melhorias no conforto térmico e na eficiência energética dos edifícios, alinhando-se aos princípios da economia circular.

Com o avanço das pesquisas voltadas à sustentabilidade e a eficiência energética, as telhas de concreto assumem papel estratégico na transição para uma construção civil de menor impacto ambiental. A incorporação de resíduos agroindustriais, polímeros reciclados, vidros moídos e fibras naturais tem sido avaliada como estratégia de mitigação do consumo de matérias-primas convencionais e de redução das emissões de CO₂ associadas à produção

do cimento (Oliveira; Souza, 2024). Essa tendência aponta para o desenvolvimento de telhas multifuncionais, capazes de integrar requisitos de desempenho estrutural, eficiência energética e sustentabilidade ambiental.

Outra linha de investigação relevante envolve a incorporação de fibras em telhas de concreto, visando melhorar o desempenho mecânico e a durabilidade. Poletto (2025) demonstrou que a adição de fibras de polipropileno pode reduzir a fissuração por retração plástica, além de contribuir para o aumento da tenacidade do compósito, aspecto relevante para materiais submetidos a ações cíclicas e intempéries. A presença das fibras atua como um mecanismo de ponteamto das microfissuras, retardando sua propagação e elevando a resistência pós-fissuração. Callejas et al. (2023) complementam esse entendimento ao investigar a inserção de resíduos de PET em telhas cimentícias, destacando que além da melhoria térmica observada, a incorporação fibrosa auxilia na redução da condutividade térmica e no controle do aparecimento de trincas. Assim, a utilização de fibras, sejam elas poliméricas ou provenientes de resíduos reciclados, representa uma estratégia eficaz tanto para otimização estrutural quanto para incremento do desempenho termo energético e ambiental das telhas de concreto.

Com base nessas evidências, a literatura evidencia que as telhas de concreto, embora já consolidadas no mercado, encontram-se em um processo de reinvenção tecnológica. O emprego de agregados leves, adições minerais e resíduos sólidos, aliado ao desenvolvimento de telhas fotovoltaicas e de alto desempenho térmico, projeta uma nova geração de materiais de cobertura. Tais inovações não apenas visam à melhoria do conforto térmico e à redução do peso estrutural, mas também contribuem para o avanço de uma construção civil mais sustentável, coerente com as diretrizes globais de redução de impactos ambientais e de eficiência energética.

Assim, observa-se que as telhas de concreto configuram um campo fértil para pesquisas interdisciplinares que conciliem engenharia de materiais, sustentabilidade e inovação tecnológica. Estudos futuros devem buscar o equilíbrio entre resistência mecânica, leveza, desempenho térmico e viabilidade econômica, o que amplia as possibilidades de pesquisa sobre o uso de fibras naturais de forma a consolidar soluções que atendam tanto às normativas técnicas quanto às demandas ambientais contemporâneas.

3.3 Lã de ovinos pantaneiros

A função de um material de isolamento térmico é reduzir a transferência de calor através da envoltória do edifício. A escolha desse material depende de diversos fatores, como

condutividade térmica, umidade, custo-benefício, impacto ambiental e sustentabilidade (Ali; Issa; Elshaer, 2024). Embora a lã mineral e o poliestireno estejam entre os materiais mais empregados como isolantes térmicos (Pomada et al., 2024), Abu-Jdayil e colaboradores, enfatizam a necessidade de desenvolver materiais de isolamento com menor impacto ambiental e maior viabilidade econômica. Esses materiais devem alavancar recursos renováveis e utilizar resíduos no desenvolvimento de isolamento térmico (Abu-Jdayil et al., 2019).

Com base nessa tendência, as fibras naturais têm se consolidado como alternativas promissoras para o desenvolvimento de materiais construtivos sustentáveis. Entre essas fibras, destaca-se a lã de ovinos pantaneiros, proveniente de animais adaptados às condições climáticas do bioma Pantanal, caracterizado por fortes variações sazonais de umidade e temperatura. Embora ainda não reconhecida como uma raça, a ovelha pantaneira é considerada um grupamento genético com características próprias que se destaca como uma opção promissora, tecnicamente atrativa devido às suas propriedades como resiliência e elasticidade (Castro et al., 2022). Na Figura 3 apresenta exemplares de ovinos pantaneiros criados no bioma.

Figura 3 – Rebanho de ovinos pantaneiros criados no bioma Pantanal



Fonte: Autoria própria, 2025.

As fibras de lã de ovelha também têm uma boa natureza higroscópica, permitindo que absorvam umidade, evitem condensação e controlem a umidade em materiais isolantes (Hetimy et al., 2024; Klarić et al., 2020; Lakshmanan, 2022a). Essas fibras naturais podem ser classificadas em três grupos principais: lignocelulósicas, minerais e proteicas, sendo a lã de ovinos pertencente a esta última categoria, obtida por meio da tosquia das ovelhas (Alyousef et al., 2022a).

A composição da lã de ovinos é predominantemente de queratina (60%), seguida por 15% de umidade, 10% de gordura, 10% de suor e 5% de impurezas (Parlato; Porto; Valenti, 2022). Embora tradicionalmente utilizada na indústria têxtil, a lã não é um material homogêneo, existindo diferentes tipos que variam em função de parâmetros como o diâmetro da fibra. Esse último parâmetro, medido em microns (μm), é o critério que determina a finura do fio, que pode variar entre 15 μm a mais de 100 μm , classificando a lã em quatro classes: fina, média, grossa e muito grossa (Lakshmanan, 2022a). A finura da fibra, além de influenciar diretamente o valor comercial, também determina o destino de uso e a demanda de mercado. As lãs mais finas, geralmente provenientes de ovelhas criadas especificamente para a produção de lã, como a raça Merino, são amplamente empregadas na indústria têxtil para a produção de tecidos de alta qualidade (Ozek, 2024).

Por outro lado, as fibras mais grossas, com menor valor comercial, são destinadas a produtos de menor valor agregado, como carpetes, feltros e materiais de enchimento. Em muitos casos, sobretudo em raças criadas prioritariamente para carne e leite, a lã de baixa qualidade não encontra aplicação econômica relevante e acaba sendo descartada, uma vez que sua remoção é necessária para o bem-estar do animal e para manter a produtividade durante períodos mais quentes do ano (Midolo et al., 2025).

Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, a produção de lã no Brasil atingiu cerca de oito milhões de kg em 2023 (IBGE, 2023). Este valor, porém, não distingue os ovinos criados com foco em lã, carne ou leite. A relevância dessa produção varia conforme a região do país: no nordeste, por exemplo, a criação de ovinos tem forte vínculo cultural voltado ao consumo da carne, enquanto no sul, há uma tradição consolidada na criação de ovelhas destinadas à produção têxtil (De Moura; Do Nascimento; Guimarães, 2023). Já em Mato Grosso do Sul, finca-se uma realidade distinta. A criação local, especialmente da raça pantaneira, resulta em uma lã frequentemente classificada de baixa qualidade, incompatível com os padrões da indústria têxtil. Essa deficiência atribuída ao diâmetro da fibra e a uniformidade, resulta no envio para aterros sanitários ou em usos de menor valor, como na confecção de tapetes.

Uma alternativa para a utilização da lã de baixa qualidade de ovinos é empregá-la como biocompósito em resina epóxi vegetal (Midolo et al., 2025). Midolo e colaboradores reportaram que a aplicação da lã de baixa qualidade pode aumentar o desempenho mecânico, com a resistência à tração aumentando de 89,45 MPa para 142,92 MPa.

Na agricultura, a lã de baixa qualidade de ovinos também tem sido utilizada como aditivos em solos, contribuindo para o aumento da fertilidade e da produtividade agrícola, além de elevar em até 27% o rendimento de determinadas culturas frutíferas (Broda et al., 2023; Gabryś; Fryczkowska, 2022; Gitea et al., 2024).

Além disso, na construção civil, a lã de baixa qualidade foi aproveitada como reforço em blocos de terra compactada, apresentando maior resistência à flexão e boa resistência à compressão, especialmente com fibras de maior comprimento (Parlato; Rivera-Gómez; Porto, 2023). Em tijolos, pesquisadores da Espanha e Escócia desenvolveram tijolos de lã e alginato sem queima, com alta resistência, secagem rápida e menor fissuração, uma opção sustentável de substituição a tijolos tradicionais (Atbir et al., 2023).

Por fim, Wani e colaboradores, investigaram a adição de fibras de lã de ovelhas em concreto e argamassa. Os resultados mostraram uma melhoria em relação à resistência à flexão para teores de até 6% de fibras, ainda que, nos ensaios de compressão, tenha sido observado um decréscimo nos valores (Ahmad Wani; Ul Rehman Kumar, 2021a; Alyousef et al., 2020, 2022b). Dessa forma, considerando o potencial técnico e sustentável da lã de ovinos pantaneiros, este estudo propõe avaliar experimentalmente o seu aproveitamento em telhas de concreto, detalhando, na sequência, os procedimentos metodológicos adotados para sua caracterização e aplicação.

4. Metodologia

Neste trabalho, utilizou-se a lã de baixa qualidade proveniente do descarte de ovinos pantaneiros, doada pelo curso de Engenharia Agrônômica da Universidade Federal da Grande Dourados (UFGD), no estado de Mato Grosso do Sul. A coleta da lã, resultante de 134 ovelhas, foi realizada no mês de dezembro de 2024, na Fazenda Experimental de Ciências Agrárias da UFGD, localizada nas coordenadas geográficas: 22°13'58.3" S; 54°59'16.2" O.

O procedimento de tosquia adotou o método australiano, reconhecido por sua eficiência e preservação da qualidade da fibra (Young; Butler, 1957). Durante a tosquia dos ovinos, foram obtidos aproximadamente 268 kg de lã, dos quais uma amostra de cerca 2 kg foi separada e encaminhada, em seu estado natural, para caracterização físico – mecânica pelo LANATEC – Laboratório de Lãs da Universidade Federal de Pelotas (UFPel), na cidade de Pelotas, estado do Rio Grande do Sul.

Após a coleta, a lã foi submetida a uma lavagem com água à temperatura ambiente (entre 20 °C e 25 °C) e detergente neutro, para remover as impurezas superficiais. A proporção utilizada foi de 10 litros de água para cada 1kg de lã. Concluída a lavagem, a lã foi torcida manualmente para remoção do excesso de água e, em seguida, colocada para secar ao ar livre, em local coberto e ventilado.

A princípio, tentou-se padronizar o comprimento das fibras utilizando um moinho de facas, porém, o procedimento não foi viável. Assim, optou-se pelo corte manual, após o cardeamento, obtendo fibras com comprimentos variados entre 1 cm e 4 cm. Para a caracterização desse parâmetro, elaborou-se um histograma com 100 fios, a fim de calcular a média do comprimento obtido. A sequência do processamento da lã *in natura*, lavada, cardeada e cortada, está apresentada na Figura 4.

Figura 4 – Etapas do preparo da lã de ovinos pantaneiros a-) lã *in natura* b-) lã lavada e c-) lã cardeada



Fonte: Autoria própria, 2025.

4.1 Caracterização físico – mecânica da Lã de Ovinos Pantaneiros

No laboratório da LANATEC/UFPel, a amostra de lã recebida (com peso total de 2kg) era composta de uma mistura de lãs de diferentes ovinos Pantaneiros, abrangendo distintas regiões dos animais (velo, garreio, cabeça, barriga). O laboratório procedeu uma homogeneização da amostra e retirou 12 subamostras de aproximadamente 80 g cada para proceder as análises físico – mecânicas.

As subamostras foram colocadas em um saco de filó, devidamente identificados com os seguintes números: 59, 57, 50, 46, 58, 54, 42, 48, 56, 36, 52 e 37. Durante o processo de lavagem, os sacos contendo as subamostras de lã, passaram por quatro cubas consecutivas, conhecidas como trem de lavagem. Cada cuba continha água em diferentes temperaturas e concentrações de sabão, conforme detalhado na Tabela 1 abaixo. A água utilizada foi aquecida para favorecer a remoção da suarda. As concentrações de sabão foram reduzidas gradativamente ao longo das etapas, de modo que a lã fosse lavada e, simultaneamente, o sabão fosse removido progressivamente, até sua completa eliminação na última cuba, composta apenas por água limpa.

Tabela 1 – Volume de água, volume e peso de sabão, temperatura e tempo de permanência das subamostras de lã em cada cuba do trem de lavagem

Nº Cuba	Água (litros)	Sabão (ml)	Sabão (g)	Temperatura (°C)	Tempo (minutos)
1	40	300	270	55	10
2	40	200	180	50	10
3	40	150	135	50	10
4	40	—	—	45	10

Fonte: Laboratório de lãs da UFPEL, 2025.

Após o tempo estipulado de permanência em cada cuba, os sacos contendo as subamostras foram comprimidos por cilindros ao passar de uma à outra cuba. Esse processo visa a retirada do excesso de água, permitindo que ela retorne à cuba de origem e mantendo, assim, o volume interno constante. Concluído o ciclo de lavagem, os sacos contendo as subamostras foram levados à estufa de ar forçado, onde permaneceram por 12 horas à temperatura de 65 °C.

Com o teor de umidade próximo à zero, as subamostras foram então transferidas para uma sala climatizada, durante o período de 12 horas. O ambiente apresentava umidade

relativa do ar entre 60% e 70% e temperatura controlada entre 20 °C e 25 °C. Esse procedimento teve como objetivo permitir que as fibras recuperassem sua umidade natural, estimada em aproximadamente 17%, conforme (Helman, 1965).

O grau de umidade padrão adotado nos laboratórios de análises de lãs para o peso final de lã lavada é de 16% (Helman, 1965) Uma vez condicionadas, as subamostras foram retiradas dos sacos, pesadas e, assim, obteve-se o peso da lã limpa.

4.1.1 Análises realizadas na amostra de lã suja

4.1.1.1 Avaliação de suavidade

A suavidade da lã foi avaliada por meio de análise tátil direta, utilizando uma escala subjetiva com base na percepção sensorial ao toque. Essa avaliação é comumente utilizada em estudos de caracterização de fibras naturais (Cardellino, 1977). A escala adotada foi a seguinte:

- 1 – Suave;
- 2 – Levemente suave;
- 3 – Áspera;
- 4 – Muito áspera.

4.1.1.2 Avaliação de cor

A cor da lã foi determinada visualmente, tanto na amostra suja quanto na amostra limpa, após o processo de lavagem. A classificação visual seguiu a escala abaixo:

- 1 – Branca;
- 2 – Creme;
- 3 – Amarelo;
- 4 – Amarelo – canário.

4.1.1.3 Comprimento de mecha

O comprimento das mechas foi determinado por meio de medição direta com régua milimetrada, conforme o procedimento descrito por (Machado, 1994) com base na metodologia proposta por Short & Chapman, 1965. Dez mechas foram separadas e cuidadosamente estendidas individualmente sobre uma superfície plana, garantindo a máxima precisão na leitura do comprimento total das fibras.

