

**Caracterização do desempenho térmico de paredes de taipa de pilão não
estabilizadas**

Isabelle Cabello Araujo

Dissertação apresentada à Escola Superior de Tecnologia e Gestão do
Instituto Politécnico de Bragança para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia da Construção no âmbito da dupla diplomação com a
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Bragança

Setembro de 2021

Caracterização do desempenho térmico de paredes de taipa de pilão não estabilizadas

Isabelle Cabello Araujo

Dissertação apresentada à Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Bragança para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia da Construção no âmbito da dupla diplomação com a Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Orientado por:

Prof^a. Dra. Eduarda Cristina Pires Luso (IPB)

Prof^a. Dra. Ana Briga Sá (UTAD)

Prof. Dr. Wellington Mazer (UTFPR)

Bragança

Setembro de 2021

Com todo o meu amor e dedicação, à minha família.

AGRADECIMENTOS

Esse trabalho é resultado de muita dedicação e representa a conclusão de uma etapa muito importante em minha vida. Por isso, reservo esse espaço para prestar meus agradecimentos a todos que, direta ou indiretamente, me ajudaram nessa conquista.

Primeiramente, gostaria de agradecer à Professora Doutora Eduarda Luso e à Professora Doutora Ana Sá por toda a confiança depositada em mim e pela impecável orientação em todo o projeto. Ao Professor Doutor Wellington Mazer pelo auxílio nesse e em tantos outros projetos.

Ao Professor Doutor Rui Silva, pelos conhecimentos compartilhados durante a investigação. Ao Sr. Otávio, Sr. João, Luísa e Engenheira Hermínia, que estiveram sempre disponíveis para me ensinar a ajudar durante todo o programa experimental.

À Professora Doutora Janine Nicolosi Corrêa, minha primeira mentora e inspiração para a vida toda, por tantos anos de ensinamentos e amizade. Aos Engenheiros Dyego Bertoldi e Luis Rebello, por sempre acreditarem em mim e no meu trabalho.

A todos os meus amigos de Portugal e do Brasil, pelo apoio durante todo o percurso acadêmico. Especialmente à Flávia e à Lize, que estiveram ao meu lado todos os dias no desenvolvimento desse trabalho.

Ao meu namorado, Helton, que não mede esforços ao me apoiar em todas as minhas escolhas, agradeço pelo companheirismo de tantos anos. Você me faz ser melhor todos os dias.

À minha família. Minha irmã, Carolina, por ser minha amiga e confidente. Meu padrinho, Marcos, por mover montanhas para me ajudar a conquistar meus sonhos. Minha afilhada, Giulia, por alegrar todos os meus dias. Meus avós, Neide, Arnaldo (*in memorian*), Neice (*in memorian*) e Paulo, por me inspirarem a incentivarem tanto, sempre.

Por fim, minha eterna gratidão aos meus pais, Valéria e Luciano. Vocês são meu ninho e minhas asas. Obrigada por me ensinarem a voar, mas sempre me lembrarem que tenho para onde voltar. Minhas conquistas sempre serão graças a vocês, por vocês e para vocês.

RESUMO

A terra é usada como material de construção desde o princípio das civilizações. Atualmente, estima-se que um quarto da população mundial viva em construções em terra. Entretanto, durante o século XX, o material caiu em desuso em diversos países desenvolvidos com o surgimento do betão, sendo utilizado somente em situações de vulnerabilidade. Entretanto, desde o início do século XXI, a atenção dada a esse material foi renovada, por se tratar de método ecológico, com baixo consumo energético e emissão de carbono para a execução. Dessa forma, faz-se necessária a caracterização das construções em terra. Esse trabalho tem como objetivo contribuir para a caracterização térmica de paredes de taipa, levando em consideração a variação da espessura e a escolha do solo. As amostras analisadas são provenientes de dois solos da região do Alentejo (um considerado ideal para taipa e outro enquadrado no limiar dos limites propostos na literatura). O programa experimental contou com ensaios para a caracterização física e termohigrométrica dos materiais, além do procedimento desenvolvido para a execução dos provetes. Os ensaios utilizados na caracterização termohigrométrica buscam estimar os valores do coeficiente de transmissão térmica, da condutibilidade térmica e da taxa de absorção da água a baixa pressão dos provetes. Ao analisar os resultados, constata-se que a variação da espessura da parede de taipa possui influência significativa nos valores encontrados: o coeficiente de condutibilidade térmica de um provete com 50 cm de espessura é cerca de 30% inferior ao coeficiente de um provete de 35 cm e mesmo solo. Além disso, verificou-se que o solo S1, que possui maior baridade, apresenta maior condutibilidade térmica e menor taxa de absorção da água a baixa pressão. Verificou-se também a influência da umidade no comportamento térmico da taipa. Era esperado que o solo S1 apresentasse maior valor de U. Entretanto, na altura dos ensaios, os provetes do solo S2 apresentaram o dobro da umidade de S1. Assim, apresentaram coeficiente U superior a S1: o valor de W_{35S1} foi de $1,53 \text{ W/m}^2\text{C}$, enquanto o valor de W_{35S2} foi de $2,43 \text{ W/m}^2\text{C}$. Por fim, os materiais foram enquadrados no Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios, de modo a ilustrar uma solução de envolvente contendo parede de taipa e argamassa de terra que cumpra os requisitos propostos.

Termos chave: Construção em terra crua, taipa, caracterização termohigrométrica.

ABSTRACT

Earth has been used as a construction material since the beginning of civilizations. Currently, it is estimated that one quarter of the world's population lives in buildings made of earth. However, during the 20th century, this material fell into disuse in several developed countries with the popularization of concrete, and nowadays is being used only in situations of vulnerability in those countries. Yet, since the beginning of the 21st century, the attention given to this material has been renewed, since it is an ecological method, with low embodied energy and carbon emission for its execution. Thus, it is necessary to characterize rammed Earth constructions. This work aims to contribute to the thermal characterization of rammed earth walls, taking into consideration the variation in thickness and soil choice. The samples analyzed come from two soils in the Alentejo region (one considered ideal for being used on rammed earth and the other within the limits proposed in the literature). The experimental program included tests for the physical and thermohygrometric characterization of the materials, in addition to the procedure developed for the execution of the specimens. The tests used in the thermohygrometric characterization seek to estimate the values of the conductance coefficient, thermal conductivity and low pressure water absorption rate of the specimens. By analyzing the results, it is verified that the variation in the wall thickness of rammed earth walls has a significant influence on the results: the thermal conductivity coefficient of a 50cm thick specimen is about 30% lower than the coefficient of a 35cm specimen of the same soil. In addition, soil S1, which has higher density, higher thermal conductivity and lower water absorption rate. It was also verified the influence of moisture on the thermal behavior of rammed earth walls. It was expected that soil S1 would present a higher value of U. However, at the time of the tests, samples from soil S2 presented twice the moisture content of S1. Thus, they presented a U coefficient higher than S1: the value of U_{W35S1} was $1.53 \text{ W/m}^2\text{°C}$, while the value of U_{W35S2} was $2.43 \text{ W/m}^2\text{°C}$. Finally, the materials were compared with REH, a portuguese regulation, in order to illustrate a solution with rammed earth and earth mortar that meets the proposed requirements.

Key words: Rammed earth constructions, rammed Earth, thermohygrometric characterization.

Sumário

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Enquadramento	2
1.2	Objetivos e Metodologia.....	3
1.3	Estrutura da Dissertação	4
2	ESTADO DA ARTE.....	6
2.1	Introdução	7
2.2	Construções em terra crua.....	7
2.2.1	Adobe	10
2.2.2	BTC	12
2.3	A taipa de pilão	13
2.4	Estabilização do solo	17
2.5	Seleção do solo	18
2.6	Propriedades higrotérmicas.....	23
2.7	Regulamentação em vigor.....	28
3	CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DOS SOLOS	32
3.1	Introdução	33
3.2	Teor em matéria orgânica no solo (MOS)	34
3.3	Peso específico das partículas.....	35
3.4	Análise granulométrica das partículas	36
3.4.1	Peneiração.....	36
3.4.2	Sedimentação.....	37
3.4.3	Resultados.....	38
3.5	Equivalente de areia.....	40
3.6	Limites de consistência	42
3.6.1	Limite de liquidez (LL)	42
3.6.2	Limite de plasticidade (LP)	44

3.6.3	Índice de plasticidade (IP)	44
3.6.4	Resultados.....	45
3.7	Ensaio de Compactação Proctor	47
3.8	Discussão dos resultados	49
4	CARACTERIZAÇÃO TERMOHIGROMÉTRICA.....	51
4.1	Introdução	52
4.2	Fabricação dos provetes.....	52
4.2.1	Preparação do solo.....	54
4.2.2	Compactação	56
4.3	Determinação experimental do coeficiente de transmissão térmica.....	59
4.3.1	Configuração experimental.....	59
4.3.2	Termografia	64
4.3.3	Teor em água	65
4.3.4	Metodologia de cálculo	66
4.3.5	Resultados.....	67
4.3.5.1	Termografia.....	67
4.3.5.2	Teor em água.....	69
4.3.5.3	Temperatura interior e exterior	70
4.3.5.4	Temperaturas Superficiais (T _{si}).....	72
4.3.5.5	Fluxos de Calor (Q).....	74
4.3.5.6	Coeficiente de Transmissão Térmica (U).....	77
4.4	Determinação experimental do Coeficiente de Condutibilidade térmica	80
4.5	Absorção de água a baixa pressão	84
4.6	Discussão dos resultados	87
5	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	93
	REFERÊNCIAS	97