4.1.1.4 Frequência de ondulações

A frequência de ondulações foi mensurada por meio da contagem visual do número de ondulações presentes em um segmento de 2,5 cm de uma mecha de lã, estendida manualmente sobre uma régua milimetrada. A mecha foi mantida sem estiramento excessivo, de forma a preservar a curvatura natural das fibras. Para cada amostra, foram selecionadas três mechas representativas, e as contagens realizadas em cada uma delas foram posteriormente utilizadas para cálculo da média. O procedimento segue a técnica descrita por (Yeates, 1967).

4.1.2 Análises realizadas na amostra de lã limpa

4.1.2.1 Diâmetro das fibras

O diâmetro médio das fibras foi determinado por meio do equipamento Air – Flow, seguindo a metodologia padronizada pela IWTO – 6 (International Wool Textile Organisation, 2016). Para a análise, foram utilizadas 5 g de lã lavada, previamente cardada manualmente até que as fibras estivessem livres de impurezas e paralelamente alinhadas. Em seguida, foram separadas e divididas em duas subamostras de 2,5 g cada, utilizadas no ensaio de finura.

Cada subamostra foi submetida a três leituras no aparelho Air - Flow, dispostas uma em cada extremidade e uma na região central, totalizando seis medições por amostra. O princípio da análise baseia-se na resistência do fluxo de ar através de um feixe de fibras: quanto menor o diâmetro das fibras, maior será sua compactação e menor a passagem de ar. O ar movimenta um êmbolo no interior de um tubo graduado, sendo a leitura feita no ponto de estabilização. Após obtidas as seis leituras, foi calculado a média aritmética, expressa inicialmente em centímetros, e posteriormente, convertida em micrômetros. Com base nesse valor, a lã foi classificada quanto à sua finura, conforme os critérios técnicos definidos pela IWTO.

4.1.2.2 Rendimento

O rendimento da lã foi determinado por meio da razão entre o peso da amostra limpa e o peso da amostra suja, expressa em percentual. Esse indicador expressa a quantidade efetivamente aproveitável de fibra após a remoção de impurezas naturais, como suarda, terra e matérias vegetal, conforme Equação 1 (ITWO, 2016).

$$R (\%) = \frac{PAL}{PAS} \times 100 \quad (\text{Eq. 1})$$

Sendo:

R = rendimento da lâ (%);

PAL = peso da amostra limpa (g);

PAS = peso da amostra suja (g).

4.2 Caracterização física dos materiais constituintes da telha de concreto

4.2.1 Massa específica do cimento

A determinação da massa específica do cimento Portland CP II F40 utilizado na confecção das telhas, foi realizada conforme os procedimentos estabelecidos pela norma NBR 16605 (ABNT, 2017). O ensaio foi conduzido com o uso de um frasco de Le Chatelier de vidro de borossilicato, com capacidade de 250 cm³ e graduação de 0,05 cm³. Para o deslocamento do volume, foi usado querosene como líquido auxiliar. A Figura 5 apresenta o frasco utilizado no ensaio.

Figura 5 – Frasco de Le Chatelier utilizado para determinação da massa específica do cimento Portland CP II F40 utilizado na confecção das telhas de concreto



Fonte: Autoria própria, 2025.

Inicialmente, o frasco foi preenchido com querosene e em seguida, imerso verticalmente em um recipiente com água à temperatura ambiente por 30 minutos, para

garantir o equilíbrio térmico do sistema. Após esse período, foi adicionado 60 g de cimento seco no frasco, com auxílio de um funil, até que o nível do líquido atingisse a faixa recomendada entre 18 cm³ e 24 cm³. O frasco foi então tampado e suavemente girado em movimentos circulares, mantendo-se levemente inclinado, a fim de estabilizar o nível do fluido. A massa específica aparente do cimento (ρ) foi calculada por meio da Equação 2.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (\text{Eq. 2})$$

Sendo:

ρ = massa específica do cimento (g/cm³);

m = massa do cimento ensaiado (g);

V = volume de querosene deslocado pela massa do cimento ensaiado (cm³).

4.2.2 Análise granulométrica e módulo de finura

A análise granulométrica da amostra de areia utilizada neste estudo, seguiu os procedimentos da norma NBR 17054 (ABNT, 2022). A areia, selecionada pela própria indústria parceira e proveniente da extração no Rio Paraná, foi empregada como agregado miúdo na fabricação das telhas de concreto. Antes da realização dos ensaios, o material foi peneirado e submetido à secagem em estufa a 105 °C por 24 horas.

Para a caracterização física, foram realizados dois ensaios de análise granulométrica com o objetivo de confirmar a reprodutibilidade dos resultados. Cada ensaio foi conduzido com uma amostra de 500 g (Figura 6 a), totalizando 1 kg de material analisado. As amostras foram previamente homogeneizadas, resfriadas à temperatura ambiente e quarteadas até se obter a massa adequada. O conjunto de peneiras utilizado possuía as seguintes aberturas nominais: 4,75 mm, 2,36 mm, 1,18 mm, 600 µm, 300 µm e 150 µm, conforme Figura 6 b.

Figura 6 – a) Amostra de areia e b) Peneirador de bancada utilizado para a realização dos ensaios



Fonte: Autoria própria, 2025.

As peneiras, devidamente limpas, foram montadas em forma decrescente (da malha maior para a menor), com fundo e tampas adequados. A amostra de areia foi disposta na peneira superior e submetida à agitação mecânica por 10 minutos cronometrados. Após esse período, as peneiras foram cuidadosamente desmontadas e o material retido em cada uma foi pesado individualmente. Os resultados foram expressos em porcentagem de massa retida em cada peneira e utilizados para o cálculo do passante acumulado.

Além da distribuição granulométrica, foi determinado o módulo de finura (MF) do agregado miúdo, conforme a ABNT NBR 7211:2005. O MF foi calculado pela soma das porcentagens retidas acumuladas nas peneiras da série normal, dividida por 100, conforme Equação 3.

$$\text{Módulo de finura} = \frac{\sum(\text{porcentagem retida acumulada})}{100} \quad (\text{Eq. 3})$$

Com base no valor obtido, é possível classificar o agregado miúdo segundo os seguintes intervalos estabelecidos na norma:

- Areia fina: MF entre 1,5 e 2,20;
- Areia média: MF entre 2,0 e 2,90;
- Areia grossa: MF entre 2,90 e 3,50.

Essa classificação permite avaliar a adequação da granulometria da areia à produção de concreto para telhas, auxiliando no controle tecnológico do processo.

4.3 Produção das Telhas de Concreto

A seguir, descreve-se o procedimento adotado para a produção das telhas de concreto, desde a preparação da mistura até a cura das peças.

4.3.1 Materiais

Os materiais utilizados na confecção da argamassa para a produção das telhas de concreto, fabricadas nas instalações da empresa Combase, estão descritos na Tabela 2 abaixo.

Tabela 2 – Materiais utilizados na produção de telhas de concreto

Materiais	Fornecedores
Cimento CP II F40	Votorantim
Areia fina	Mineração Trevo
Aditivo plastificante Liquiplast 3000s	TecnoMor – Aditivos e desmoldantes para artefatos de concreto
Diesel	Distribuidor local
Óleo vegetal	Distribuidor local
Óleo de comida	Distribuidor local
Hidrorrepelente Acquagota	TecnoMor – Aditivos e desmoldantes para artefatos de concreto
Água	Rede de distribuição local

Fonte: Autoria própria, 2025.

4.3.2 Traço

No contexto dos materiais cimentícios, o termo “traço” refere-se à proporção entre os componentes da mistura (cimento, agregados, água e adições), sendo responsável por

definir as características físicas e mecânicas do concreto. A definição do traço adotado neste estudo foi baseada na prática consolidada da empresa parceira, a qual forneceu a proporção utilizada rotineiramente em sua linha de produção de telhas de concreto. Optou-se por seguir essa dosagem por se tratar de um método padronizado, reproduzível e que já demonstrou bom desempenho técnico.

A dosagem apresentada na Tabela 3 refere-se à produção de 90 telhas de concreto. No total, foram produzidas 360 telhas, sendo 90 unidades moldadas com o traço referência (sem adição de lã) e as demais divididas entre os traços com 2%, 5% e 7% de incorporação de lã de ovinos.

Tabela 3 – Proporção dos traços (0%, 2%, 5% e 7%) e dosagem dos materiais para a produção de 90 telhas de concreto

Materiais	Traço Referência 0% (sem lã)	Traço com 2% de lã	Traço com 5% de lã	Traço com 7% de lã
Cimento CP II F40	90 kg	90 kg	90 kg	90 kg
Areia fina	333 kg	333 kg	333 kg	333 kg
Aditivo plastificante	0,4518 kg	0,4518 kg	0,4518 kg	0,4518 kg
Água	31,194 kg	31,194 kg	31,194 kg	31,194 kg
Lã de ovinos	—	0,01309 kg	0,03271 kg	0,04508 kg

Fonte: Autoria própria, 2025.

Com base nos valores fornecidos, o fator água/cimento (a/c) foi determinado conforme a Equação 4.

$$a/c = \frac{\text{massa de água (kg)}}{\text{massa de cimento (kg)}} \quad (\text{Eq. 4})$$

Assim, calculou-se uma proporção de água/cimento de 0,35, a qual foi mantida em toda a etapa de moldagem das telhas, respeitando as condições usuais do processo industrial da empresa.

4.3.3 Preparo, moldagem e cura das Telhas de Concreto

Primeiramente, para a produção do traço referência (0% de incorporação de lã), com o auxílio de uma esteira de entrada (Figura 7 a), adicionou-se a areia fina ao misturador

planetário. Em seguida, de forma manual, o cimento CP II F40 foi incluído. O agregado miúdo e o aglomerante hidráulico foram misturados por 30 segundos. Após esse tempo, foram adicionados o aditivo plastificante e a água, dando sequência à mistura por mais 1 minuto e 30 segundos, até a completa homogeneização, conforme Figura 7 b).

Figura 7 – a-) Esteira de entrada com areia fina e b-) Misturador planetário



Fonte: Autoria própria, 2025.

Para a produção dos traços com adição de lã de ovinos pantaneiros nas proporções de 2%, 5% e 7%, adotou-se uma etapa de pré umedecimento das fibras, visando minimizar a absorção da água de amassamento pelas lãs (Patrucco 2024). O procedimento consistiu na breve imersão da lã em água, seguida de torção manual para retirada do excesso de líquido, e posterior incorporação a mistura cimentícia. Após essa preparação, as fibras foram pesadas já umedecidas, conforme Figura 8. Os valores obtidos para 2% de lã foram de 0,01309 kg para 0,078 kg, indicando absorção de 0,065 kg de água; Para 5% de lã, a massa passou de 0,03271 kg para 0,180 kg, absorvendo 0,14729 kg de água e, para 7% de lã, a massa passou de 0,04508 kg para 0,286 kg, com absorção de 0,24092 kg de água.

Figura 8 – Pré umedecimento da lã de ovinos pantaneiros para incorporação na mistura de concreto: a-) lã seca, b-) lã saturada e c-) lã levemente torcida



Fonte: Autoria própria, 2025.

Prosseguindo a etapa de produção dos traços com lã (2%, 5% e 7%), a sequência de mistura foi inicialmente, a areia fina e o cimento CII F40, misturados por 30 segundos no misturador planetário. Em seguida, a lã de ovinos pantaneiros, previamente preparada, foi adicionada manualmente e misturada com os demais materiais secos por mais 2 minutos, conforme Figura 9.

Figura 9 – Adição de lã manualmente no misturador planetário



Fonte: Autoria própria, 2025.

Após esse tempo, adicionaram-se o aditivo plastificante e a água, até a incorporação completa por aproximadamente 1 minuto, conforme Figura 10.

Figura 10 – Fotografia do misturador planetário - traço com adição de lã de ovinos pantaneiros



Fonte: Autoria própria, 2025.

Uma vez misturado os materiais, o concreto foi transportado mecanicamente até a extrusora, responsável pela moldagem das telhas. A extrusora utilizada nesse processo é composta por diversos componentes, sendo os principais o garfo compactador que impulsiona o concreto para debaixo do rolo alisador, responsável pelo pré-acabamento da superfície superior. Em seguida, o sistema de *slippers* realiza o acabamento final da face superior da telha, sendo guiado por réguas laterais, que garantem o alinhamento e o acabamento das bordas. A extrusora e seus principais componentes são ilustrados na Figura 11.

Figura 11 – a-) Extrusora de telhas de concreto e b-) Parte interna da extrusora de concreto, chamado de garfo compactador



Fonte: Autoria própria, 2025.

Na extrusora, o concreto foi depositado em moldes de alumínio com dimensões de 330 mm de largura por 420 mm de comprimento, como ilustrado na Figura 12. Os moldes de alumínio, também denominados formas, já estavam com desmoldante (uma mistura composta por diesel, óleo vegetal e óleo de cozinha, dosada e aplicada pela empresa). Essas formas são responsáveis por conferir o formato das telhas.

Figura 12 – a-) Forma de alumínio para telhas de concreto lado externo b-) Forma de alumínio para telhas de concreto lado interno



Fonte: Autoria própria, 2025.

Concluído o processo de extrusão, as telhas foram dispostas manualmente em carrinhos de transporte, sendo que cada carrinho comportava 90 unidades, correspondentes a um traço. Em seguida, os quatro carrinhos (relativos aos quatro traços produzidos) foram encaminhados a uma estufa com temperatura controlada de 32°C, onde permaneceram por 24 horas para a cura inicial, ainda nas formas de alumínio, conforme Figura 13.

Figura 13 – Carrinhos de transporte com as telhas de concreto na estufa para período de cura inicial



Fonte: Autoria própria, 2025.

Após o período de 24 horas na estufa, as telhas foram desmoldadas mecanicamente e, a partir desse ponto, não retornaram para a estufa. No décimo quarto dia de cura, foi realizada a aplicação do hidrórepelente por meio de imersão em uma hidrofugadora, conforme ilustrado na Figura 14.

Figura 14 – Hidrofugadora de telhas de concreto



Fonte: Autoria própria, 2025.

Esse procedimento tem como objetivo reduzir a permeabilidade do concreto, conferindo maior proteção contra a ação da água. Em seguida, as telhas foram paletizadas e armazenadas em ambiente aberto, onde permaneceram em cura até completarem vinte e oito dias, momento em que foram submetidas aos ensaios físicos, mecânicos e térmicos.

4.4 Caracterização Física, Mecânica e Térmica das Telhas de Concreto

Na caracterização das telhas de concreto desenvolvidas neste estudo, foram realizados ensaios com o objetivo de avaliar suas propriedades físicas, mecânicas e térmicas. Os ensaios foram conduzidos no laboratório do LEC – Laboratório de Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia da UFGD, no município de Dourados – MS.

4.4.1 Absorção de água

A absorção de água das telhas de concreto foi determinada conforme os procedimentos estabelecidos no anexo b da NBR 13858-2 (ABNT, 2009). O ensaio foi realizado após vinte e oito dias de cura, com o objetivo de avaliar a porosidade e a qualidade do material em relação à sua capacidade de retenção de água.

Para o ensaio, seis telhas de cada traço foram selecionadas aleatoriamente. As amostras foram inicialmente imersas em água portátil por um período de 24 horas. Decorrido esse tempo, cada telha foi retirada da imersão e, o excesso de água superficial foi removido com pano seco. Em seguida, foi determinada a massa saturada (Mu) utilizando uma balança de precisão.

Após a pesagem, as telhas foram levadas à estufa a uma temperatura de 105 °C, onde permaneceram até que duas pesagens sucessivas, realizadas com intervalo de uma hora, apresentassem variação inferior a 0,25%. Concluída essa etapa, foi registrada a massa seca (Ms) imediatamente após a retirada das amostras da estufa, evitando absorção de umidade do ambiente.

A absorção de água (AA), expressa em porcentagem, foi calculada conforme Equação 5.

$$AA (\%) = \frac{Mu - Ms}{Ms} \times 100 \quad (\text{Eq. 5})$$

Sendo:

AA = absorção de água (%);

Mu = massa saturada (g);

Ms = massa seca (g).

4.4.2 Impermeabilidade

A avaliação da impermeabilidade das telhas de concreto foi conduzida conforme os procedimentos descritos na ABNT NBR 13858-2/2009, anexo C. Foram selecionadas seis amostras de cada traço de forma aleatória, totalizando 24 telhas submetidas ao ensaio.

Cada telha foi posicionada horizontalmente no interior de uma caixa transparente, impermeável, sendo vedada ao longo da sua periferia com um selante, respeitando a largura máxima de 15 mm e adequada as dimensões para conter uma telha de concreto e possibilitar a contenção de uma lâmina de água. Após garantir a estanqueidade entre as bordas da telha

e as laterais da caixa, foi adicionada água limpa até atingir um nível entre 10 mm e 15 mm acima da crista da onda mais alta da face superior da telha.

O sistema permaneceu em repouso por 24 horas em ambiente coberto, ventilado, com temperatura controlada entre 15 °C e 30 °C e umidade relativa do ar acima de 40%. Ao final do período, as telhas foram inspecionadas visualmente em sua face inferior. De acordo com os critérios da norma, não são admitidos vazamentos ou gotejamentos, embora manchas de umidade sejam toleradas.

4.4.3 Ruptura à flexão

Para a realização do ensaio mecânico de resistência à flexão, as telhas de concreto produzidas foram imersas em água por 24 h. Na máquina de ensaios mecânicos, marca Contenco (SKU: I-3022 D), a telha foi posicionada sobre barras de apoio de aço (38 mm de diâmetro e 380 mm de comprimento) fixas e centralizadas, transversalmente, com carga centralizada e progressiva, com velocidade de 90 N/s. A carga de ruptura foi expressa em MPa e o ensaio foi executado para as telhas curadas por vinte e oito dias, conforme a norma NBR 13858-2 (ABNT, 2009).

4.4.4 Desempenho térmico – Transmitância

Para a realização do ensaio prático de conforto térmico, foram construídos quatro protótipos, sendo um com telha de concreto referência 0%, outro com telha de concreto contendo 2% de lã de ovinos pantaneiros, outro com 5% e o último com telhas de concreto com 7% dessa adição.

A construção foi realizada na Universidade Federal da Grande Dourados, localizada atrás do galpão do LEC (Laboratório de Engenharia Civil). Todos os protótipos foram edificadas de forma idêntica, igualmente espaços entre si e posicionados sobre pallets. Cada base foi construída em alvenaria, com formato quadrado de 0,68 x 0,68 m (área de 0,4624 m²) e altura de 0,98 m. As paredes foram executadas com tijolos cerâmicos de oito furos (9 cm x 19 cm x 19 cm), assentados com argamassa comum em meia vez, recebendo revestimento de argamassa em ambas as faces (interna e externa) e contrapiso de concreto com espessura de 5 cm. A vista geral dos quatro protótipos pode ser observada na Figura 15.

Figura 15 – Protótipos utilizados no ensaio de desempenho térmico, correspondentes aos teores de 0%, 2%, 5% e 7% de incorporação de lã



Fonte: Autoria própria, 2025.

Para garantir condições uniformes, todos os protótipos foram orientados na mesma direção solar, com 1,5 metro de distância entre si, evitando qualquer sombreamento proveniente de outro protótipo ou de edificações externas ao experimento.

A cobertura foi montada com inclinação voltada para o norte, visando maximizar a insolação ao longo do dia. Para o apoio das telhas, construiu-se uma estrutura de madeira idêntica para todos os protótipos. As medições de temperatura interna e externa foram realizadas por meio de uma câmera termográfica FLIR modelo E50. Para assegurar condições homogêneas de coleta de dados, todas as telhas foram posicionadas na orientação norte – sul, com inclinação fixa de 30%, eliminando o efeito do vento por meio da vedação com argamassa nas frestas de ondulações das telhas.

Todo o planejamento experimental foi conduzido com o objetivo de permitir a avaliação do desempenho térmico das coberturas conforme os critérios estabelecidos na NBR 15575-5 (ABNT, 2021). Os cálculos de transmitância térmica seguiram o procedimento descrito na NBR 15220-2 (ABNT, 2022; British Standards Institution, 2022), considerando os parâmetros e limites específicos para a zona bioclimática definidos pela NBR 15220-3 (ABNT, 2024a). A transmitância térmica foi determinada pela Equação 6.

$$U = \frac{1}{R_{Si} + \sum_{i=1}^n \frac{e_i}{\lambda_i} + R_{se}} \quad (\text{Eq. 6})$$

Sendo:

- U = transmitância térmica ($\text{W/m}^2\cdot\text{K}$);
- R_{si} = resistência térmica superficial interna ($\text{m}^2\cdot\text{K/W}$);
- e_i = espessura da camada i (m);
- λ_i = condutividade térmica da camada i ($\text{W/m}\cdot\text{K}$);
- R_{se} = resistência térmica superficial externa ($\text{m}^2\cdot\text{K/W}$).

Para o cálculo da transmitância térmica das coberturas avaliadas, foi necessário determinar a condutividade térmica da camada correspondente as telhas de concreto. Como a condutividade térmica de compósitos cimentícios reforçados com fibras naturais não é fornecida por normas técnicas e depende diretamente da sua composição, adotou-se a condutividade térmica efetiva (K_{ef}) como parâmetro representativo da telha.

Primeiramente, definiu-se a condutividade térmica da telha de referência (0% de lã) como $1,60 \text{ W/m}\cdot\text{K}$, valor representativo para argamassas compostas de cimento e areia, conforme Mehta e Monteiro (2014). Esse valor serviu como K_{ef} referência. Para os traços contendo lã (2%, 5% e 7%), a condutividade térmica efetiva foi estimada considerando que, para telhas com mesma espessura e submetidas as mesmas condições de ensaio, a amplitude térmica interna medida no protótipo é proporcional à condutividade térmica efetiva do material. Assim, a K_{ef} de cada traço com lã foi calculada pela relação (Equação 7).

$$K_{ef,i} = K_{ef,ref} \times \frac{\Delta T_{int,i}}{\Delta T_{int,ref}} \quad (\text{Eq. 7})$$

Sendo:

- $K_{ef,i}$ = condutividade térmica efetiva da telha com teor de lã i ;
- $K_{ef,ref}$ = condutividade térmica da telha de referência ($1,60 \text{ W/m}\cdot\text{K}$);
- $\Delta T_{int,i}$ = amplitude térmica interna medida no protótipo com lã;
- $\Delta T_{int,ref}$ = amplitude térmica interna do protótipo de referência.

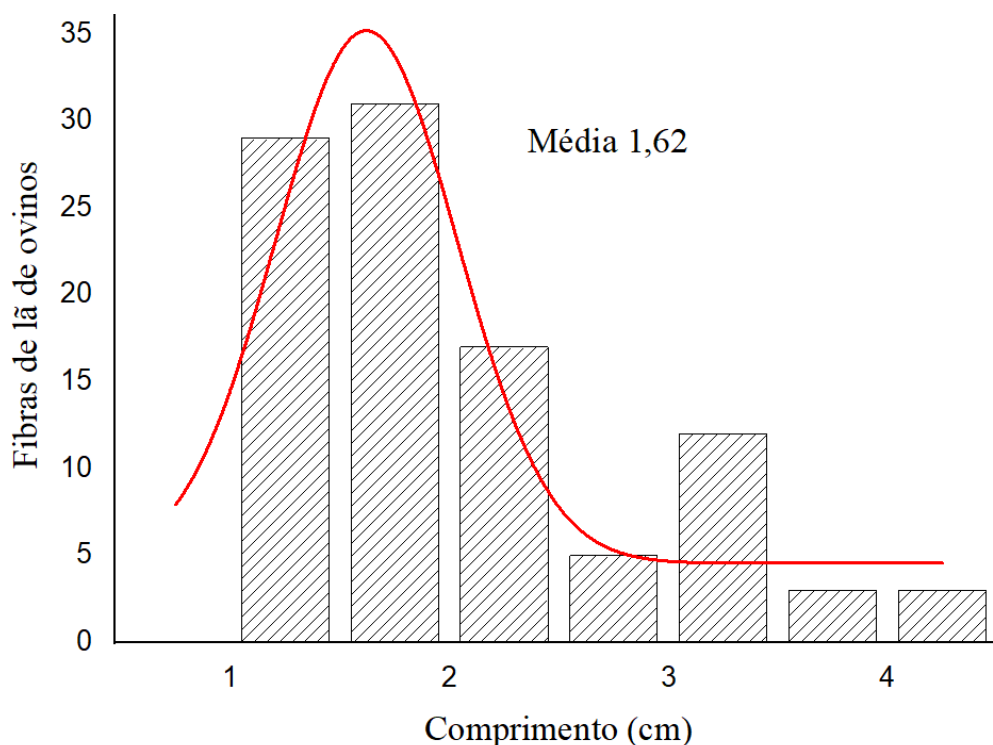
Esse procedimento permitiu que a influência real da incorporação da lã, observada nos ensaios térmicos, fosse convertida em um valor de condutividade térmica efetiva compatível com o cálculo da transmitância térmica NBR 15220-2 (ABNT, 2022).

5. Resultados e discussões

5.1 Avaliação do Resíduo

Para verificar a distribuição dos comprimentos das fibras de lã de ovinos pantaneiros utilizadas, elaborou-se um histograma (Figura 16).

Figura 16 – Histograma do comprimento das fibras de lã de ovinos pantaneiros após o corte manual



A Figura 16 apresenta o histograma do comprimento das fibras, obtida a partir de uma amostra de cem unidades. Os valores variaram entre 1 e 4 cm, com maior concentração na faixa de 1 a 2 cm. Essa distribuição evidencia a heterogeneidade do material, consequência do corte manual realizado após o cardeamento, uma vez que o procedimento de padronização por moinho de facas não se mostrou viável. Apesar da variabilidade, a predominância de fibras curtas é considerada adequada para aplicação em compósitos cimentícios, pois favorece a dispersão na matriz e reduz a tendência de formação de aglomerados (Maia Pederneiras; Veiga; De Brito, 2019).

5.1.1 Suavidade

Para o teste de suavidade, foram analisadas doze amostras de 80 g de lã de ovinos pantaneiros, com o objetivo de avaliar a sensação de suavidade ou aspereza transmitida pelas fibras. Em todas as amostras analisadas, a lã foi classificada com textura áspera.

Esse resultado está de acordo com a relação esperada entre o diâmetro das fibras e a suavidade ao toque (Cardellino, 1979). A aspereza está associada ao aumento da proporção de fibras grossas, o que compromete a suavidade. Segundo a literatura existente, enquanto lãs com diâmetro fino apresentam maior suavidade, fibras acima de 30 μm aumentam a sensação de aspereza e desconforto, restringindo seu uso em produtos de vestuário (Gad-Allah, 2023; Zhou et al., 2015).

Logo, o resultado obtido neste estudo, com diâmetro médio superior a 30 μm , reforça essa relação, uma vez que fibras mais grossas apresentam superfície áspera em razão da camada externa de células da cutícula, organizadas em escamas sobrepostas (Babu, 2015).

5.1.2 Avaliação da cor

A cor da lã foi determinada visualmente, tanto nas amostras sujas quanto nas amostras limpas. Em todas as doze amostras analisadas, a lã apresentou coloração amarela, mantendo essa tonalidade mesmo após a lavagem.

O fato de a lã manter a coloração amarela mesmo após a lavagem tem impacto direto na sua valorização comercial, uma vez que a cor final da lã limpa é considerada parâmetro mais relevante para fins industriais (Rippon et al., 2016). Sob o ponto de vista têxtil, o ideal é que a lã se apresente branca após a lavagem, permitindo maior versatilidade no tingimento e possibilitando a obtenção de tonalidades claras (Vieira, 1967). Quando a lã é amarela, as opções de tingimento ficam mais restritas na indústria têxtil (Steckling; Figueiró, 1980).

A presença de coloração amarelada pode estar relacionada a fatores de manejo, como manchas de medicamentos, pinturas, urina e resíduos de banhos, bem como por agentes biológicos (Steckling; Figueiró, 1980). As bactérias podem provocar amarelamento, que nem sempre é eliminado pela lavagem, enquanto os fungos podem ocasionar a descoloração e formação de capachos (Helman, 1965).

5.1.3 Comprimento de mecha

Para a determinação do comprimento médio das mechas da lã de ovino pantaneiro, foram analisadas dez unidades estendidas sobre superfície plana. Todas as amostras apresentaram comprimento de 7,5 cm, evidenciando uniformidade entre as mechas avaliadas.

O comprimento da mecha é uma característica de elevada herdabilidade e apresenta padrões específicos para cada raça. A lã é geralmente obtida por meio da tosquia anual das ovelhas. Consequentemente, o comprimento da fibra é determinado, em grande parte, pela taxa de crescimento, a qual depende de fatores genéticos e ambientais (Sarma; Rather; Maurya, 2024).

De acordo com Denvedran, Kandasamy, Pannerselvam (2011) e Khan (2021), o comprimento da mecha está associado tanto à qualidade da lã quanto ao seu aproveitamento industrial. Lãs de maior qualidade, costumam apresentar comprimentos médios entre 8 e 12 cm, com fibras finas e uniformes. Em contrapartida, lãs de baixa qualidade, especialmente aquelas classificadas como grossas, o comprimento da mecha tende a ser reduzido, frequentemente na faixa de 5 a 8 cm.