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Construção em terra a nível mundial	7
Figura 2. Distribuição geográfica das construções tradicionais Portuguesas em terra: (a) taipa; (b) adobe; (c) tabique.....	8
Figura 3. Classificação das técnicas de construção em terra.....	9
Figura 4. Construção em adobe	10
Figura 5. Produção de blocos de adobe	10
Figura 6. Processo semi-industrial de produção de adobe	11
Figura 7. Escola nas Filipinas em BTC	12
Figura 8. Produção de BTC em prensa AURAM PRESS 3000.....	13
Figura 9. Execução de parede de taipa	14
Figura 10. (a) Trecho da Grande Muralha da China em taipa, em Jiayuguan; (b) Forte de Jiayuguan, em Jiayuguan, Gansu.....	14
Figura 11. Fundação utilizada em construções de taipa	15
Figura 12. Equipamentos utilizados na compactação da taipa: (a) Mais antigos; (b) Mais recentes	15
Figura 13. Fiadas de parede de taipa a serem construídas.....	16
Figura 14. Construções em taipa modernas: (a) Centro Cultural no Canadá; (b) Casa em Luanda; (c) Interior de casa em taipa	17
Figura 15. Diagrama triangular de Feret para construção em terra	21
Figura 16. Metodologia para aferir a aptidão de um solo para ser estabilizado com cimento, cal e asfalto	23
Figura 17. (a) Curva granulométrica dos solos utilizados; (b) Condutibilidade térmica em relação a variação da umidade relativa.....	24
Figura 18. Esquema do ensaio de resistência à difusão de vapor de água	25
Figura 19. Solos utilizados no ensaio: (a) Solo S1; (b) Solo S2.....	34
Figura 20. Picnômetros em aquecimento: solo S1 à esquerda, solo S2 à direita.....	36
Figura 21. Materiais utilizados no ensaio de sedimentação: proveta, densímetro e termômetro	38
Figura 22. Curva granulométrica S1.....	38
Figura 23. Curva granulométrica S2.....	39
Figura 24. Triângulo de Feret para os solos S1 e S2	40

Figura 25. (a) Materiais utilizados no ensaio; (b) Proveta na mesa vibratória; (c) Lavagem do provete; (d) Medição da altura.....	41
Figura 26. Comportamento dos solos com a variação do teor em água	42
Figura 27. Execução do ensaio com o uso da Concha de Casagrande	43
Figura 28. Concha de Casagrande e riscador; (a) Solo S1; (b) Solo S2.....	44
Figura 29. (a) Tábua em vidro fosco e bastão guia; (b) Solo S1; (b) Solo S2.....	44
Figura 30. Limites de Liquidez	45
Figura 31. Curvas de compactação Proctor	48
Figura 32. Provetes executados	54
Figura 33. Esquema do teste de queda	55
Figura 34. Aspecto do solo no teste de queda: (a) Muito seco; (b) Utilizável; (c) Muito úmido.....	55
Figura 35. Esquema das camadas compactadas em cada provete	57
Figura 36. Molde de ferro utilizado para execução de provetes.....	57
Figura 37. Molde de madeira utilizado para execução de provetes.....	58
Figura 38. Solo compactado, molde em madeira e compactador manual	58
Figura 39. Esquema da sala de ensaios térmicos.....	60
Figura 40. Posicionamento dos provetes em relação a sala de ensaio.....	60
Figura 41. Provetes posicionados na sala de ensaio	61
Figura 42. Protótipos de paredes posicionados: (a) Durante o ensaio 1; (b) Durante o ensaio 2.....	62
Figura 43. Provetes e isolante XPS posicionados nos vãos e selados com espuma expansiva de poliuretano	63
Figura 44. Posição dos sensores de fluxo de calor e de temperatura superficial: (a) ts1,1; (b) HF1; (c) ts1,2; (d) ts2,1; (e) HF2; (f) ts2,2	63
Figura 45. (a) Sonda de temperatura; (b) Sonda de umidade; (c) Datalogger.....	64
Figura 46. Flir BT Series T365.....	65
Figura 47. Medição de umidade dos provetes	66
Figura 48. Termogramas obtidos ao fim do ensaio 1, na manhã do dia 20 de janeiro: (a) Interior; (b) Exterior	68
Figura 49. Termogramas obtidos ao fim do ensaio 2, na manhã do dia 08 de fevereiro: (a) Exterior; (b) Interior	68
Figura 50. Evolução das temperaturas interior e exterior no decorrer do ensaio 1	70
Figura 51. Evolução das temperaturas interior e exterior no decorrer do ensaio 2	71

Figura 52. Temperaturas superficiais no ensaio 1	72
Figura 53. Temperaturas superficiais no ensaio 2	73
Figura 54. Fluxos de calor do ensaio 1	75
Figura 55. Fluxos de calor do ensaio 2.....	76
Figura 56. Coeficientes de transmissão térmica no ensaio 1	77
Figura 57. Coeficientes de transmissão térmica no ensaio 2.....	78
Figura 58. Provete posicionado para o ensaio	81
Figura 59. Ensaio de condutibilidade térmica. (a) Equipamento Thermal Conductivity Test Tool λ -Meter EP500; (b) Configuração dos parâmetros de ensaio.	82
Figura 60. Condutibilidade térmica. (a) Solo S1; (b) Solo S2.....	83
Figura 61. Tubos Karsten fixados.....	85
Figura 62. Coeficiente de absorção de água	86

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação das técnicas de construção em terra	9
Tabela 2 – Massa volúmica seca após compactação	19
Tabela 3 – Limites de consistência para solos utilizados na construção com terra.....	19
Tabela 4 – Classificação da plasticidade de um solo.....	20
Tabela 5 – Análise granulométrica.....	21
Tabela 6 – Limites de consistência.....	22
Tabela 7 – Parâmetros obtidos no estudo	26
Tabela 8 – Atraso térmico das paredes	27
Tabela 9 – Conteúdo das regulamentações (continua)	29
Tabela 10 – Teor em matéria orgânica dos solos	35
Tabela 11 – Peso específico das partículas.....	36
Tabela 12 – Quadro comparativo das granulometrias	39
Tabela 13 – Equivalente de areia.....	42
Tabela 14 – Limites de Liquidez	45
Tabela 15 – Limites de Plasticidade	46
Tabela 16 – Índices de Plasticidade.....	47
Tabela 17 – Resultados do Ensaio Proctor	48
Tabela 18 – Resumo da caracterização física.....	49
Tabela 19 – Provetes executados.....	53
Tabela 20 – Teor de umidade dos provetes	56
Tabela 21 – Parâmetros para obtenção dos termogramas.....	65
Tabela 22 – Umidade dos provetes	69
Tabela 23 – Temperaturas interiores e exteriores durante os ensaios	71
Tabela 24 – Diferencial médio entre Tsi e Ti no ensaio 1.....	72
Tabela 25 – Diferencial médio entre Tsi e Ti no ensaio 2.....	74
Tabela 26 – Resistência térmica	79
Tabela 27 – Condutibilidade térmica dos materiais	82
Tabela 28 – Quantidade média de água absorvida	85
Tabela 29 – Coeficientes de absorção de água	86
Tabela 30 – Resultados do ensaio de determinação experimental do coeficiente de transmissão térmica	87
Tabela 31 – Valores de λ	88

Tabela 32 – Coeficientes de transmissão térmica superficiais máximos admissíveis de elementos opacos, $U_{máx}$ [$W/(m^2 \cdot ^\circ C)$]	89
Tabela 33 – Solução construtiva com taipa	90
Tabela 34 – Valores de U para a solução com parede de taipa de 35 cm.....	91
Tabela 35 – Valores de U para a solução com parede de taipa de 40 cm.....	92

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento

A terra crua é um dos materiais de construção mais antigos, tal como evidenciam vários sítios arqueológicos com construções com mais de nove mil anos (Minke, 2000). É estimado que mais de um quarto da população mundial viva nesse tipo de habitação atualmente (Avrami, Guillaud and Hardy, 2008; Pacheco-Torgal and Jalali, 2012). Em Portugal, há registros da utilização da terra como material de construção desde o ano 5000 a.C. (Gomes, 2013). As técnicas construtivas em terra mais utilizadas em território nacional são o tabique, a taipa e o adobe (Silva et al., 2013). Essas construções são mais comumente encontradas no centro e sul do país, por conta do clima mais seco e da distribuição dos recursos naturais. Os solos considerados mais adequados para a construção em taipa são a areia argilosa e areia siltosa (Moran, 1984).