Nesse sentido, o valor de 7,5 cm das mechas avaliadas no presente estudo, se enquadra na faixa relatada para lãs de menor valor têxtil. Tal resultado reforça a necessidade de buscar alternativas para a valorização desse material, seja por meio de melhorias no manejo e na nutrição dos animais ou o direcionamento para outras cadeias produtivas, como a construção civil.

5.1.4 Frequência de ondulações

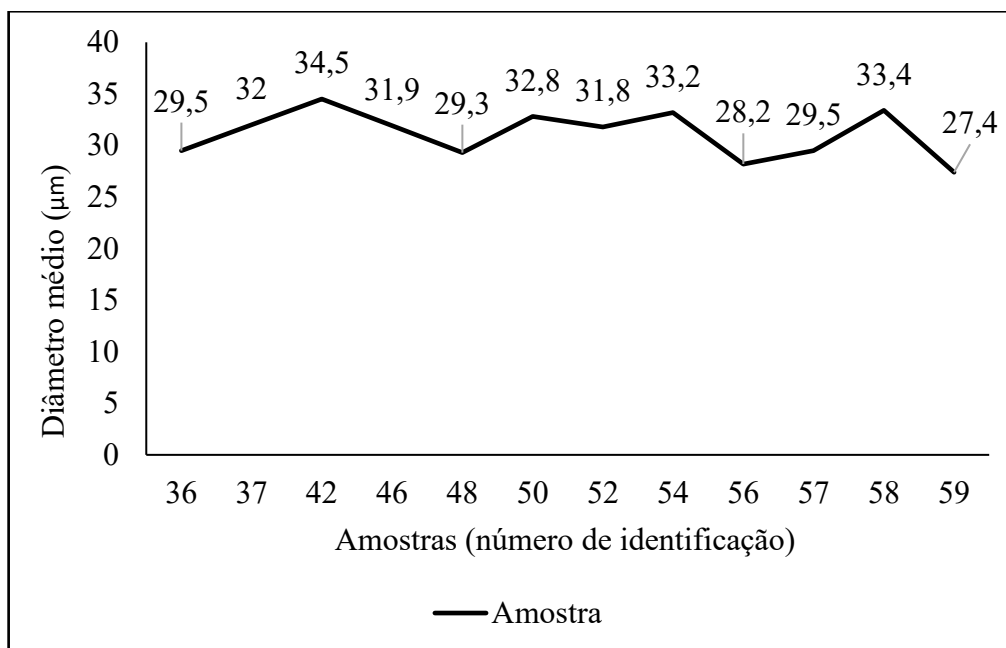
A frequência de ondulações nas amostras de lã de ovinos avaliadas foi ausente. Normalmente, a lã fina apresenta um número maior de ondulações por polegada, como ocorre na raça Merino, que pode apresentar até 30 ondulações (Gallagher, 1969). No caso da raça Pantaneira, a ausência de *crimps* (ondulações) é característica típica de lãs médias e grossas, nas quais o maior diâmetro das fibras está associado a menor frequência ou mesmo ausência de *crimp* (Zhang et al., 2017).

5.1.5 Diâmetro das fibras

O diâmetro médio das fibras obtido neste estudo foi de 31,12 μm , com amplitude de 27,4 a 34,5 μm , determinado pelo método Airf-Flow (IWTO-6), conforme apresentado

na Figura 17. Esses valores caracterizam a lã analisada como pertencente a categoria “*Medium Wool*”.

Figura 17 – Diâmetro médio (μm) da fibra de ovinos pantaneiros destacando a heterogeneidade dentro da mesma raça



De longe, a dimensão mais importante na avaliação da qualidade e valor da lã é o diâmetro da fibra. De modo geral, fibras finas ($10 - 25 \mu\text{m}$) são destinadas ao vestuário, devido à suavidade ao toque, enquanto fibras médias ($30 - 34 \mu\text{m}$) e fibras grossas ($> 35 \mu\text{m}$), são utilizadas em aplicações têxteis mais rústicas, como carpetes, por exemplo (Figueiró et al., 1993).

O diâmetro das fibras pode variar entre raças, mas também, dentro de um mesmo animal e até ao longo de uma única fibra, o que demonstra a influência de fatores como sexo, idade, nutrição e condições ambientais (Babu, 2015).

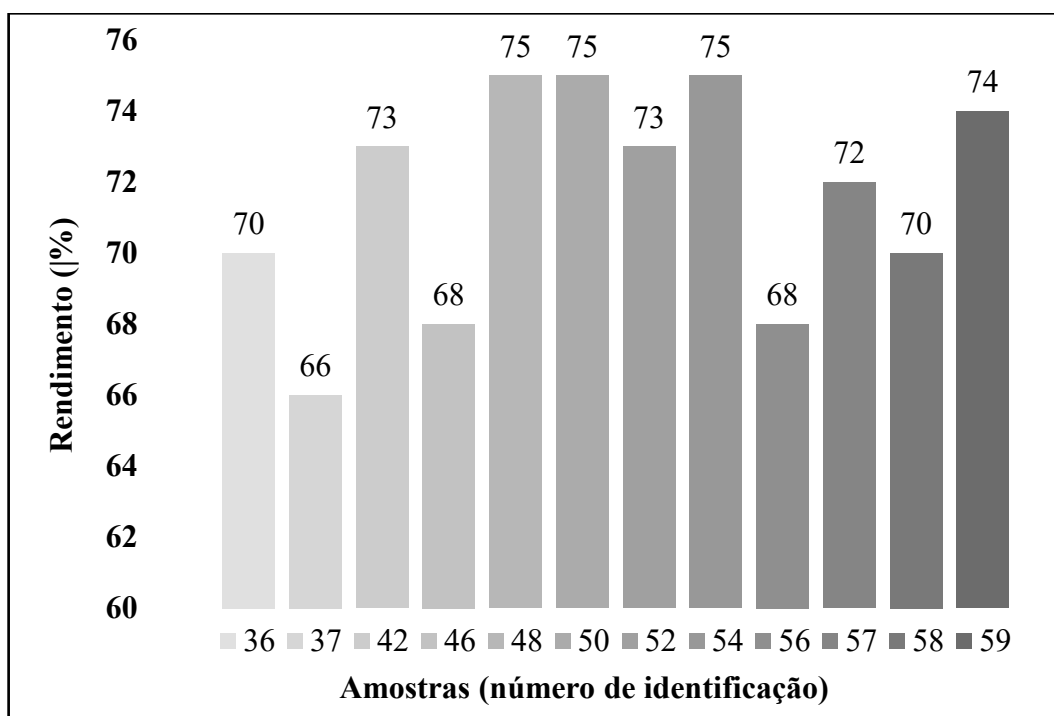
Além do valor médio, parâmetros como fator de conforto e fator de espinhos complementam a análise. Isso se dá devido o fator de conforto ser definido pela porcentagem de fibras com diâmetro inferior a $30 \mu\text{m}$, consideradas “não perceptíveis” pelos receptores de dor da pele humana, devendo atingir pelo menos 95% para que a lã seja adequada ao contato direto com a pele. Já o fator de espinhos representa a proporção de fibras com diâmetro acima de $30 \mu\text{m}$, associadas a uma sensação de aspereza (Wyrostek; Czyż; Hapka, 2025).

Assim, os resultados obtidos, com média de 31,12 μm , corroboram a classificação da lã avaliada como média, com baixo potencial para uso em vestuário fino, mas com aproveitamento em produtos industriais e rústicos. Esse valor também explica a aspereza identificada na avaliação de suavidade ao toque, uma vez que fibras acima de 30 μm estão associadas a menor conforto cutâneo, reforçando a relação entre diâmetro e percepção tátil discutida anteriormente.

5.1.6 Rendimento

As porcentagens de rendimento da lã após a lavagem são apresentadas na Figura 18.

Figura 18 – Porcentagens de rendimento da lã após lavagem por amostra



O rendimento corresponde ao peso da lã limpa após a remoção das impurezas, que pode ser expresso em porcentagem. Na raça de ovinos avaliada, o rendimento médio ao lavado foi de 71,58%, com amplitude de 66 a 75%, o que demonstra heterogeneidade entre os ovinos da mesma raça (Liyew; Adamu, 2023).

A lavagem remove a maior parte da gordura, cera e sujeira das fibras de lã, embora não remova completamente a matéria vegetal (Memon; Wang; Langat, 2018). A perda média de 28% observada, pode estar relacionada à presença de impurezas e a quantidade de lanolina, que varia entre raças de ovinos (Iliev; Staykova; Tsonev, 2024). Apesar do

rendimento acima de 70% ser considerado alto e desejável pois significa menor desperdício no beneficiamento.

5.2 Avaliação física dos materiais constituintes da telha de concreto

5.2.1 Massa específica do cimento

A massa específica do cimento foi determinada conforme a NBR 16605 (ABNT, 2017). Tabela 4 apresenta a quantidade de material utilizada no ensaio e o valor obtido para a massa específica a partir da técnica aplicada.

Tabela 4 – Resultados do ensaio de massa específica do cimento

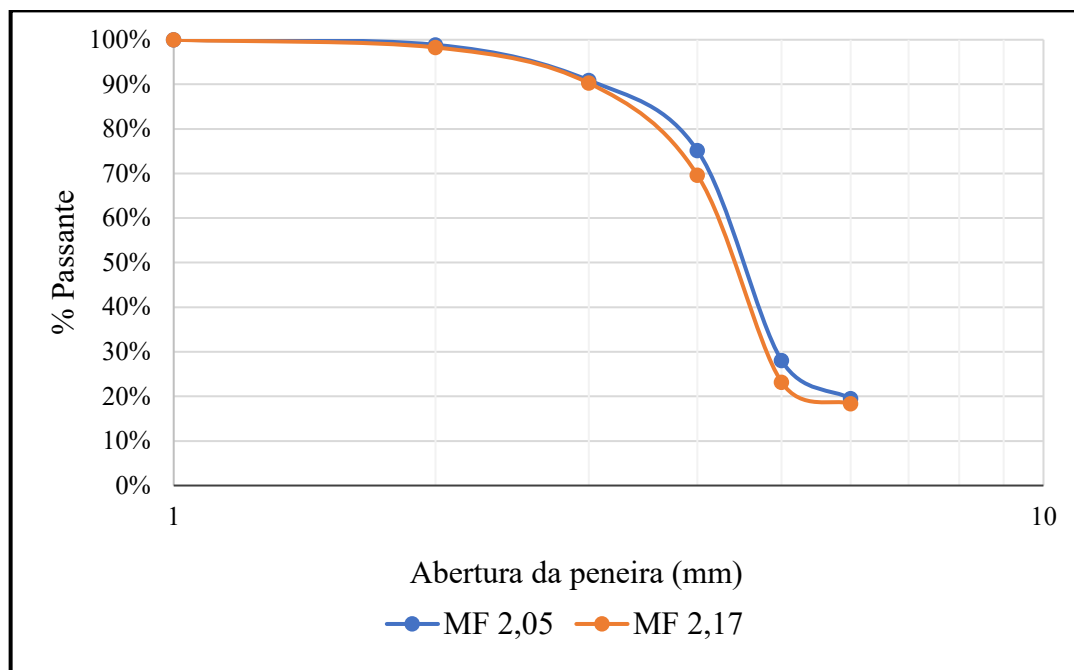
Material	Massa ensaiada (g)	Volume deslocado (cm ³)	Massa específica (g/cm ³)
Cimento	60	19,2	3,125

O resultado encontrado para a massa específica do cimento foi de 3,125 g/cm³, valor muito próximo ao relatado na literatura (3,10 a 3,15 g/cm³) (Chan; Aziz; Ghazali, 2022; Helsel; Ferraris; Bentz, 2016; Saha et al., 2021). Esse resultado confirma a adequação do material empregado e assegura a confiabilidade do ensaio conforme a norma NBR 16605 (ABNT, 2017).

5.2.2 Análise granulométrica e módulo de finura

A análise granulométrica do agregado miúdo está apresentada na Figura 19. O gráfico semilogarítmico descreve duas curvas de distribuição de partículas mal graduadas para os dois módulos de finura (MF) da areia.

Figura 19 – Distribuição granulométrica de partículas de dois módulos de finura de areia em gráfico semilogarítmico



Para realização do ensaio, o agregado miúdo foi levado em diferentes tamanhos de peneiras de malhas 4,8, 2,4, 1,2, 0,6, 0,3 e 0,15 mm. A partir da curva de distribuição de tamanho de partículas, foram calculados os módulos de finura de 2,05 e 2,17, que enquadram o material na classificação de areia fina, conforme a faixa típica de 2,0 a 2,20 (ABNT, 2022). Observa-se que a curva granulométrica se concentra entre 0,15 mm e 4,8 mm, o que indica um material uniforme, com distribuição limitada de tamanho de grãos.

No caso das telhas de concreto, a granulometria do agregado miúdo exerce influência direta sobre as propriedades de absorção e impermeabilidade. Uma distribuição granulométrica adequada favorece o preenchimento de vazios na massa, resultando em menor porosidade e, conseqüentemente, melhores desempenhos de absorção e impermeabilidade (Warda; Munaz, 2012).

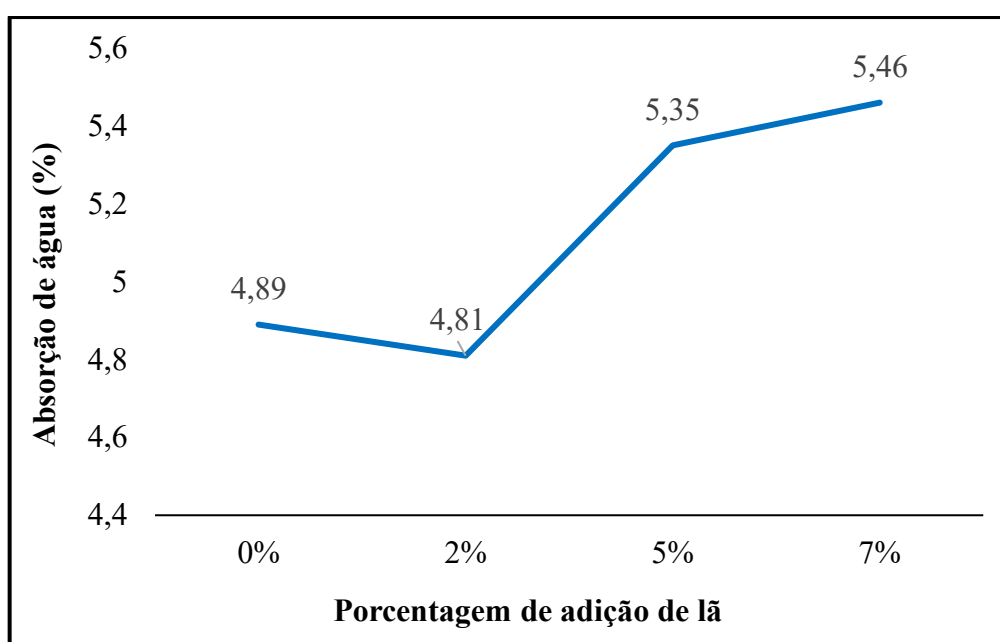
Entretanto, a predominância de partículas finas como o resultado deste estudo, contribui para uma superfície mais lisa nas telhas, além de melhorar a trabalhabilidade da argamassa, e, contribuir em uma redução da condutividade térmica, já que misturas mais porosas (com finos predominantes) podem aprisionar mais ar, colaborando para o isolamento térmico (Haddad et al., 2020; Lyu et al., 2022; Maurício Bremm; Wrobel Straub, 2018).

5.3 Caracterização Física, Mecânica e Térmica das Telhas de Concreto

5.3.1 Absorção de água

Os resultados do ensaio de absorção de água para as amostras de telhas de concreto traço referência (0%) e traços com incorporação de 2%, 5%, 7% de lã de ovinos, são apresentados na Figura 20.

Figura 20 – Gráfico dos resultados do ensaio de absorção nas telhas de concreto traço referência (0%) e traços com incorporação de 2%, 5% e 7% de incorporação de lã de ovinos pantaneiros



Os resultados de absorção de água são fundamentais para entender a porosidade e capacidade de retenção de água em concretos e argamassas, propriedades que influenciam diretamente sua durabilidade e resistência mecânica (Mehta; Monteiro, 2013; Neville, 2012).

Observa-se que todas as amostras atenderam ao limite máximo de absorção de água de 10%, estabelecido pela ABNT NBR 13858-2/2009. Nota-se, ainda, que a telha de concreto com incorporação de 2% de lã de ovinos pantaneiros apresentou o menor valor de absorção (4,81%), inferior ao do traço referência (4,89%). Essa redução indica uma matriz mais densa e menos permeável, possivelmente devido à ação das fibras na redistribuição dos poros (Alyousef et al., 2022a; Lima et al., 2025). Esse comportamento corrobora com os resultados do ensaio de resistência à flexão, no qual o traço com 2% de lã apresentou o melhor desempenho. Logo, entende-se que a menor absorção de água, associada a possível

maior densidade e menor porosidade da telha, contribuiu para o aumento da resistência mecânica observado neste estudo.

Quando dosagens de fibras de mais de 2% foram adicionadas, a absorção de água aumentou ligeiramente. Os resultados para as telhas de concreto com a incorporação de 5% e 7% de lã de ovinos pantaneiros, mostraram que a taxa de absorção de água de 5,35% e 5,46%, devido a distribuição desigual de fibras na matriz cimentícia, o volume de poros aumentou, consequentemente reduzindo a densidade do concreto e fornecendo mais espaço na matriz para absorver água, resultando em uma maior taxa de absorção de água (De Schutter; Audenaert, 2004; Shawnim; Mohammad, 2019).

5.3.2 Impermeabilidade

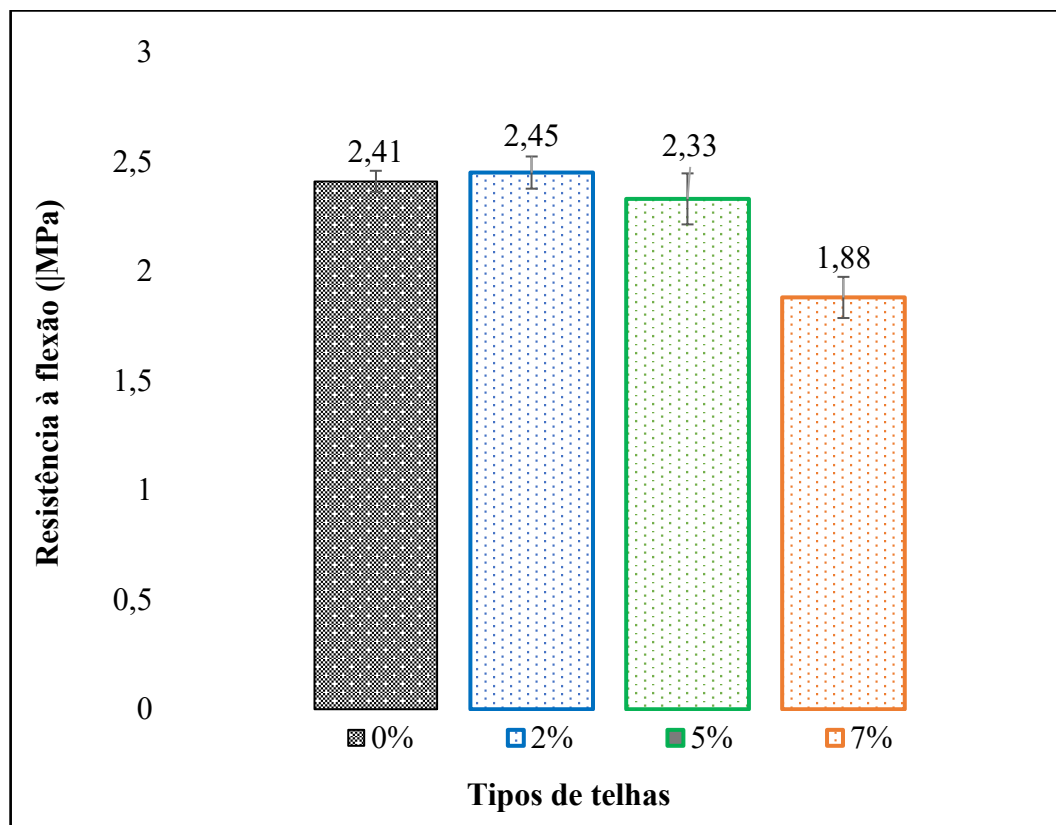
Após 24 horas de ensaio, nenhuma das telhas de concreto apresentou formação ou passagem de água para a face inferior das amostras, atendendo aos requisitos da ABNT NBR 13858-2/2009. Todas as amostras permaneceram livres de umidade em suas superfícies internas, o que evidencia a boa impermeabilidade característica das telhas de concreto (Carvalho Eugênio et al., 2021b).

Esse resultado também pode estar relacionado à aplicação do hidrorrepelente na superfície superior das telhas durante o processo industrial de produção, o que potencializa a resistência à penetração de água e contribui para a estanqueidade observada em todas as amostras. Mesmo com o aumento gradual do teor de lã e a elevação dos valores de absorção, principalmente na telha de concreto com incorporação de 7% de lã de ovinos pantaneiros, o desempenho quanto à impermeabilidade não foi afetado.

5.3.3 Ruptura à flexão

Na Figura 21 são apresentados os resultados da carga de ruptura à flexão das telhas de concreto referentes ao traço referência (0%) e aos traços com incorporação de 2%, 5% e 7% de lã de ovinos pantaneiros, avaliados aos 28 dias.

Figura 21 – Comparação da resistência à flexão aos 28 dias das telhas de concreto: traço referência (0%) e traços com 2%, 5% e 7% de lã de ovinos pantaneiros



Os valores médios de carga máxima de ruptura à flexão foram comparados às especificações propostas pela ABNT NBR 13858-2/2009, que estabelece resistência mínima à flexão de 2,4 MPa para telhas de concreto onduladas produzidas pelo mesmo processo utilizado neste estudo.

As telhas de concreto com 2% de lã de ovinos, apresentou o melhor desempenho, com 2,45 MPa, o que representa um aumento de 1,70% em relação ao traço referência (2,41 MPa). Esse resultado era esperado, uma vez que as fibras de lã de ovinos possuem potencial para formar compósitos mais dúcteis, além de atuarem como pontes entre as superfícies de fissuras nos estágios pós fissuração (Lakshmanan, 2022b).

Resultados semelhantes de aumento de resistência à flexão com a incorporação de até 2% de fibras de lã de ovinos também foram observados (Ahmad Wani; Ul Rehman Kumar, 2021b; Alyousef et al., 2022c; Cardinale et al., 2017). Além disso, outras fibras naturais também demonstraram ganhos expressivos, como as fibras de sisal, eucalipto e banana, que elevaram a resistência em 88, 82 e 66%, respectivamente, em relação à argamassa de referência (Savastano; Warden; Coutts, 2005). De modo semelhante, fibras de arroz e bambu também contribuíram para acréscimos de 102,7% (Darsana et al., 2016b;

Subashi De Silva et al., 2022b). Entre as fibras de origem animal, pelos de porcos incorporados em argamassas promoveram aumento de aproximadamente 16% na resistência à flexão (Araya-Letelier et al., 2017).

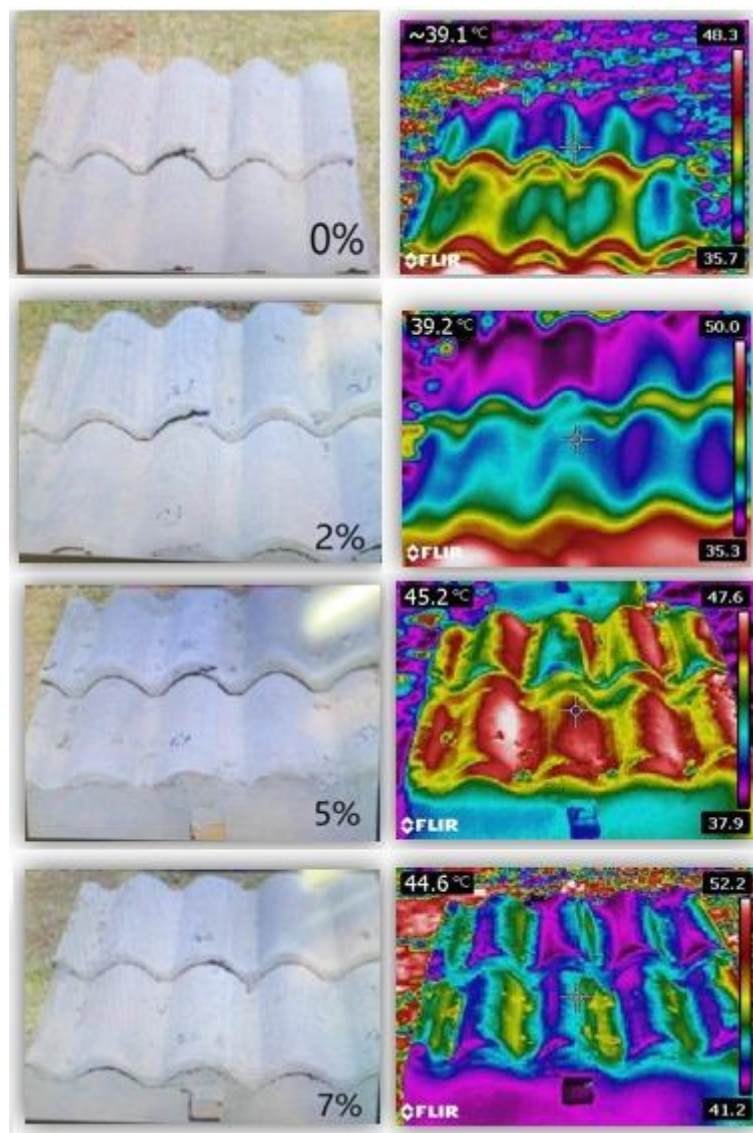
Por outro lado, observa-se que o aumento do teor de lã para 5% e 7% reduziram significativamente a resistência à flexão, com valores de 2,33 MPa e 1,88 MPa, correspondendo a redução de 3,32% e 22%, respectivamente, em relação ao traço piloto. Ambos os valores são inferiores ao especificado pela norma. Essa queda pode estar relacionada à distribuição não uniforme das fibras, ao aumento da porosidade, à formação de microfissuras e a baixa aderência fibra matriz, além da tendência de aglomeração de fibras em teores elevados (Ahmad Wani; Ul Rehman Kumar, 2021a; Alyousef et al., 2022a; Fantilli; Sicardi; Dotti, 2017).

Segundo (Mehta; Monteiro, 2013), a incorporação de fibras naturais em matriz cimentícia, reduz a trabalhabilidade da mistura, sendo difícil dispersar grandes volumes de fibras devido ao seu agrupamento em novelos. Ainda, no caso da lã, deve-se considerar a possível degradação das fibras pela reação com os álcalis presentes na matriz cimentícia, o que compromete a durabilidade e a resistência mecânica (Alyousef et al., 2020; Józwiak-Niedźwiedzka; Fantilli, 2020; Mohammadhosseini et al., 2020).

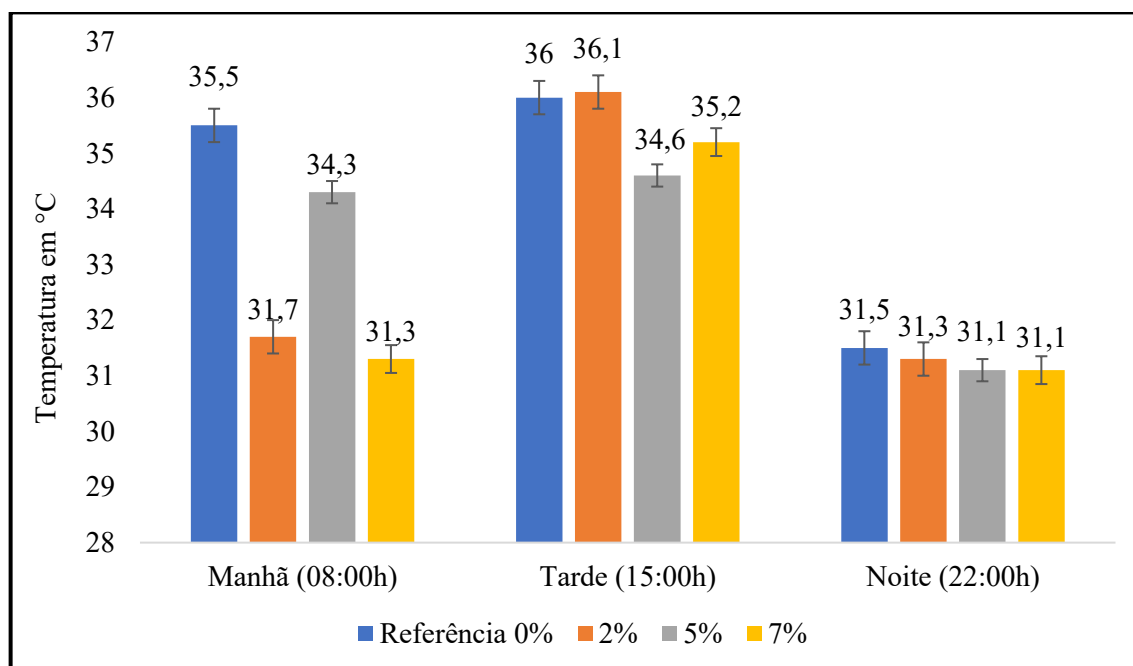
5.3.4 Desempenho térmico - Transmitância

As temperaturas superficiais das telhas foram aferidas com o auxílio de uma câmera termográfica durante três dias consecutivos, durante o período de inverno, em três horários distintos: 08:00h, representando o período da manhã; 15:00h, referente ao período da tarde; e 22:00h, correspondente ao período noturno. As medições foram realizadas em diferentes pontos previamente estipulados na superfície das telhas, de modo a garantir a representatividade dos resultados e possibilitar a comparação entre os diferentes teores de lã incorporados. Esse procedimento permitiu avaliar as variações térmicas ao longo do ciclo diário de exposição solar, bem como identificar diferenças de comportamento térmico entre os protótipos. A Figura 22 apresenta exemplos das medições obtidas com a câmera térmica, destacando a distribuição espacial das temperaturas superficiais.