Com o desenvolvimento de novas técnicas construtivas, na Revolução Industrial, a construção em terra caiu em desuso (Serrano et al., 2017). Assim, as construções em terra passaram a ser utilizadas quase que exclusivamente em situações de vulnerabilidade na Europa, a exemplo dos pós-guerra, pois são construções a base de matéria prima de fácil acesso e sem custo. Para além dessa situação, é possível encontrar novas construções de terra em países subdesenvolvidos ou em desenvolvimento (principalmente na América Latina e África), pelo baixo custo agregado ao método.

Desde 1824, o cimento Portland, junto com o ferro e aço, tomou gradativamente o espaço ocupado pela terra crua compactada na construção convencional (Jaquin, Augarde and Gerrard, 2008). O fato de o regulamento de construção português (GAIURB, 2013) não incluir a terra crua como material de construção, dificulta a execução de novas edificações. Ademais, são poucos os países que possuem normas específicas para construção em terra – e.g. Nova Zelândia (NZS, 1998a, 1998b, 1998c), EUA (CIDRLD, 2016) e Peru (SENSICO, 2006) –, o que corrobora com a dificuldade.

Por outro lado, construções com materiais alternativos, como a terra, são consideradas sustentáveis (Soebarto, 2009). O alto consumo de recursos naturais e emissão de poluentes relativos ao setor construtivo, tanto no processo produtivo de insumos quanto na execução de obras, colocam em debate a necessidade de utilização de métodos construtivos com menor impacto ambiental (Cordeiro et al., 2020). As construções em terra suprem notavelmente os preceitos da construção sustentável: são totalmente reutilizáveis, têm baixa energia atribuída, possuem durabilidade elevada e a

terra é um material que não necessita de transformação e é encontrado no local de execução da edificação (Pereira and Correia da Silva, 2012).

Não obstante as construções de terra estarem no foco de discussões, por se tratar de técnicas antigas e em desuso na atualidade, a principal preocupação acerca desses métodos é de que os conhecimentos necessários para a correta execução estejam sendo perdidos junto com seus mestres (F. P. Torgal and Jalali, 2009). Por esse motivo, a investigação acerca desse tema faz-se necessária. Ainda que algumas pesquisas científicas sobre a taipa tenham sido conduzidas nas últimas décadas, estas tiveram como foco, principalmente, a análise física e mecânica de paredes de taipa. Dessa forma, sabe-se quais solos são mais indicados para esse tipo de construção, dadas as resistências mecânicas e coesão.

Por outro lado, é importante considerar que o solo encontrado “*in situ*” em uma construção pode ser utilizado também para fins de compartimentação, sem função estrutural. Dessa forma, é importante que a terra seja coesa – para garantir a construção e compactação necessárias na técnica – e, principalmente, que as paredes venham a apresentar boas características térmicas, de modo a cumprirem os requisitos regulamentares atualmente exigidos, garantindo o conforto térmico da habitação. A influência da escolha do solo no comportamento térmico da taipa carece de estudo e inovação.

1.2 Objetivos e Metodologia

Pretende-se com esse trabalho contribuir para a caracterização do comportamento termohigrométrico da taipa, um método construtivo de terra crua, avaliando o impacto de variáveis como a seleção do solo e a espessura da parede. Os dois solos escolhidos para a investigação são provenientes da região do Alentejo, onde é possível encontrar diversas construções de taipa.

Para atingir os objetivos pretendidos, a seguinte metodologia foi utilizada:

- Caracterizar fisicamente os solos utilizados nesse estudo por meio de ensaios experimentais;
- Planejar e executar provetes prismáticos de taipa de dimensões diversas, entre 5 cm e 50 cm de lado;

- Caracterizar termohigrometricamente os provetes executados por meio de ensaios experimentais em ambiente padrão e controlado;
- Determinar, a partir dos resultados obtidos, a influência da seleção de solo no desempenho térmico da taipa;
- Determinar, a partir dos resultados obtidos, a influência da variação da espessura de uma parede de taipa em seu comportamento térmico.

1.3 Estrutura da Dissertação

A dissertação encontra-se dividida em cinco capítulos. No capítulo 1 o tema é realizado o enquadramento do tema e, em seguida, os objetivos do trabalho são apresentados. Por fim, explicita-se a estrutura da tese.

O segundo capítulo é composto pelo estado da arte relativo ao tema do trabalho: exposição de definições e informações relevantes para a compreensão do tema e futuras análises. Primeiramente, as construções de paredes de terra crua são apresentadas, em um panorama mais geral, e sua utilização e importância no mundo atual. Em seguida, o método construtivo da taipa é explicado com mais pormenores, explicitando seu histórico e elementos constituintes. Após, a importância da escolha do solo correto para esse tipo de construção é justificada, com apresentação do estado do conhecimento. Depois, é apresentado o estado de conhecimento acerca da caracterização térmica desse método em materiais semelhantes aos utilizados, abordando os principais resultados obtidos em outros estudos. Por fim, o enquadramento da construção de terra nos regulamentos existentes no mundo é apresentado.

O terceiro capítulo contempla a caracterização física experimental dos solos utilizados nessa dissertação para a preparação dos diferentes provetes de taipa. Os ensaios realizados são descritos, apresentando-se e discutindo-se seguidamente os resultados obtidos.

No quarto capítulo, o programa experimental dedicado à caracterização térmica da taipa é apresentado. Inicialmente, o processo de execução dos provetes utilizados é descrito, seguido da apresentação dos ensaios realizados. Por fim, apresentam-se e discutem-se os resultados obtidos. Dessa forma, é possível avaliar a influência que a escolha do solo e a espessura de uma parede de taipa exercem no desempenho térmico da construção.

Finalmente, o quinto capítulo traz as conclusões encontradas a partir da interpretação dos resultados e, por fim, temas para futuras investigações correlatas ao trabalho são propostos.

CAPÍTULO 2

ESTADO DA ARTE

2.1 Introdução

Uma análise do estado de conhecimento das construções em terra, especificamente construções em terra crua do tipo taipa, é realizada neste capítulo.

2.2 Construções em terra crua

Estima-se que a terra seja utilizada como material de construção desde a pré-história (Augusta et al., 2007). Entretanto, os primeiros registros de construções em terra foram realizados nas primeiras sociedades agrícolas, há mais de nove milênios (Minke, 2000; F. P. Torgal and Jalali, 2009).

Ainda na atualidade, são várias as obras de engenharia de terra relevantes e milenares que permanecem erguidas. A cidade de Shibam, Iémen, com cerca de dois milênios de idade, é um exemplo. Seus edifícios possuem, tipicamente, entre 5 e 11 andares e paredes externas em adobe. Além disso, têm-se a Grande Muralha da China (construída em taipa), na China e o Templo de Ramsés II (construído em adobe), no Egito, ambos com três milênios de idade. Em adição aos exemplos, há o entendimento de que a terra é um material de construção mundial e atemporal (F. P. Torgal and Jalali, 2009). A distribuição dessas edificações no mundo pode ser observada na Figura 1.



Figura 1. Construção em terra a nível mundial

Fonte: (Gomes, 2013)

Em Portugal, são três os principais métodos construtivos em terra tradicionalmente utilizados: adobe, taipa e tabique, conforme a Figura 2. A popularidade dos métodos nos diferentes locais do território português está relacionada ao clima adequado para a

execução e utilização do método; bem como a disponibilidade do solo adequado para as técnicas.

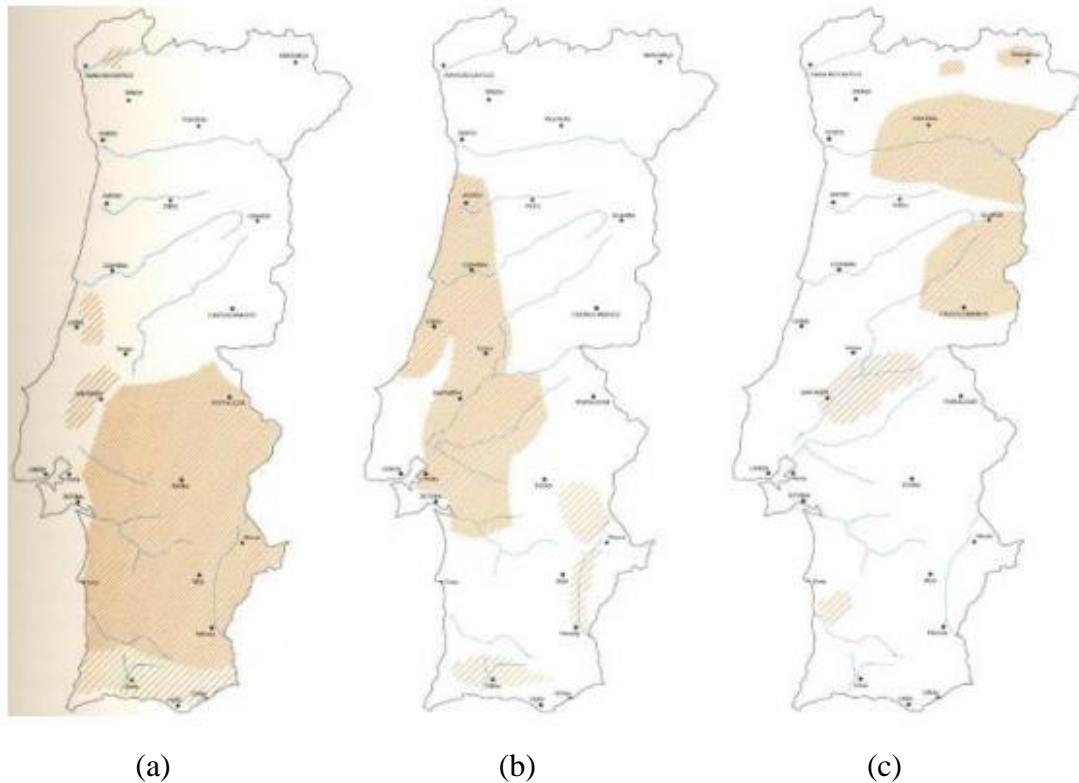


Figura 2. Distribuição geográfica das construções tradicionais Portuguesas em terra: (a) taipa; (b) adobe; (c) tabique