Figura 22 – Fotografias e termografias das telhas de concreto com diferentes teores de adição de lã de ovinos pantaneiros (0%, 2%, 5% e 7%)



A análise dos resultados evidencia que a incorporação de fibras de lã ovinos pantaneiros em telhas de concreto influencia significativamente o desempenho térmico dos protótipos. As medições mostraram que telhas com teores de 2%, 5% e 7% de lã foram capazes de reduzir a temperatura interna em relação à telha referência (0%), sobretudo nos períodos da manhã e da noite, conforme apresentado na Figura 23. Esse comportamento pode ser explicado pela estrutura fibrosa da lã, que, devido à sua conformação ondulada e à elevada porosidade, favorece a formação de bolsas de ar. Esse ar aprisionado funciona como isolante térmico, diminuindo a condutividade efetiva do compósito. Tal efeito já foi relatado na literatura em estudos envolvendo fibras vegetais e animais, que apontam para a redução da transmitância térmica em compósitos cimentícios reforçados com fibras naturais (Asdrubali; Dotti; Moretti, 2015; Silva; Martins; Oliveira, 2022).

Figura 23 – Temperatura média interna dos protótipos analisados

Comparando os resultados encontrados na Figura 23, os resultados obtidos se aproximam de estudos que investigaram fibras de tamareira em matrizes cimentícias e argilosas, os quais demonstraram que a adição dessas fibras reduziu de forma significativa a condutividade térmica das misturas, alcançando valores inferiores a $0,1 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ em teores mais elevados (Belakroum et al., 2018). Esse paralelo reforça a hipótese de que o desempenho observado com a lã de ovinos pantaneiros não é um caso isolado, mas segue uma tendência já consolidada na literatura de materiais compósitos com resíduos fibrosos. A utilização de fibras naturais de diferentes origens, como juta, cânhamo e sisal, também tem sido explorada com resultados similares, confirmando o potencial de substituição parcial de materiais convencionais por recursos renováveis (Wei; Meyer; Piazza, 2020).

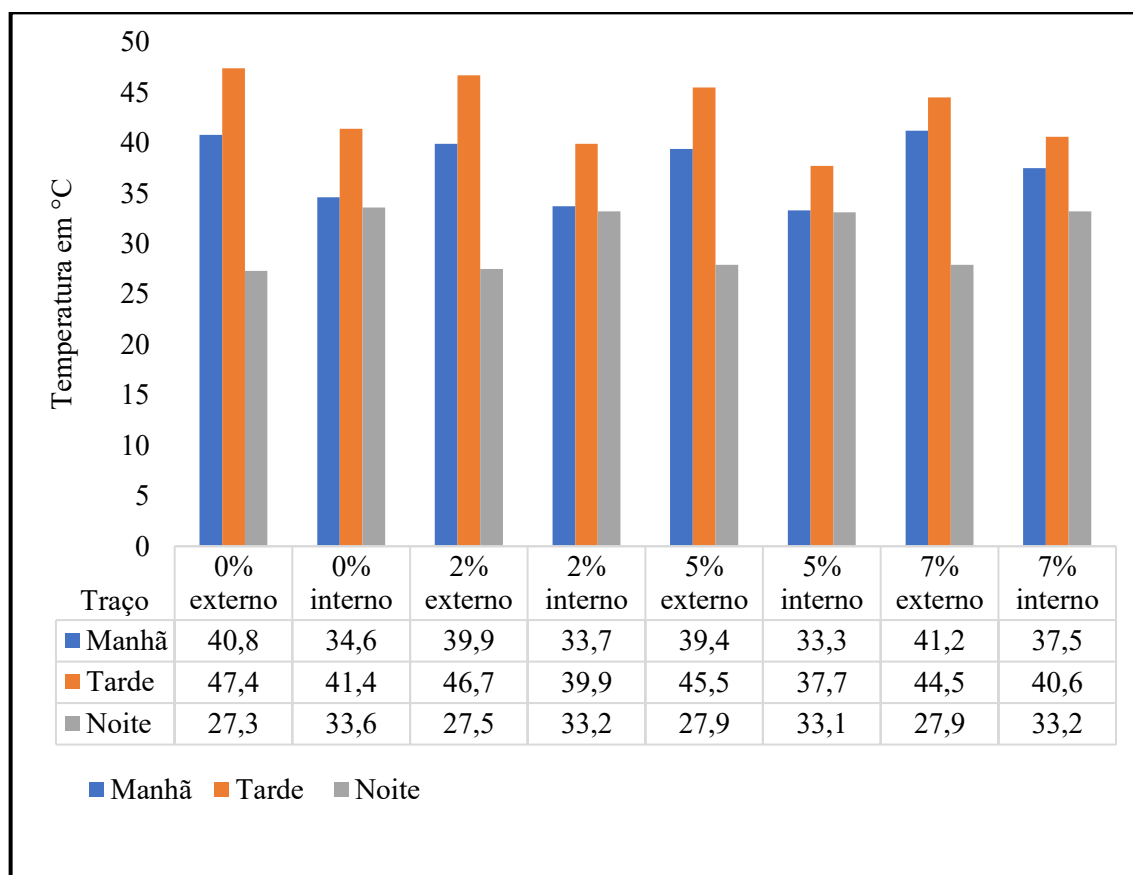
No período da tarde, quando a radiação solar é mais intensa, as diferenças entre as telhas foram menos expressivas, ainda que a telha com 5% de lã tenha apresentado o menor valor absoluto de temperatura interna ($34,6 \text{ }^{\circ}\text{C}$). Esse resultado sugere que há uma fração ótima de fibras que equilibra a redução da condutividade com a manutenção da integridade física da telha. A literatura aponta que a melhoria no desempenho térmico tende a atingir um platô a partir de um determinado teor de fibras, não resultando em ganhos adicionais significativos e, em alguns casos, comprometendo propriedades mecânicas e de durabilidade (Silva; Martins; Oliveira, 2022; Papadopoulos, 2005). Assim, é possível inferir que o teor de

5% de lã representa um ponto de equilíbrio relevante entre desempenho térmico e características construtivas adequadas observadas nos demais ensaios apresentados.

Do ponto de vista do conforto térmico, as reduções registradas de até 4,2 °C nos ambientes internos cobertos com telhas de lã têm grande relevância, especialmente em climas tropicais e subtropicais. Estudos apontam que diferenças dessa magnitude podem diminuir a demanda por climatização artificial, contribuindo para o conforto térmico adaptativo e a eficiência energética de edificações (Nunes; Silva; Souza, 2020; Korjenic; Korjenic; Horn, 2011). Ademais, os resultados obtidos reforçam a contribuição da pesquisa para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), em especial o ODS 7 (energia limpa e acessível) e o ODS 11 (cidades e comunidades sustentáveis), ao propor uma solução inovadora que alia o aproveitamento de resíduos regionais ao aumento da eficiência térmica de elementos construtivos. Esses materiais inovadores oferecem o potencial de aumentar o conforto térmico em edifícios, reduzir o consumo de energia e mitigar as emissões de gases de efeito estufa (Benallel, Tilioua e Garoum, 2024).

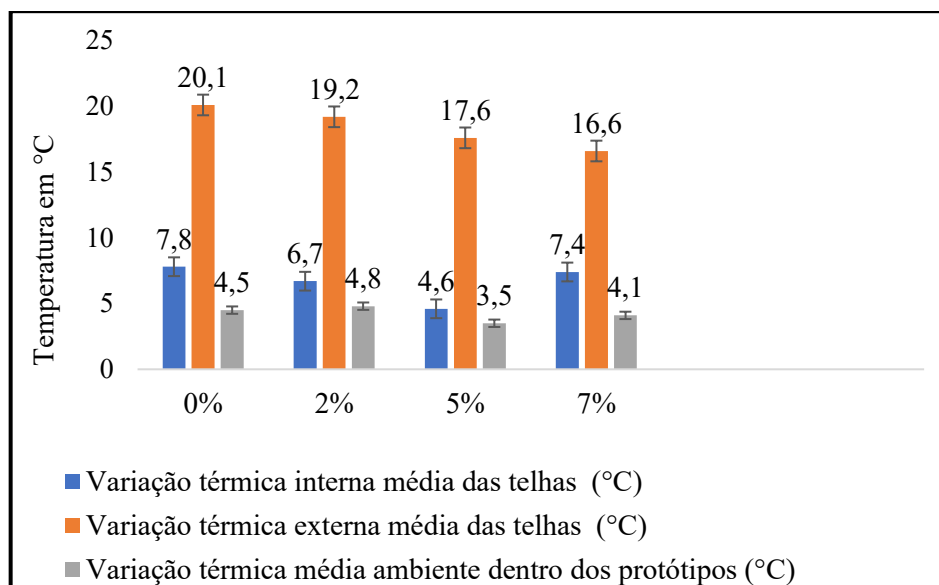
A Figura 24 apresenta as temperaturas registradas nas superfícies externas e internas das telhas nos diferentes períodos do dia. Observa-se que, em todos os traços, a superfície externa alcança temperaturas mais elevadas devido à incidência direta da radiação solar, com valores médios máximos entre 44 e 47 °C no período da tarde. Já as superfícies internas apresentaram valores sistematicamente menores, indicando que parte significativa do calor foi atenuada pela espessura e composição das telhas. Essa diferença é particularmente notável para a telha com 5% de lã, que registrou 45,5 °C na face externa e apenas 37,7 °C na face interna, evidenciando uma barreira térmica mais eficaz. Esse comportamento reforça a hipótese de que a presença de fibras de lã aumenta a resistência térmica do compósito, criando caminhos de condução mais longos e zonas de ar aprisionado, que dificultam a propagação do calor (Asdrubali; Dotti; Moretti, 2015; Silva; Martins; Oliveira, 2022).

Figura 24 – Temperatura média da face de cima e da face de baixo da telha dos protótipos analisados



Outro aspecto relevante identificado no gráfico da Figura 24 é a ocorrência de inversão térmica nos períodos da manhã e da noite, quando as temperaturas internas das telhas em alguns casos superaram as externas. Esse fenômeno sugere que as telhas com maior teor de fibras apresentam maior inércia térmica, retardando a dissipação do calor acumulado durante o dia e mantendo temperaturas internas mais elevadas por mais tempo. Tal característica está em consonância com estudos de compósitos fibrosos e de coberturas de alta massa térmica, que apontam para a capacidade de suavizar oscilações térmicas e deslocar o pico de calor para períodos menos críticos do dia (Belakroum et al., 2018; Papadopoulos, 2005). Esse comportamento, embora prolongue o aquecimento noturno, pode ser vantajoso em estratégias de conforto adaptativo ao reduzir a amplitude térmica diária dentro dos ambientes.

Neste sentido, ao analisar os resultados da variação térmica tanto na face externa, interna e no interior dos protótipos, observa-se que a adição de lã ovina nos compósitos cimentícios promoveu reduções significativas na variação térmica das telhas quando comparadas ao traço referência (0% de lã), conforme gráfico apresentado na Figura 25.

Figura 25 - Variação térmica interna, externa e ambiente dos protótipos analisados

Considerando a variação térmica média na face interna, o teor de 5% de lã apresentou a maior eficiência, reduzindo a amplitude térmica em aproximadamente 41,0% em relação a referência (de 7,8 °C para 4,6 °C). O teor de 2% resultou em uma redução de 14,1%, enquanto as telhas com 7% de lã apresentaram desempenho inferior, com apenas 5,1% de redução. Já na face externa, a variação térmica diminuiu progressivamente com o aumento da fração de lã, atingindo reduções de 4,5%, 12,4% e 17,4% para os teores de 2%, 5% e 7%, respectivamente. Esses resultados corroboram estudos recentes que destacam o potencial de fibras naturais na atenuação das trocas térmicas em matrizes cimentícias, principalmente pela formação de micro cavidades e pela baixa condutividade intrínseca das fibras (Ferreira et al., 2021; Li et al., 2022).

No ambiente interno dos protótipos, observou-se uma tendência semelhante. O teor de 5% de lã foi novamente o mais eficiente, com redução da variação térmica em 22,2% em relação ao traço de referência (de 4,5 °C para 3,5 °C). Já os teores de 2% e 7% resultaram em variações internas de 4,8 °C e 4,1 °C, correspondendo a um aumento de 6,7% e uma redução de 8,9%, respectivamente. Esses achados indicam que a adição de fibras de lã ovina exerce efeito positivo no desempenho termoacústico, embora o desempenho ótimo ocorra em proporções intermediárias (5%). Essa tendência está alinhada com a literatura, que aponta que teores excessivos de fibras podem comprometer a compactação e a homogeneidade da matriz, reduzindo a eficiência do isolamento (Zhang et al., 2020; Tavares et al., 2023). Assim, a incorporação controlada de fibras naturais demonstra elevado potencial para a concepção de materiais sustentáveis com propriedades de conforto térmico superiores.

Os valores de transmitância térmica calculados para as telhas de concreto com diferentes teores de lã de ovinos estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Valores de transmitância térmica (U) das telhas de concreto com diferentes teores de lã de ovinos

Teor de lã	K_{ef} (W/m·K)	R_{cond}/k_{ef} (m²K/W)	R_{tot} (m²K/W)	U (W/m²K)
0%	1,6000	0,0156	0,1856	5,387
2%	1,3744	0,0182	0,1882	5,314
5%	0,9440	0,0265	0,1965	5,089
7%	1,5184	0,0165	0,1865	5,363

Nota: k_{ef} - condutividade térmica efetiva do material ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$);

espessura e condutividade;

R_{tot} - resistência térmica total ($m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$), considerando resistências superficiais internas e externas;

R_{cond} - resistência térmica por condução da telha ($m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$), calculada pela razão entre

U - Transmitância térmica ($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$), inverso da resistência total.