Fonte: (F. P. Torgal and Jalali, 2009)

Numa tentativa de classificar e sintetizar todos os métodos construtivos em terra, elaborou-se um diagrama com dezoito técnicas (tanto antigas quanto contemporâneas) dividido em três grupos (Doat et al., 1979), de acordo com a Figura 3. Dessa forma, as construções são classificadas dentro de: (A) monolítica e portante; (B) enchimento ou proteção e (C) alvenaria portante (considera unidades anteriormente manufaturadas), conforme a Tabela 1.

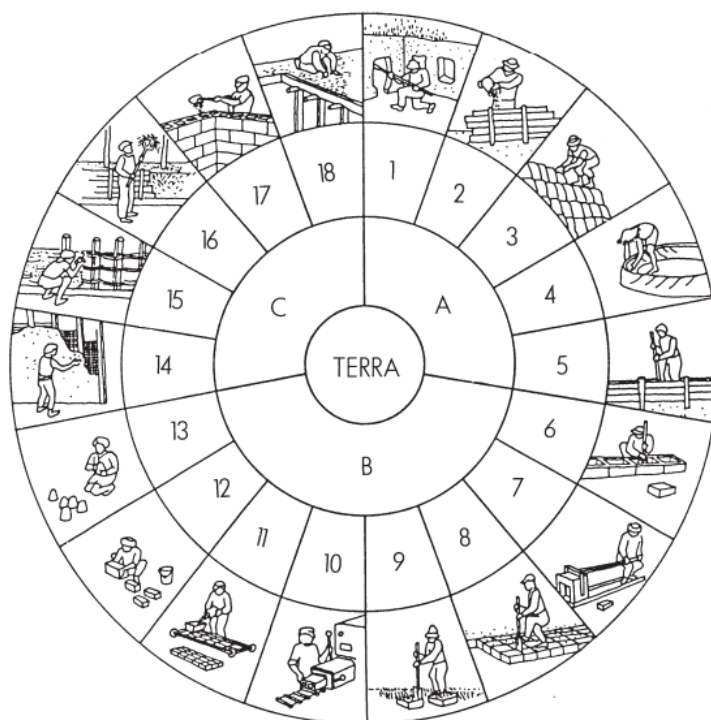


Figura 3. Classificação das técnicas de construção em terra

Fonte: (Fernandes, 2006)

Tabela 1 – Classificação das técnicas de construção em terra

A	B	C
Utilização da terra sob a forma monolítica e portante	Utilização de terra sob forma de alvenaria portante	Utilização da terra como enchimento de uma estrutura de suporte
1 – Terra escavada 2 – Terra plástica 3 – Terra empilhada 4 – Terra modelada 5 – Taipa	6 – Blocos apiloados 7 – Blocos de terra comprimida (BTC) 8 – Blocos cortados 9 – Torrões de terra 10 – Terra extrudida 11 – Adobe mecânico 12 – Adobe manual 13 – Adobe moldado	14 – Terra de recobrimento 15 – Terra sobre engradado 16 – Terra palha 17 – Terra de enchimento 18 – Terra de cobertura

Fonte: (Fernandes, 2006)

Como meio de exemplificar alguns dos métodos apresentados acima, o adobe (mecânico, manual e moldado) e taipa, dois entre os três mais utilizados em Portugal Continental, serão aprofundados a seguir, assim como o bloco de terra comprimida (BTC), por ser a solução de construção moderna (em terra) com maior relevância no mundo (Fernandes, 2006).

2.2.1 Adobe

Conforme a Tabela 1, o adobe é um exemplo do Grupo B: utilização da terra sob a forma de alvenaria portante. Trata-se de um bloco de terra crua moldado e posteriormente seco no sol. Essa tipologia construtiva em terra é uma das mais utilizadas no mundo. Por conta de sua simplicidade de fabricação e custo reduzido associado, é amplamente utilizada em países subdesenvolvidos e em desenvolvimento (Silva, 2015). A Figura 4 ilustra uma parede de adobe em construção.



Figura 4. Construção em adobe

Fonte: (IPEC, 2014)

O processo de fabricação do adobe consiste na mistura dos materiais (terra com água, podendo haver aditivos) até a umidade adequada, seguida da moldagem dos blocos em cofragem de madeira (sem fundo ou topo). Após, ainda com o bloco úmido e em estado plástico, o adobe é desmoldado. Em seguida, os adobes são deixados ao sol para secar no mesmo local do desmolde. A Figura 5 abaixo exemplifica o processo de produção.



Figura 5. Produção de blocos de adobe

Fonte: (Picorelli, 2011)

Originalmente, os tijolos de adobe eram produzidos manualmente. Com o passar do tempo, a moldagem começou a ser feita com o auxílio de formas de madeira, para padronizar e agilizar a produção. Atualmente, processos semi-industriais de produção também podem ser empregados, conforme a Figura 6, em que o solo é misturado com o auxílio de um misturador mecânico, que também serve para depositar a mistura nas cofragens.



Figura 6. Processo semi-industrial de produção de adobe

Fonte: (Minke, 2000)

O adobe pode ser produzido em variadas dimensões, por conta da fácil adequabilidade das formas e possibilidade de produção manual (Lourenço, 2002; F. P. Torgal and Jalali, 2009). Além disso, outra vantagem é a possibilidade de utilização do solo existente no local da obra. Entretanto, esse solo deve ser bastante argiloso, para proporcionar a plasticidade necessária à moldagem (F. P. Torgal and Jalali, 2009).

O adobe pode ser produzido, ainda, com o uso de cal aérea como estabilizante. Além disso, fibras vegetais também podem ser adicionadas, de modo a melhorar a fissuração superficial decorrente da retração. Ademais, pode-se utilizar pano de sisal ou plástico filme para cobrir os blocos durante a secagem (Silva, 2015).

O processo construtivo de alvenaria de adobe é similar à alvenaria convencional, com o uso de argamassa de terra para assentamento (preferencialmente a mesma utilizada na fabricação do bloco, para garantir maior compatibilidade e aderência). Apesar de não necessitar de acabamento exterior, pode-se empregar a mesma argamassa para fazer o reboco das paredes.

2.2.2 BTC

Ainda de acordo com a Tabela 1, outro exemplo do Grupo B, o bloco de terra compactada (BTC) foi inventado como uma evolução do adobe, apresentado em 2.2.1. Essa técnica tem o intuito de juntar as dimensões e praticidade construtiva do adobe com as características inerentes a pequenos blocos de taipa (D. Gomes, 2015). Através de uma prensa, o solo é compactado dentro do molde, o que reduz o volume de vazios do solo, de modo a melhorar a resistência e durabilidade do bloco. A Figura 7 mostra uma construção em BTC.



Figura 7. Escola nas Filipinas em BTC

Fonte: Adaptado de (Silva, 2015)

Com relação à composição, os BTC são produzidos com solo de granulometria extensa, principalmente arenoso e argiloso. Os blocos são comumente estabilizados, principalmente com cimento e cal. Para a compactação, deve-se utilizar umidade próxima da ótima (NZS, 1986).

Ao contrário do adobe, o BTC possui um processo produtivo mais industrializado e menos simplificado. O solo utilizado não deve ser proveniente dos 1,5 m superficiais, de modo a não conter matéria orgânica. Em seguida, a terra é seca, destorroada e peneirada (são retiradas as partículas grandes). Após isso, caso seja decidido utilizar um estabilizante para auxiliar na trabalhabilidade e resistência do solo, ele é misturado à terra e, depois, a água é acrescida. Por fim, a mistura já homogeneizada é colocada na prensa, conforme Figura 8. Depois de prensado, o bloco é desmoldado e colocado para cura.



Figura 8. Produção de BTC em prensa AURAM PRESS 3000

Fonte: (Diferente, 2020)

Essa técnica foi inventada juntamente com a primeira prensa, a Cinva-ram, em 1952 por Raul Ramires, na Colômbia (Rigassi, 1985; Fernandes, 2006). Na década de 1950, ocorreu também o abandono da terra como material de construção em Portugal. Por esse motivo, a alvenaria em BTC não foi mais difundida em Portugal (Lourenço, 2002).

O BTC pode ser utilizado como elemento estrutural, com capacidade autoportante, ou como elemento de vedação. Por conta de seu acabamento natural, não necessitam de revestimentos (o que confere uma vantagem financeira e ambiental). Ainda, podem ser empilhados em obra quando frescos, por conta do processo de compactação.

2.3 A taipa de pilão

A taipa, elemento de estudo dessa investigação, está inserida no Grupo A da Tabela 1: Utilização da terra sob a forma monolítica e portante. O método construtivo da taipa consiste na compactação de camadas de terra úmida entre formas de madeira de grande dimensão, denominadas taipais. A Figura 9 mostra a execução de uma parede de taipa.



Figura 9. Execução de parede de taipa

Fonte: (Librelotto and Telli, 2014)

Esse método, se executado corretamente, é considerado a técnica de construção em terra mais duradoura e resistente, de modo que até hoje existem construções antigas e importantes que se mantêm ativas e funcionais. Historicamente, a construção de taipa tem vários exemplares ao redor do mundo. Antes de chegar à Península Ibérica, em 711 d.C., esse método já era popular em toda a Ásia e na região do Mediterrâneo (Jaquin, Augarde and Gerrard, 2008), onde existem até hoje construções relevantes que utilizam a técnica, como a Grande Muralha da China, conforme a Figura 10.



Figura 10. (a) Trecho da Grande Muralha da China em taipa, em Jiayuguan; (b) Forte de Jiayuguan, em Jiayuguan, Gansu

Fonte: (Arquiteturas de Terra, 2000)

Entretanto, com a popularização de novos materiais e técnicas na década de 1970 (e.g. betão armado), o método passou a ser utilizado basicamente em situações de vulnerabilidade e carência, pois possui matéria prima barata e muitas vezes disponível no próprio local da obra. Na última década, a taipa voltou a ganhar destaque nos Estados Unidos, na Suíça e na Alemanha (Pereira, 2013), pois é uma técnica construtiva com

baixa (às vezes nula) emissão de carbono e, quando utilizada sem estabilização, a terra pode ser totalmente reutilizada.

O processo construtivo da taipa de pilão tradicional conta com diversas etapas, a iniciar pela seleção e extração da terra. Na sequência, deve-se executar a fundação da construção (também chamada de embasamento e frequentemente realizada com alvenaria de pedra), conforme a Figura 11.

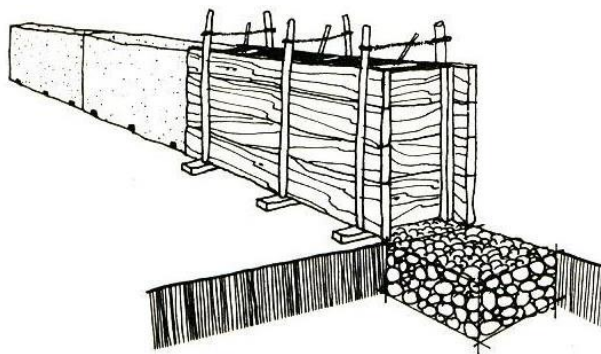


Figura 11. Fundação utilizada em construções de taipa

Fonte: Adaptado de (Imbroisi and Martins, 2021)

Em seguida, são montadas as cofragens: compostas de taipais (formas que possuem apenas os elementos laterais) sustentados por montantes de madeira fixados na parte inferior, através de cunhas, e superior, por um torniquete, da forma (PET-UFPR, 2016). Depois da montagem das formas, o solo deve ser umedecido e homogeneizado de modo a obter as características necessárias à sua compactação. Por fim, o solo é colocado dentro das cofragens em camadas de, em média, 20cm, e compactado com um pilão adequado, conforme a Figura 12.



(a)



(b)

Figura 12. Equipamentos utilizados na compactação da taipa: (a) Mais antigos; (b) Mais recentes

Fonte: (F. P. Torgal and Jalali, 2009)

Os utensílios apresentados Figura 12 (a) são mais antigos, com cabo de madeira. Já os equipamentos na Figura 12 (b) são mais recentes, pois contam com cabos de ferro. Ainda, atualmente, o compactador pneumático é também utilizado, a fim de padronizar a energia de compactação, que possui grande influência na qualidade da construção (Lourenço, 2002).

Após a conclusão da compactação do troço de parede, os taipais são removidos e reposicionados, de modo a executar o restante da construção. A seção compactada fica exposta ao sol, a secar e endurecer lentamente. As formas devem ser reposicionadas de maneira que uma fiada seja completa antes de iniciar a subsequente, conforme Figura 13. É possível, também, utilizar formas que contemplem a parede toda. Dessa forma, o troço de parede terá o aspecto de um único bloco monolítico, sem divisões.

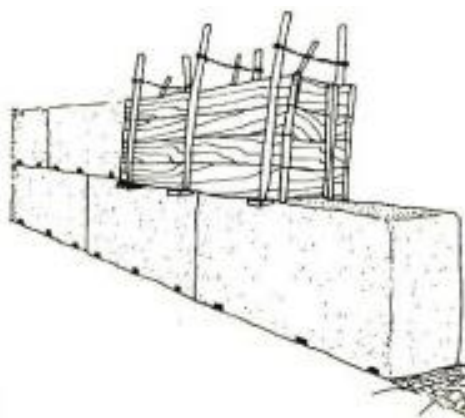


Figura 13. Fiadas de parede de taipa a serem construídas

Fonte: (Parellada, 1995)

Esse processo deve ser repetido até que a parede tenha alcançado as dimensões pretendidas. É importante atentar-se para que as juntas verticais dos troços estejam desfasadas, para garantir a estabilidade do elemento (Silva, 2015). Ainda que a taipa tradicional conte com reboco em sua superfície para a proteção contra a chuva e demais agentes degradantes, esse método construtivo não necessita obrigatoriamente de acabamento (apenas de atenção acerca das manutenções periódicas) e possui visual estético único, que está representado na Figura 14.



(a) (b) (c)
Figura 14. Construções em taipa modernas: (a) Centro Cultural no Canadá; (b) Casa em Luanda; (c) Interior de casa em taipa

Fonte: (UGreen, 2019)

Para a execução desse método, é importante que o solo utilizado seja adequado, bem como seu preparo e compactação. Os critérios de seleção de solos são apresentados em 2.5. Em conjunto com a escolha da terra, é possível realizar algum tipo de estabilização do solo, de modo a melhorar o desempenho do material. Os diferentes tipos de estabilização são apresentados em 2.4.

2.4 Estabilização do solo

Uma vez que um solo não é considerado como o mais adequado para a construção em taipa, uma possibilidade para melhorar suas propriedades é a estabilização (Rix, 1998). As melhorias alcançadas, em geral, são: redução do volume de vazios, preenchimento de vazios remanescentes e melhoria da coesão entre partículas. Portanto, a estabilização pode reduzir a porosidade e permeabilidade e aumentar a resistência mecânica da parede (Rigassi, 1985; Adam and Jones, 1995; Rix, 1998). Essas mudanças resultam em um elemento menos sensível à água e com menor erosão da superfície.

A estabilização da terra pode ser feita por métodos físicos, químicos e mecânicos; que devem ter sua adequabilidade para a demanda existente analisada caso a caso. Além disso, é possível utilizar métodos de estabilização conjugados, sejam eles de mesmo ou diferentes tipos, de modo a obter resultados ainda mais otimizados.

A estabilização física é realizada, de modo geral, através do acréscimo ou retirada de partículas de determinadas granulometrias (de modo que o material se enquadre melhor nos valores propostos na literatura para a construção com terra) ou adição de fibras. As fibras, que contam com palha seca, sisal, bambu, fibras de palmeiras, pelos de animais e fibras de aço (Osula, 1996), atuam na melhoria da coesão das partículas. Ainda, outro método de estabilização física é a adição de agregados finos para preencher os vazios existentes no solo, melhorando a compactidade do elemento. Esses agregados são, muitas vezes, sustentáveis, provenientes de resíduos de diversos setores industriais (Silva, 2015).

Já a estabilização química é caracterizada pela adição de substâncias ao solo para alterar suas propriedades físico-químicas, aumentada a coesão entre partículas através de reações químicas (Motta, 1997; Rix, 1998). Esse método é muito utilizado na produção de BTCs (ainda que esteja presente em construções de taipa) com a adição de: cimento, cal, betume ou pozolanas (Silva, 2015).

Por fim, a estabilização mecânica consiste na própria compactação do solo: a utilização de energia mecânica proporciona um rearranjo das partículas, o que corrobora com o aumento da resistência e durabilidade da parede. Outra característica que é melhorada com essa estabilização é a resistência à ação da água (Adam and Jones, 1995; Rix, 1998). Uma vez que a taipa é sempre compactada, essa estabilização não é considerada um diferencial. Portanto, esta investigação contempla o estudo de paredes de taipa não estabilizada.