Observa-se que a telha de referência, sem adição de fibras (0%), apresentou coeficiente U de aproximadamente $5,39 W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$. A incorporação de fibras de lã resultou em reduções de transmitância em todos os traços avaliados, com destaque para o teor de 5%, cuja transmitância calculada foi $5,09 W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$, correspondendo a uma diminuição relativa de 5,5% em comparação ao traço de referência. Nos teores de 2% e 7%, os valores obtidos foram $5,31 W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ e $5,36 W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$, respectivamente, indicando reduções modestas, inferiores a 1,5%. Esses resultados evidenciam a existência de um teor ótimo de fibras próximo a 5%, no qual se obtém maior eficiência térmica, possivelmente devido à formação de micro bolsas de ar na matriz cimentícia e ao aumento da porosidade efetiva do compósito, enquanto teores inferiores ou superiores não promovem ganhos significativos de isolamento.

Resultados semelhantes têm sido reportados em estudos recentes que investigam a adição de fibras naturais em compósitos cimentícios. Fiore et al. (2019) demonstraram que a incorporação de fibras de lã em argamassas reduziu a condutividade térmica do material, embora acompanhada de diminuição da resistência mecânica. Em tijolos cerâmicos com inserção de lã, observou-se melhora de até 41% no desempenho térmico interno, dependendo da quantidade de fibra adicionada, confirmando o papel da lã como agente redutor de condutividade (Gowda et al., 2023). De forma semelhante, pesquisas sobre blocos de concreto com adição de até 5% de lã indicaram condutividades significativamente menores em comparação ao compósito sem fibras, reforçando a hipótese de que teores intermediários proporcionam o melhor compromisso entre desempenho térmico e propriedades mecânicas (Belfiore et al., 2021).

6. Conclusões

As fibras de lã de ovinos constituem um recurso natural sustentável, caracterizado pela fácil reciclagem, baixa emissão de carbono, biodegradabilidade e potencial de eficiência energética. Assim, o presente estudo avaliou a viabilidade técnica da incorporação de fibras de lã de ovinos pantaneiros em telhas de concreto, propondo uma nova aplicação para esse material residual. Foram analisadas as propriedades físicas, mecânicas e térmicas das telhas produzidas com diferentes teores de fibra, a fim de verificar o desempenho e o potencial de uso desse compósito na construção civil sustentável.

A caracterização da lã de ovinos pantaneiros indicou um diâmetro médio de 31,12 μm , por meio do método Air-Flow (IWTO – 6), classificando-a como uma fibra de espessura média. Essa característica, associada a textura áspera, coloração amarelada e a ausência de ondulações, limita seu uso em produtos têxteis finos, porém, evidencia seu potencial para aplicação na construção civil. Fibras com diâmetro nessa faixa tendem a apresentar maior rigidez e resistência, favorecendo a aderência mecânica à matriz cimentícia. O rendimento ao lavado de 71,58% revelou alto teor de impurezas, confirmando tratar-se de um resíduo de baixo valor comercial.

A incorporação da lã nas telhas de concreto influenciou o desempenho físico e mecânico. O traço com 2% de lã, apresentou menor absorção de água (4,81%) e melhor resistência à flexão (2,45 MPa), um aumento de 1,7% comparado ao traço piloto. Esses resultados indicam uma matriz mais densa e homogênea, na qual a presença moderada de fibras atuou como ponte de fissuras e contribuiu para o aumento da resistência. Em contrapartida, teores mais elevados de incorporação de lã (5% e 7%) levaram a um aumento da absorção de água e redução da resistência, possivelmente devido a dispersão irregular e a aglomeração das fibras.

Em relação ao desempenho térmico, a incorporação da lã reduziu a transmitância térmica das telhas de concreto, destacando-se o traço com 5%, que apresentou a menor transmitância (5,09 $\text{W/m}^2\cdot\text{K}$) e maior eficiência na mitigação das variações de temperatura. As medições realizadas nos protótipos demonstraram reduções internas de até 4,2 $^{\circ}\text{C}$, comprovando o potencial isolante das fibras de lã, cuja estrutura porosa e irregular favorece a formação de bolsões de ar.

Portanto, as telhas de concreto com incorporação de lã de ovinos pantaneiros mostraram-se promissoras a melhoria do desempenho térmico e mecânico. Os resultados obtidos neste trabalho corroboram a literatura e confirmam que o uso de fibras naturais, em especial a lã de ovinos pantaneiros, em teor de 2%, constitui uma alternativa tecnicamente

viável para a melhoria do desempenho térmico e mecânico das telhas de concreto, além de representar uma alternativa viável e sustentável para o reaproveitamento desse resíduo.

6.1 Sugestões de trabalhos futuros

Sugere-se para os trabalhos futuros, a avaliação de diferentes métodos físico-químicos de tratamento da lã, com o objetivo de melhorar a aderência fibra – matriz e otimizar o desempenho mecânico do compósito. Outra possibilidade consiste em estudar sistematicamente a influência do comprimento das fibras, avaliando diferentes faixas de tamanho e sua relação direta com propriedades térmicas e mecânicas, uma vez que o comprimento é um parâmetro determinante no mecanismo de ponteamto de fissuras e na dispersão adequada das fibras na matriz.

Considera-se relevante também avaliar o comportamento termoacústico das telhas produzidas, ampliando a compreensão sobre o potencial de isolamento da lã quando aplicada em elementos de cobertura, especialmente em regiões com alta amplitude térmica ou elevados níveis de ruído. Além disso, é recomendável a realização de ensaios de envelhecimento acelerado, simulando ciclos de umidade, temperatura e radiação solar, para analisar o comportamento das telhas em condições próximas às de serviço real e verificar possíveis alterações de durabilidade e estabilidade microestrutural ao longo do tempo.

Por fim, propõe-se a análise por microscopia eletrônica de varredura (MEV) nas fraturas das telhas de concreto, a fim de aprofundar a compreensão sobre a interação entre a matriz cimentícia e as fibras de lã, elucidando mecanismos de aderência, distribuição e ancoragem, o que poderá contribuir para a otimização de formulações futuras.

7. Referências

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 13858-2 - Telhas De Concreto - Parte 2: Requisitos E Métodos De Ensaio**. Brasil, 2009.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR15575-5 - Edificações Habitacionais — Desempenho - Parte 5: Requisitos Para Os Sistemas De Coberturas**. ABNT. Brasil, 2021.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 15220-2 - Desempenho Térmico De Edificações - Parte 2 – Componentes E Elementos Construtivos Das Edificações — Resistência E Transmitância Térmica — Métodos De Cálculo (Iso 6946:2017 Mod)**. Brasil, 2022.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 15220-3 - Desempenho Térmico De Edificações - Parte 3: Zoneamento Bioclimático Por Desempenho**. Brasil, 2024a.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Nbr 15220-1 - Desempenho Térmico De Edificações - Parte 1: Definições, Símbolos E Unidades**. Brasil, 2024b.

ABU-JDAYIL, Basim *et al.* Traditional, state-of-the-art and renewable thermal building insulation materials: An overview. **Construction and Building Materials**, v. 214, p. 709–735, jul. 2019.

AGÊNCIA IBGE. **PIB cresce 1,2% no 2º trimestre de 2022**. Disponível em: <<https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-sala-de-imprensa/2013-agencia-de-noticias/releases/34748-pib-cresce-1-2-no-2-trimestre-de-2022>>. Acesso em: 7 out. 2022.

AGOPYAN, Vahan; JOHN, Vanderley M. **O Desafio da Sustentabilidade na Construção Civil**. 1. ed. São Paulo: [S.n.]. v. 5

AHMAD WANI, Irfan; UL REHMAN KUMAR, Rouf. Experimental investigation on using sheep wool as fiber reinforcement in concrete giving increment in overall strength. **Materials Today: Proceedings**, v. 45, p. 4405–4409, 2021a.

AHMAD WANI, Irfan; UL REHMAN KUMAR, Rouf. Experimental investigation on using sheep wool as fiber reinforcement in concrete giving increment in overall strength. **Materials Today: Proceedings**, v. 45, p. 4405–4409, 2021b.

ALI, Amir; ISSA, Anas; ELSHAER, Ahmed. A Comprehensive Review and Recent Trends in Thermal Insulation Materials for Energy Conservation in Buildings. **Sustainability**, v. 16, n. 20, p. 8782, 11 out. 2024.

ALYAMI, Saleh H. *et al.* Impact of Location and Insulation Material on Energy Performance of Residential Buildings as per Saudi Building Code (SBC) 601/602 in Saudi Arabia. **Materials**, v. 15, n. 24, p. 9079, 19 dez. 2022.

ALYOUSEF, Rayed *et al.* Utilization of sheep wool as potential fibrous materials in the production of concrete composites. **Journal of Building Engineering**, v. 30, p. 101216, jul. 2020.

ALYOUSEF, Rayed *et al.* An Integrated Approach to Using Sheep Wool as a Fibrous Material for Enhancing Strength and Transport Properties of Concrete Composites. **Materials**, v. 15, n. 5, p. 1638, 22 fev. 2022a.

ALYOUSEF, Rayed *et al.* An Integrated Approach to Using Sheep Wool as a Fibrous Material for Enhancing Strength and Transport Properties of Concrete Composites. **Materials**, v. 15, n. 5, p. 1638, 22 fev. 2022b.

ALYOUSEF, Rayed *et al.* An Integrated Approach to Using Sheep Wool as a Fibrous Material for Enhancing Strength and Transport Properties of Concrete Composites. **Materials**, v. 15, n. 5, p. 1638, 22 fev. 2022c.

ARAYA-LETELIER, G. *et al.* Effectiveness of new natural fibers on damage-mechanical performance of mortar. **Construction and Building Materials**, v. 152, p. 672–682, out. 2017.

ATBIR, Aziza *et al.* Physicochemical and thermomechanical performances study for Timahdite sheep wool fibers application in the building's insulation. **Scientific Reports**, v. 13, n. 1, p. 5038, 28 mar. 2023.

BABU, K. M. Natural Textile Fibres. *In: Textiles and Fashion*. [S.l.]: Elsevier, 2015. p. 57–78.

BENTOUMI, L. Impact of thermal insulation on energy consumption in buildings. **Journal of Thermal Engineering**, p. 924–935, 2024.

BRIBIÁN, Ignacio Zabalza; CAPILLA, Antonio Valero; USÓN, Alfonso Aranda. Life cycle assessment of building materials: Comparative analysis of energy and environmental impacts and evaluation of the eco-efficiency improvement potential. **Building and Environment**, v. 46, n. 5, p. 1133–1140, maio 2011.

BRODA, Jan *et al.* Utilisation of waste wool from mountain sheep as fertiliser in winter wheat cultivation. **Journal of Natural Fibers**, v. 20, n. 2, 12 nov. 2023a.

BRODA, Jan *et al.* Sound Absorption of Tufted Carpets Produced from Coarse Wool of Mountain Sheep. **Journal of Natural Fibers**, v. 20, n. 2, 28 nov. 2023b.

CARDELLINO, R. **Importância de las características de la lana**. Montevideo: [S.n.].

CARDELLINO, R. A. Importância das características de lã. **Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária**, p. 23–44, 1979.

CARDINALE, Tiziana *et al.* Thermal and mechanical characterization of panels made by cement mortar and sheep's wool fibres. **Energy Procedia**, v. 140, p. 159–169, dez. 2017.

CARVALHO EUGÊNIO, Tony Matheus *et al.* Study on the feasibility of using iron ore tailing (iot) on technological properties of concrete roof tiles. **Construction and Building Materials**, v. 279, p. 122484, abr. 2021a.

CARVALHO EUGÊNIO, Tony Matheus *et al.* Study on the feasibility of using iron ore tailing (iot) on technological properties of concrete roof tiles. **Construction and Building Materials**, v. 279, p. 122484, abr. 2021b.

CASTRO, Micheline Feitosa *et al.* **Desempenho de Ovinos Pantaneiros oriundos da fazenda Nhumirim-Embrapa Pantanal, Corumbá-MS.** [S.l.: S.n.].

CHAKARTNARODOM, Parinya *et al.* Properties and performance of the basalt-fiber reinforced texture roof tiles. **Case Studies in Construction Materials**, v. 13, p. e00444, dez. 2020.

CHAN, Lek Heng; AZIZ, Zalena Abdul; GHAZALI, Muhamad Azhar bin. The Performance of Lightweight Concrete with Recycled Polyethylene Terephthalate and Polypropylene as Demising Wall. **Environmental and Climate Technologies**, v. 26, n. 1, p. 1323–1336, 1 jan. 2022.

DAMASCENO, F. A. *et al.* Propriedades Físicas, Mecânicas e Térmicas de Telhas de Concreto Fabricadas com Adição de Diferentes Materiais Isolantes. **Revista Engenharia na Agricultura - REVENG**, v. 23, n. 5, p. 406–417, 30 out. 2015.

DARSANA, P. *et al.* Development of Coir-fibre Cement Composite Roofing Tiles. **Procedia Technology**, v. 24, p. 169–178, 2016a.

DARSANA, P. *et al.* Development of Coir-fibre Cement Composite Roofing Tiles. **Procedia Technology**, v. 24, p. 169–178, 2016b.

DE MOURA, Daiele Jerônimo; DO NASCIMENTO, Marcondes Silvério Silvério Sobrinho; GUIMARÃES, Carla Regina Rocha. CONSUMO DE CARNE OVINA NO BRASIL. **REVISTA FOCO**, v. 16, n. 11, p. e3574, 14 nov. 2023.

DE SCHUTTER, G.; AUDENAERT, K. Evaluation of water absorption of concrete as a measure for resistance against carbonation and chloride migration. **Materials and Structures**, v. 37, n. 9, p. 591–596, nov. 2004.

DÉNES, Orsolya; FLOREA, Iacob; MANEA, Daniela Lucia. Utilization of Sheep Wool as a Building Material. **Procedia Manufacturing**, v. 32, p. 236–241, 2019.

DEVENDRAN, P.; KANDASAMY, N.; PANNEERSELVAM, S. Fleece production and wool quality characteristics of Coimbatore sheep. **The Indian Journal of Animal Sciences**, v. 78, n. 4, 7 mar. 2011.

DINIZ, G. S.; CAMPOS, L. C. R. **ESTUDO DA UTILIZAÇÃO DO TELHADO VERDE EM COMPARAÇÃO AO CONVENCIONAL** Study on the Use of Green Roofs Compared to Conventional Roofs. Rio de Janeiro: [S.n.]. Disponível em: <<https://carluc.com.br/projeto-arquitetonico/tipos-de-coberturas/>>.

FANTILLI, Alessandro P.; SICARDI, Silvio; DOTTI, Francesca. The use of wool as fiber-reinforcement in cement-based mortar. **Construction and Building Materials**, v. 139, p. 562–569, maio 2017.

FIGUEIRÓ, Paulo Roberto Pires *et al.* COMPARAÇÃO ENTRE MÉTODOS SUBJETIVO E OBJETIVO QUANTO A DETERMINAÇÃO DO DIÂMETRO DA LÃ. **Ciência Rural**, v. 23, n. 3, p. 369–373, dez. 1993.