2.5 Seleção do solo

A terra, ou solo, é composta por matéria orgânica e mineral. A parcela de matéria orgânica é constituída por organismos vivos ou em decomposição (de origem animal e vegetal). Já a matéria mineral provém de rochas desintegradas em fenômenos de intemperismo, resultantes da ação de agentes químicos, físicos e biológicos. A composição mineral de um solo é consequência da natureza dos minerais que o constituem (M. I. Gomes, 2013).

Nem todos os solos devem ser utilizados na construção com terra. As camadas superficiais do solo devem ser evitadas, visto que são constituídas por elevada quantidade de matéria orgânica, absorvem muita água e são extremamente compressíveis. Além disso, o comportamento do solo varia em função de sua composição e granulometria, em

virtude de cascalhos, areias, siltes e argilas possuem características diferentes. Ainda, a quantidade de água presente no solo influencia o seu comportamento (M. I. Gomes, 2013).

Os seixos e as areias não possuem capacidade de coesão quando secos. Portanto, nesses solos faz-se necessária a adição de ligantes para a utilização na construção. Já a coesão dos siltes varia em função do teor de umidade: apresentam boa coesão quando úmidos. As argilas, por outro lado, são consideradas instáveis, no entanto constituem um excelente ligante por apresentarem plasticidade e coesão na presença de água. Todavia, solos com grande quantidade de argila são impróprios para a construção, já que possuem grande capacidade de absorção de água e conseqüentemente grande retração (M. I. Gomes, 2013).

Portanto, é imprescindível realizar a caracterização e posterior classificação de um solo a fim de verificar se este é adequado para a técnica construtiva. Para isso, ensaios laboratoriais, tais como análise granulométrica, determinação de limites de consistência e ensaio Proctor, devem ser realizados.

O grupo francês CRAterre classificou os solos de acordo com vários parâmetros, a fim de verificar sua adequabilidade para a construção em terra compactada (Doat et al., 1979). A Tabela 2 apresenta a classificação de acordo com a massa volúmica seca do solo após compactação, obtida através do ensaio de Proctor. Já a Tabela 3 define valores máximos e mínimos para os limites de consistência do material, enquanto a Tabela 4 cita a plasticidade, dividida em três grupos (fraca, média e forte).

Tabela 2 – Massa volúmica seca após compactação

Massa volúmica seca (kg/m³)	Classificação
1650 - 1760	Medíocre
1760 - 2100	Muito satisfatório
2100 - 2200	Excelente
2200 - 2400	Excepcional

Fonte: (Doat et al., 1979)

Tabela 3 – Limites de consistência para solos utilizados na construção com terra

	Valores recomendados	Valores máximos e mínimos
Índice de plasticidade	7 - 18	7 - 29
Limite de liquidez	30 - 35	25 - 50
Limite de plasticidade	12 - 22	10 - 25
Limite de retração	< Teor em água ótimo	8 - 18

Fonte: (Doat et al., 1979)

Tabela 4 – Classificação da plasticidade de um solo

Ip	Plasticidade
5 - 10	Fraca
10 - 20	Média
> 20	Forte

Fonte: (Doat et al., 1979)

Inicialmente, não se exclui nenhum tipo de solo específico para a construção de paredes em taipa. Entretanto, a escolha de materiais que cumpram o recomendado na bibliografia garante uma construção de qualidade superior. Ainda, cada tipo de construção em terra possui suas particularidades acerca de composição e características da terra (F. Torgal and Jalali, 2009).

De acordo com a literatura, para a construção em taipa, as proporções adequadas para a constituição do solo são de 50 a 75% de areias e britas e um mínimo de 20% de argilas e siltes (Walker et al., 2005) – que possuem função coloidal (Brito, 2006). Sugere-se que essa porcentagem não supere 30% (Jayasinghe and Kamaladasa, 2007). É ainda unânime na literatura que o solo deve possuir um mínimo de 5% de argila para esse tipo de construção.

Ainda, considera-se adequada para a construção em terra, uma mistura (desconsiderando os cascalhos e seixos) constituída por 23% de areia grossa, 30% de areia fina, 32% de silte, 15% de argila e 10% de água. A matéria orgânica não deve representar mais do que 2% da composição, de modo a não degradar a estrutura (Walker et al., 2005).

Outra maneira de analisar o solo para a construção de taipa é através da adaptação do Triângulo de Feret apresentada por Moran (1984). O diagrama, explicitado na Figura 15, indica uma área em formato de paralelogramo, em marrom, em que os solos adequados para a taipa e o BTC devem estar enquadrados.

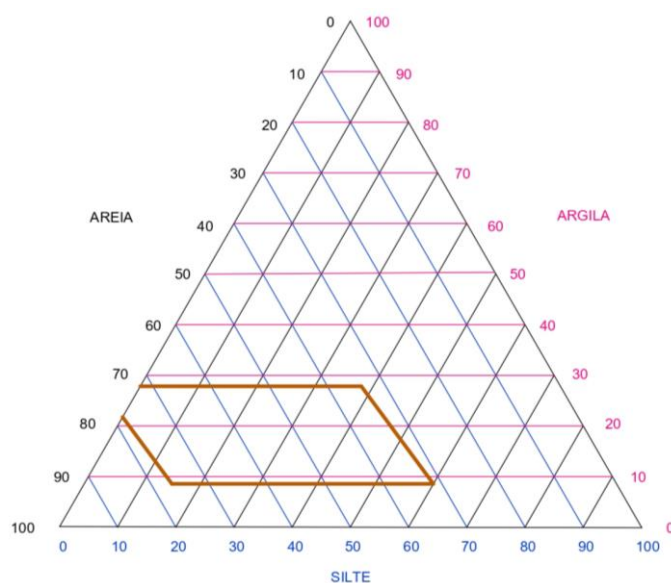


Figura 15. Diagrama triangular de Feret para construção em terra

Fonte: Adaptado de (Moran, 1984)

Diversos solos utilizados em construções de taipa da região do Baixo Alentejo foram analisados para verificar sua adequabilidade para a edificação em terra crua (Motta, 1997). A Tabela 5 apresenta a distribuição granulométrica, enquanto a Tabela 6 ilustra os limites de consistência dos solos. Neste trabalho, nova informação acerca da seleção de solos para a construção em taipa será adicionada ao que já existe na literatura.

Tabela 5 – Análise granulométrica

	Argilas (%)	Siltes (%)	Areias (%)	Seixos (%)	Finos argilas + siltes	Grossos areias + seixos
Albergaria	8	6	71	15	14	86
S. Susana	14	21	31	34	35	65
Pulo do Lobo	9	39	40	12	48	52
S. Clara	17	11	55	17	28	72
Porto Covo	2	3	3	92	5	95
Barragem Roxo	6	22	23	49	28	72
Messejana	7	23	41	29	30	70

Fonte: (F. Torgal and Jalali, 2009)

Tabela 6 – Limites de consistência

	Limite de Liquidez (%)	Limite de Plasticidade (%)	Índice de Plasticidade (%)	Limite de Retração (%)
Albergaria	19	14	5	14
S. Susana	27	21	4	15
Pulo do Lobo	26	19	7	14
S. Clara	27	18	9	23
Porto Covo	39	31	8	18
Barragem Roxo	22	17	5	6
Messejana	24	18	6	18

Fonte: (F. Torgal and Jalali, 2009)

Pode-se perceber, através da análise das tabelas acima, que solos das mais variadas granulometrias são utilizados para essas construções: de 95% até 52% de grossos. Ao considerar os valores obtidos na literatura, apenas os solos de S. Clara, Barragem Roxo e Messejana cumprem as indicações correlatas à granulometria.

Além disso, os limites de consistência encontrados diferem bastante uns dos outros, uma vez que estão diretamente relacionados à curva granulométrica do solo. Nesse âmbito, nenhum dos solos estudados cumpre todos os requisitos mencionados por Doat et al. (1979). Conclui-se, portanto, que o não desempenho dos requisitos não inviabiliza a execução da construção em terra. Entretanto, espera-se um material de maior qualidade e durabilidade ao cumprir os valores propostos.

As diretivas da CRAterre defendem que solos com teores de água ótimos entre 9 e 17% são mais fáceis de estabilizar para o uso na construção em terra (F. Torgal and Jalali, 2009). Por outro lado, consta no regulamento neozelandês que um solo deve ser compactado com um teor de água até 3% abaixo ou 5% acima do teor de água ótimo para o uso adequado na taipa (NZS, 1998a).

A estabilização de um solo está diretamente relacionada com a resistência mecânica e durabilidade da edificação. A partir da análise de 104 solos, Burroughs determinou a aptidão de estabilização de cada solo (Burroughs, 2008). Os métodos estudados por Burroughs (2008) foram estabilização com cimento, cal e asfalto e os resultados encontrados são explicitados na Figura 16.

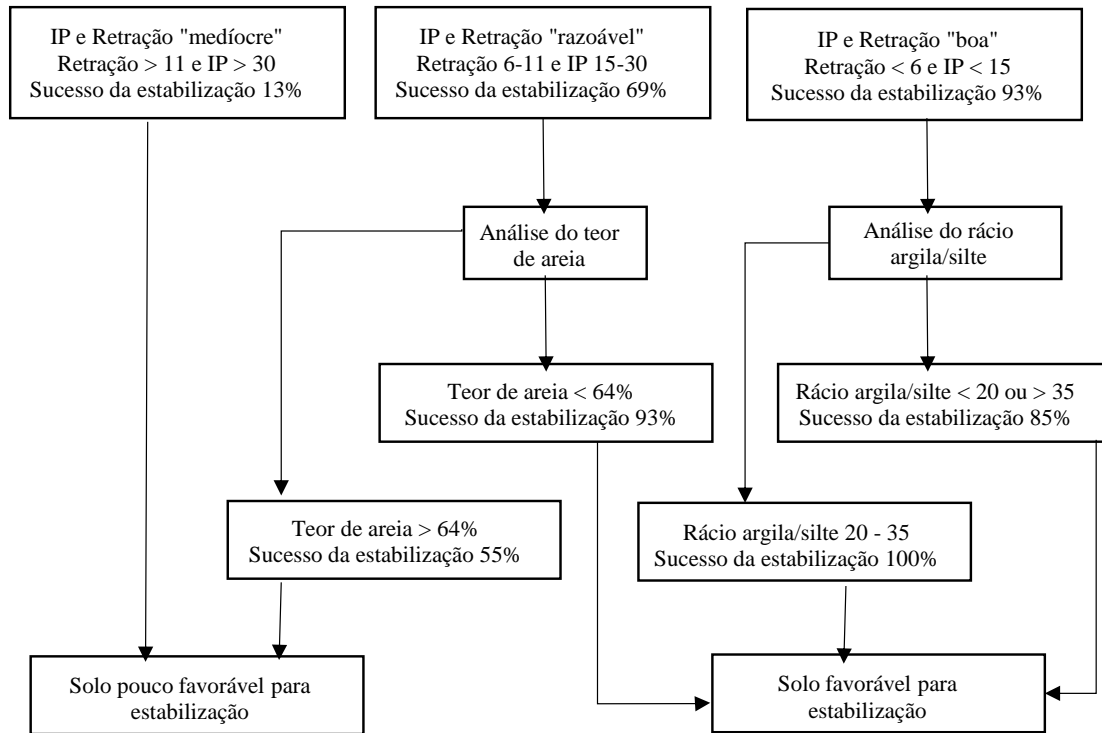


Figura 16. Metodologia para aferir a aptidão de um solo para ser estabilizado com cimento, cal e asfalto

Fonte: (Burroughs, 2008)

Percebe-se que o solo mais propício para estabilização é o que possui baixa retração, índice de plasticidade inferior a 15 e quociente entre argila e silte entre 20 e 35%.

2.6 Propriedades higrotérmicas

Em qualquer sistema construtivo, ocorrem processos de transferência de umidade e energia térmica através das paredes. Entretanto, no caso das construções em terra, esse sistema é mais complexo que o usual. Pela envolvente, ocorrem trocas térmicas por condução, radiação, convecção e, no caso da terra, por conta da microestrutura do material, trocas hígricas com o ambiente. Essas trocas hígricas são realizadas pelos fenômenos de condensação e absorção ou adsorção de partículas de água na superfície da parede (Dal Soglio, 2019). Sabe-se que o teor em água de um material pode alterar de forma significativa o seu comportamento (principalmente térmico) o que justifica a importância de considerar e estudar as propriedades higrotérmicas na análise térmica de paredes em terra (Soudani, 2016).

Em um sistema construtivo que apresenta comportamento higroscópico, a resistência térmica e a capacidade de inércia térmica variam em consonância com a umidade existente nos materiais. A Figura 17 mostra a curva granulométrica e a condutibilidade térmica em diversas umidades relativas do ar de três BTCs de solos distintos(El Fgaier et al., 2016).

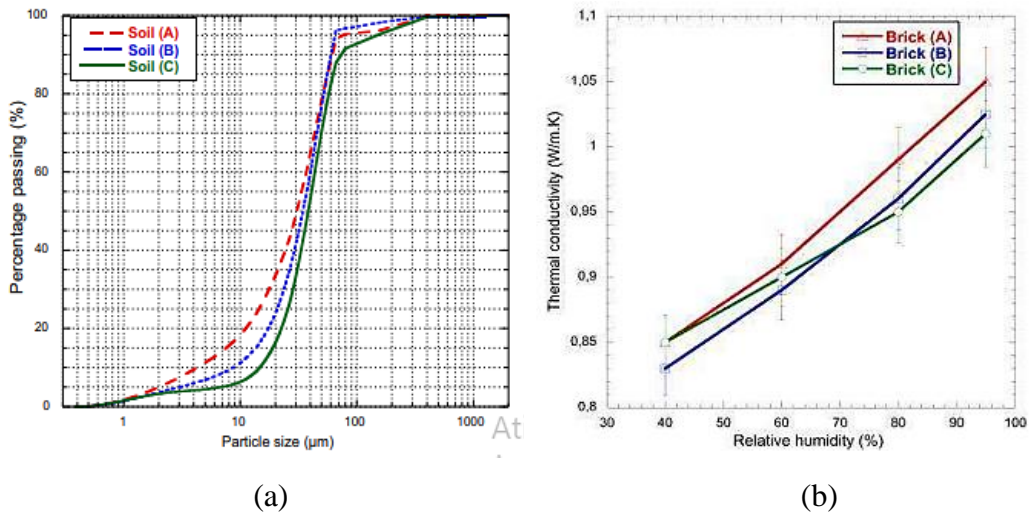


Figura 17. (a) Curva granulométrica dos solos utilizados; (b) Condutibilidade térmica em relação a variação da umidade relativa

Fonte: (El Fgaier et al., 2016)

A condutibilidade térmica dos BTCs foi obtida através do ensaio de medição do fluxo de calor. Esse método consiste na medição simultânea do fluxo de calor e da temperatura nas duas faces de uma amostra, que deve estar cercada por isolante de modo a assegurar fluxo unidirecional na área de medição (El Fgaier et al., 2016).

Em outro estudo, a resistência à difusão de vapor de água em BTCs foi analisada (Cagnon et al., 2014), a fim de verificar o comportamento higroscópico dos materiais. O ensaio realizado está registrado na Figura 18. Os resultados obtidos foram de alto comportamento higroscópico, com baixa resistência à difusão de vapor de água. Outras pesquisas acerca do comportamento higroscópico de construções em terra crua obtiveram resultados similares (Liuzzi et al., 2013; El Fgaier et al., 2016). Materiais com esse comportamento absorvem e liberam vapor de água até que o equilíbrio seja atingido o que gera inércia higroscópica no ambiente, evento que amortece os picos de umidade no interior das edificações (Ramos and Freitas, 2011).

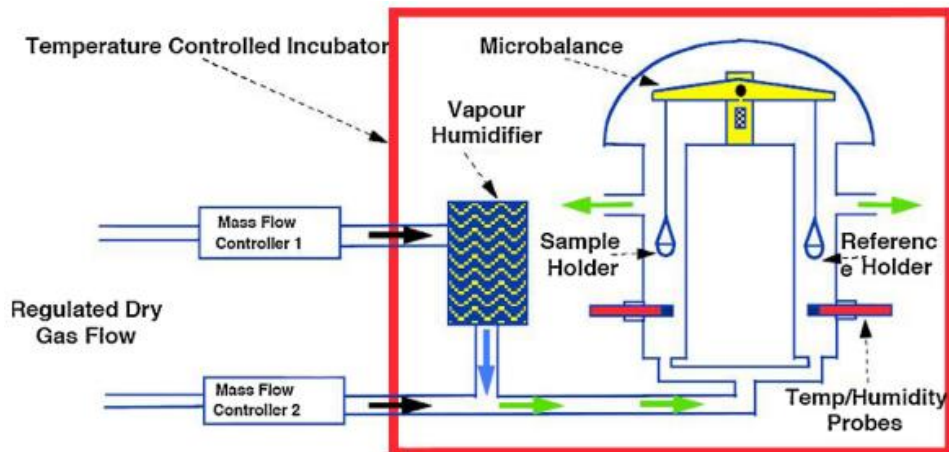


Figura 18. Esquema do ensaio de resistência à difusão de vapor de água

Fonte: (Cagnon et al., 2014)

Em outro estudo realizado, constatou-se que a mineralogia e granulometria de um solo, bem como a técnica construtiva empregada, têm maior influência no comportamento higroscópico do que aditivos acrescidos às misturas (McGregor et al., 2014). É importante ressaltar que, comumente, as propriedades higroscópicas não são consideradas na investigação do desempenho térmico de uma edificação ou solução construtiva, fato que pode culminar supervalorização do desconforto em situações extremas, principalmente em climas quentes e úmidos (Qin et al., 2011).

Ainda que os resultados obtidos em laboratório possam ser suficientes para demonstrar o comportamento higroscópico dos elementos construtivos em terra crua, mostra-se relevante observar, também, os resultados obtidos em campo, de modo a perceber o comportamento do material em diferentes ambientes e condições.