FUCHENO, J. M. USO DE ENERGIAS RENOVÁVEIS COMO FACTOR ESSENCIAL DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL NA PROVÍNCIA DA LUNDA SUL. **Revista Eletrônica Kulongesa - TES (Tecnologia - Educação - Sustentabilidade)**, v. 2, p. 24–34, 2020.

GABRYŚ, Tobiasz; FRYCZKOWSKA, Beata. Using Sheep's Wool as an Additive to the Growing Medium and its Impact on Plant Development on the Example of *Chlorophytum comosum*; **Journal of Ecological Engineering**, v. 23, n. 6, p. 205–212, 21 abr. 2022.

GAD-ALLAH, Aymen. Effect of Wool Handle Grade of Barki Sheep Wool on Its Manufacturing Characteristics. **Alexandria Science Exchange Journal**, v. 44, n. 4, p. 527–538, 30 dez. 2023.

GALLAGHER, J. R. The Crimp/Diameter Relationship in an Australian Merino Flock. **Textile Research Journal**, v. 39, n. 9, p. 883–884, 1 set. 1969.

GITEA, Manuel Alexandru *et al.* A Sustainable Approach Based on Sheep Wool Mulch and Soil Conditioner for *Prunus domestica* (Stanley Variety) Trees Aimed at Increasing Fruit Quality and Productivity in Drought Conditions. **Sustainability**, v. 16, n. 17, p. 7287, 24 ago. 2024.

GIVISIEZ, Gustavo Henrique Naves; OLIVEIRA, Elzira Lúcia de. **DEMANDA FUTURA POR MORADIAS DEMOGRAFIA, HABITAÇÃO E MERCADO** Ministério das CIDADES. 1. ed. Niterói: [S.n.].

GUGGEMOS, Angela Acree; HORVATH, Arpad. Comparison of Environmental Effects of Steel-and Concrete-Framed Buildings. **Journal of Infrastructure Systems**, v. 11, p. 93–101, 1 jun. 2005.

HADDAD, Lucimar Dias de Oliveira *et al.* Influence of particle shape and size distribution on coating mortar properties. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 9, n. 4, p. 9299–9314, jul. 2020.

HELMAN, M. B. **Ovinotecnia: Crianza - Mejora - Manejo y Administración**. 2ª ed. [S.l.]: Libreria El Ateneo Editorial, 1965. v. 2

HELSEL, Michelle A.; FERRARIS, Chiara F.; BENTZ, Dale. Comparative Study of Methods to Measure the Density of Cementitious Powders. **Journal of Testing and Evaluation**, v. 44, n. 6, p. 2147–2154, 1 nov. 2016.

HENSEN, Jan L. M. ;; LAMBERTS, Roberto. **Building Performance Simulation for Design and Operation**. 2ª ed. [S.l.: S.n.]. v. a

HETIMY, Sulava *et al.* Exploring the potential of sheep wool as an eco-friendly insulation material: A comprehensive review and analytical ranking. **Sustainable Materials and Technologies**, v. 39, p. e00812, abr. 2024.

IBGE. Produção da Pecuária Municipal 2023 PPM. **Prod.Pec.munic.**, v. 51, n. ISSN 0101-4234, p. 1–12, 2023.

IEA INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Buildings A source of enormous untapped efficiency potential**. Disponível em: <<https://www.iea.org/topics/buildings>>. Acesso em: 12 nov. 2022.

ILIEV, Margarit; STAYKOVA, Genoveva; TSONEV, Todor. Assessment of the live weight and wool productivity of the Karnobat Fine Fleece sheep breed. **Bulgarian Journal of Animal Husbandry**, v. 61, n. 1, p. 3–10, 26 fev. 2024.

JAGANNADHA RAO, K. *et al.* Optimizing roofing efficiency: utilizing GGBS and coir fibre in cement tile production. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, v. 1409, n. 1, p. 012014, 1 nov. 2024.

JÓŹWIAK-NIEDŹWIEDZKA, Daria; FANTILLI, Alessandro P. Wool-Reinforced Cement Based Composites. **Materials**, v. 13, n. 16, p. 3590, 14 ago. 2020.

KHAN, Nusrat Nabi *et al.* Wool quality traits of sheep reared in Karnah tehsil of J&K. **Journal of Entomology and Zoology Studies**, v. 9, n. 2, p. 255–257, 1 mar. 2021.

KLARIĆ, Sanela *et al.* Building Thermal Insulation Material Based on Sheep Wool. In: *[S.l.: S.n.]*. p. 698–711.

LAKSHMANAN, Ammayappan. Physical and chemical properties of wool fibers. In: **Wool Fiber Reinforced Polymer Composites**. *[S.l.]*: Elsevier, 2022a. p. 49–71.

LAKSHMANAN, Ammayappan. Physical and chemical properties of wool fibers. In: **Wool Fiber Reinforced Polymer Composites**. *[S.l.]*: Elsevier, 2022b. p. 49–71.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. R. **Eficiência energética na arquitetura**. 3ª ed. Rio de Janeiro: *[S.n.]*.

LIMA, Natália Garcia de *et al.* Analysis of the physical and mechanical properties of mortar with the incorporation of natural wool fiber from Pantanal sheep. **Caderno Pedagógico**, v. 22, n. 5, p. e14946, 21 mar. 2025.

LIYEW, Erkihun Zelalem; ADAMU, Biruk Fentahun. Investigation of wool fiber yield and moisture regain properties of four Ethiopian sheep breeds. **Tropical Animal Health and Production**, v. 55, n. 3, p. 156, 12 jun. 2023.

LOUREIRO, L. S. S. M.; EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. Resenha Mensal do Mercado de Energia Elétrica. **180**, 2022.

LUCON, Oswaldo *et al.* **9 Buildings Coordinating Lead Authors: Lead Authors: Contributing Authors: Review Editors: Chapter Science Assistants: tion of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Edenhofer ContentsBuildings. In: Climate Change. *[S.l.: S.n.]***

LV, Liugen *et al.* Dynamic characteristics of convection heat and radiation heat on building surfaces under cyclic heat flow. **Science Progress**, v. 105, n. 1, 1 jan. 2022.

LYU, Kai *et al.* Relationship between fine aggregate size and the air void system of six mortars: I. Air void content and diameter distribution. **Cement and Concrete Composites**, v. 131, 1 ago. 2022.

MAIA PEDERNEIRAS, Cinthia; VEIGA, Rosário; DE BRITO, Jorge. Rendering Mortars Reinforced with Natural Sheep's Wool Fibers. **Materials**, v. 12, n. 22, p. 3648, 6 nov. 2019.

MASCARÓ, Juan Luis; MASCARÓ, Lúcia Elvira Raffo. **Incidência Das Variáveis Projetivas E De Construção No Consumo Energético Dos Edifícios**. 2. ed. Porto Alegre: [S.n.].

MAURÍCIO BREMM, Hyago; WROBEL STRAUB, Karen. **ANÁLISE DE VIABILIDADE TÉCNICA DA UTILIZAÇÃO DE TELHAS DE CONCRETO LEVE COM ADIÇÃO DE EPS COMO AGREGADO MIÚDO EM SINOP-MT**. [S.l.: S.n.]. Disponível em: <<http://www.fumec.br/revistas/construindo/index>>.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concrete: Microstructure, Properties and Materials**. 4. ed. [S.l.: S.n.].

MEMON, Hafeezullah; WANG, Hua; LANGAT, Enock Kiptoo. Determination and Characterization of the Wool Fiber Yield of Kenyan Sheep Breeds: An Economically Sustainable Practical Approach for Kenya. **Fibers**, v. 6, n. 3, p. 55, 8 ago. 2018.

MIDOLO, Giusi *et al.* Assessing the mechanical properties of low-quality sheep wool yarn. **Construction and Building Materials**, v. 475, p. 141220, maio 2025.

MOHAMMADHOSSEINI, Hossein *et al.* Durability and thermal properties of prepacked aggregate concrete reinforced with waste polypropylene fibers. **Journal of Building Engineering**, v. 32, p. 101723, nov. 2020.

MONTEIRO, Paulo J. M.; MILLER, Sabbie A.; HORVATH, Arpad. Towards sustainable concrete. **Nature Materials**, v. 16, p. 698–699, 1 dez. 2017.

NASCIMENTO, Emilli Rodrigues do; MORAIS, Denilson Pedro Ferreira de; LOPES, Shara Carvalho. Sustentabilidade na construção civil no Brasil: Uma revisão da literatura. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 14, p. e524111436611, 5 nov. 2022.

NEVILLE, A. M. **Properties of Concrete**. 5. ed. [S.l.: S.n.].

OGUNDIPE, A.; OLORUNNISOLA, Abel O. Effects of Partial Replacement of Cement with Selected Polymers on Sorption and Mechanical Properties of Rattan Cane Fibre-Reinforced Composite Roofing Tiles. *In*: [S.l.: S.n.]. p. 117–127.

OLIVEIRA, Patrick Peres; SOUZA, Guilherme Torres de. INOVAÇÕES E TENDÊNCIAS DE MATERIAIS SUSTENTÁVEIS NA CONSTRUÇÃO CIVIL: UMA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA. **Revista Multidisciplinar do Nordeste Mineiro**, v. 12, n. 3, p. 1–17, 29 nov. 2024.

ONU - ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável no Brasil**. Disponível em: <<https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>>. Acesso em: 4 out. 2022.

ONU, Organização das Nações Unidas; BANCO MUNDIAL; CHAVEZ, Dominic. **ONU prevê que cidades abriguem 70% da população mundial até 2050**. Disponível em: <<https://news.un.org/pt/story/2019/02/1660701#:~:text=Segundo%20a%20ONU%2C%20atualmente%2055,implementando%20processos%20de%20pol%C3%ADticas%20descentralizadas.>>. Acesso em: 12 dez. 2022.

OZEK, Hikmet Ziya. Wool production steps and global trade with recent statistics. *In: The Wool Handbook*. [S.l.]: Elsevier, 2024. p. 25–74.

PARLATO, Monica C. M.; PORTO, Simona M. C.; VALENTI, Francesca. Assessment of sheep wool waste as new resource for green building elements. **Building and Environment**, v. 225, p. 109596, nov. 2022.

PARLATO, Monica C. M.; RIVERA-GÓMEZ, Carlos; PORTO, Simona M. C. Reuse of livestock waste for the reinforcement of rammed-earth materials: investigation on mechanical performances. **Journal of Agricultural Engineering**, 2 fev. 2023.

POMADA, Marta *et al.* Analysis of Thermal Properties of Materials Used to Insulate External Walls. **Materials**, v. 17, n. 19, p. 4718, 26 set. 2024.

POYYAMOZHI, Mukilan *et al.* Elevating thermal comfort with eco-friendly concrete roof tiles crafted from municipal solid waste. **Journal of Building Engineering**, v. 88, p. 109222, jul. 2024.

RIPPON, John A. *et al.* Wool: Structure, Properties, and Processing. *In: Encyclopedia of Polymer Science and Technology*. [S.l.]: Wiley, 2016. p. 1–46.

SAHA, Ashish Kumer *et al.* Non-destructive prediction of strength of concrete made by lightweight recycled aggregates and nickel slag. **Journal of Building Engineering**, v. 33, p. 101614, jan. 2021.

SARMA, Olympica; RATHER, Mubashir Ali; MAURYA, Shivangi. Genetics of Some Wool Traits in Sheep: A Review. **Archives of Current Research International**, v. 24, n. 11, p. 62–73, 28 out. 2024.

SAVASTANO, H.; WARDEN, P. G.; COUTTS, R. S. P. Microstructure and mechanical properties of waste fibre–cement composites. **Cement and Concrete Composites**, v. 27, n. 5, p. 583–592, maio 2005.

SHAWNIM, P.; MOHAMMAD, F. POROSITY, PERMEABILITY AND MICROSTRUCTURE OF FOAMED CONCRETE THROUGH SEM IMAGES. **Journal of Civil Engineering, Science and Technology**, v. 10, n. 1, p. 22–33, 25 abr. 2019.

STECKLING, H. I.; FIGUEIRÓ, P. R. P. Frequência da Coloração Amarela e Resistência ao Lavado em Lãs da raça Corriedale. **Revista Centro Ciências Rurais**, v. 10, n. 4, p. 323–328, 1980.

SUBASHI DE SILVA, G. H. M. J. *et al.* Engineering properties and microstructure of a sustainable roof tile manufactured with waste rice husk ash and ceramic sludge addition. **Case Studies in Construction Materials**, v. 17, p. e01470, dez. 2022a.

SUBASHI DE SILVA, G. H. M. J. *et al.* Engineering properties and microstructure of a sustainable roof tile manufactured with waste rice husk ash and ceramic sludge addition. **Case Studies in Construction Materials**, v. 17, p. e01470, dez. 2022b.

SUPAR, K. *et al.* Partial Replacement of Fine Aggregate Using Waste Materials in Concrete as Roof Tile: A Review. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 1200, n. 1, p. 012008, 1 nov. 2021.

TEIXEIRA, R. S. *et al.* Different ageing conditions on cementitious roofing tiles reinforced with alternative vegetable and synthetic fibres. **Materials and Structures**, v. 47, n. 3, p. 433–446, 16 mar. 2014.

VALCARENGHI, C.; PIOVESAN, A. Z. **Análise das propriedades físicas e mecânicas nas telhas de concreto fabricadas na cidade de Herval d'Oeste.** [S.l.: S.n.].

VIEIRA, G. V. N. Criação de Ovinos. In: EMBRAPA (Org.). **Biblioteca Agronômica Melhoramentos.** São Paulo: [S.n.]. p. 480.

WARDA, Bint Ashraf; MUNAZ, Ahmed Noor. Effects of Aggregate Gradation on Water Permeability of Concrete. **Advanced Materials Research**, v. 488–489, p. 248–252, 15 mar. 2012.

WYROSTEK, Anna; CZYŻ, Katarzyna; HAPKA, Kamila. Evaluation of the Diameter, Heat Resistance, and Absorbability of Sheep Wool Originated from Selected Polish Breeds. **Journal of Natural Fibers**, v. 22, n. 1, 31 dez. 2025.

YOUNG, W. L.; BUTLER, D. A. **Article 3 1-1957 Recommended Citation Recommended Citation McGarryJournal of the Department of Agriculture, Western Australia, Series.** [S.l.: S.n.]. Disponível em: <https://library.dpird.wa.gov.au/journal_agriculture3>.

ZHANG, Lichun *et al.* A comparison of transcriptomic patterns measured in the skin of Chinese fine and coarse wool sheep breeds. **Scientific Reports**, v. 7, n. 1, p. 14301, 30 out. 2017.

ZHOU, H. *et al.* A 57-bp deletion in the ovine KAP6-1 gene affects wool fibre diameter. **Journal of Animal Breeding and Genetics**, v. 132, n. 4, p. 301–307, 17 ago. 2015.