Taylor, Fuller e Luther (2008) estudaram o comportamento térmico de uma sala comercial com paredes de taipa de pilão (30 cm), orientada a sudeste. Os ensaios foram realizados no Sudeste da Austrália (verão seco e quente e inverno temperado e úmido), durante o verão. A sala possui sistema de arrefecimento noturno – pequenas venezianas controladas por computador situadas abaixo das janelas da sala – e ventilador. Os fluxos de calor das paredes foram aferidos por meio de dois termofluxímetros, e a temperatura da parede foi medida por sensores de temperatura superficial. As temperaturas interior e exterior também foram determinadas. O ensaio foi realizado durante quatro dias: três dias de sol e o último nublado. A partir dos dados obtidos, calculou-se a transferência de calor de cada superfície. Ao analisar os resultados foi possível perceber que a janela é a

principal fonte de calor da sala, enquanto que as paredes externas transmitiam, se comparadas, menos calor ao escritório e as paredes interiores absorvem calor durante o período. Já com relação às paredes, o uso de taipa de pilão, em função de sua alta inércia térmica, é uma estratégia válida para o condicionamento térmico passivo no verão, com desempenho superior ao esperado ao analisar a resistência térmica do material. Os parâmetros obtidos nesse estudo são compilados na Tabela 7.

Tabela 7 – Parâmetros obtidos no estudo

Parâmetro	Valor	Unidade
Coefficiente de transmissão térmica	8.3	W/m ² K
Baridade	2050	kg/m ³
Condutibilidade térmica	1.00	W/mK
Calor específico	600	J/kg K

Fonte: Adaptado de (Taylor, Fuller and Luther, 2008)

Soudani et al. (2017) realizaram o monitoramento de uma residência de taipa de pilão (50 cm), localizada em Rhône-Alpes (França), por mais de dois anos. A localidade em questão apresenta clima temperado úmido com verão temperado. Para aquecimento, a construção conta com uma lareira, por outro lado, não apresenta sistema de arrefecimento. As medidas foram realizadas por sensores de temperatura e umidade relativa (sete no interior da casa e um no exterior) e sensor TDR, que avalia o teor em água, posicionado dentro das paredes Sul e Oeste, a 10 cm da face externa. A irradiação solar adotada foi a obtida em estação climática a 110 km da residência. Os fluxos de calor das paredes, as temperaturas exteriores, interiores e irradiação solar foram estimados por médias mensais do período de ensaio. Para a análise dos resultados, os dados foram separados por situação da medição: verão (junho a setembro) e inverno (dezembro a março). Ainda, dentro desses períodos, separou-se os dados em dias ensolarados e nublados, porque as diferenças encontradas nesses casos foram significativas. Determinou-se, então, o atraso térmico referente a cada uma das quatro estações e para as diferentes orientações das paredes (Sul e Oeste), os quais apresentaram diferença, explicitadas na Tabela 8. Segundo os autores, embora as análises realizadas tenham enfoque nas propriedades térmicas, não sendo analisados os parâmetros higroscópicos, é reconhecido que essas propriedades têm influência no desempenho térmico do elemento. Os resultados obtidos verificam que a edificação apresenta desempenho satisfatório no

verão e inverno, havendo pouca necessidade do uso de sistemas adicionais de aquecimento e arrefecimento.

Tabela 8 – Atraso térmico das paredes

Orientação da parede	Estação	Atraso térmico (h)
Oeste	Outono	8
	Inverno	9
	Primavera	7
	Verão	9
Sul	Outono	7
	Inverno	9
	Primavera	7
	Verão	6

Fonte: Adaptado de (Soudani et al., 2017)

A partir de estudos acerca do uso da terra crua como material de construção (taipa de pilão e BTC) foi possível determinar que a terra possui alta inércia térmica, o que ocasiona um atraso térmico que contribui com o conforto térmico do ambiente, visto que absorve calor durante o dia e libera durante a noite. Por conta disso, paredes de terra são uma estratégia válida para utilização em períodos quentes, por conta de sua alta capacidade térmica (Taylor, Fuller and Luther, 2008). Esses autores ainda referem que essa vantagem da construção em terra não é percebida ao se analisar individualmente a resistência térmica do material.

Em adição a isso, é porosa e permeável à água no estado de vapor e atua na regulação da umidade do ambiente. A propriedade citada anteriormente atua na contenção à proliferação de fungos e mofos na face da parede, visto que absorve com rapidez a umidade (Hall and Djerbib, 2004; El Fgaier et al., 2016; McGregor et al., 2016). De modo a melhorar o desempenho das paredes de terra durante a estação de arrefecimento (ou para locais com temperaturas mínimas elevadas), deve-se utilizar um sistema de ventilação noturna na edificação. Além disso, a incidência de luz indireta nos vãos envidraçados e a taxa de infiltração de ar são relevantes na carga térmica da construção.

Segundo Soudani et al. (2016) a condutibilidade térmica não pode ser considerada uma propriedade fixa do solo, mas sim uma propriedade determinada para uma umidade específica. Isso se deve à condição porosa dos componentes da terra. O autor refere que

apesar de existirem alguns trabalhos com enfoque no estudo de caso para análise térmica e higroscópica de construções de terra crua, poucos consideram a influência da umidade no comportamento térmico da construção. Isso se deve pela dificuldade de determinar as propriedades higrotérmicas desses materiais, que são porosos.

2.7 Regulamentação em vigor

Gradativamente, o interesse no uso da terra como material de construção vem aumentando. O material já possui um valor cultural, entretanto, recentemente, passou a chamar maior atenção por seu valor ambiental. O solo apresenta vantagens como o menor consumo energético, a possibilidade de reutilização e as propriedades higroscópicas. Além disso, é versátil: pode ser utilizado como parede autoportante, bloco compactado, enchimento no tabique e agregado miúdo em rebocos e argamassas.

Entretanto, a construção com terra crua é dificultada pela falta de regulamentação específica para esse material. A inexistência de documentos normativos coloca em dúvida a correta execução dos métodos construtivos, bem como não especifica os parâmetros que devem ser atendidos para garantir a qualidade da construção. Ainda que exista, a regulamentação da construção em terra é escassa e muito dispersa (Silva, 2015). Além disso, os critérios presentes nas normas não são padronizados, o que faz com que construções pautadas em diferentes regulamentos apresentem diferenças relevantes. Por fim, por se tratarem de métodos, em grande parte, manuais e rudimentares, existe uma falta de padronização dos elementos executados. Além disso, a fragilidade da construção em terra em relação à água líquida torna necessária a proteção (normalmente executada por beirais de grande dimensão) contra a chuva (Dal Soglio, 2019).

De modo a comparar as normas, Cid-Falceto et al. (2011) analisaram os resultados do mesmo material, de acordo com diferentes regulamentos, para ensaios de erosão (teste do gotejamento e teste do spray). As diferenças encontradas foram tamanhas que a comparação dos resultados se tornou inviável, pois, para um mesmo material, encontram-se resultados diferentes em cada norma. Dentre as maiores dificuldades para a regulamentação da terra crua como material de construção destaca-se a divergência entre resultados obtidos em laboratório e em campo (Lourenço, 2002).

Portugal não compõe o grupo de países que possuem regulamento para construções em terra. Dentre o seletivo grupo, destacam-se a Espanha, a França e a Nova Zelândia. Além desses, Alemanha, Reino Unido, Brasil, Peru, Colômbia, Chile, Equador,

África do Sul, Quênia, Zimbabué, Estados Unidos, Índia e Austrália também possuem normas para construção com esse material. A Tabela 9 compila os conteúdos dos principais regulamentos de construção em terra.

Tabela 9 – Conteúdo das regulamentações (continua)

Grupo	País	Documento	Técnicas	Ano	Conteúdo
Normas oficiais e regulamentação	EUA	NMAC 14.7.4	Adobe, BTC, taipa	2000	Pequenas recomendações. Unidades de construção devem ser testadas
	França	XP P 13-901	BTC	2001	Ábacos de plasticidade e granulometria. Avaliação do solo
		NZS 4297		1998	Recomendações não quantitativas acerca dos solos que não devem ser usados. Teste de queda necessário.
	Nova Zelândia	NZS 4298	Adobe, BTC, taipa	1998	-
		NZS 4299		1998	-
	Peru	NTE E 080	Adobe	2000	Pequenas recomendações sobre a granulometria
	Zimbabué	SAZS 724	Taipa	2001	Recomendações para a granulometria, saia, matéria orgânica e teste da fita
	África	ARSO	BTC	1996	Ábacos de plasticidade e granulometria. Enumera e classifica os testes ao solo, mas não explica procedimentos

Grupo	País	Documento	Técnicas	Ano	Conteúdo
Documentos normativos	Alemanha	Lehmbau Regeln	Adobe, BTC, taipa	1999	Conjunto de recomendações técnicas para a construção em terra
	CYTED	CYTED	Adobe, BTC, taipa	1995	Não define uma aproximação direta à seleção dos solos, recomendações dependem da resistência a seco dos ensaios
	Austrália	HB 195	Adobe, BTC, taipa	2002	Enumeração dos testes empíricos e laboratoriais, com procedimentos definidos para alguns ensaios. Recomendações de granulometria para cada técnica
		Bulletin 5		1992	Recomendações gerais sobre a granulometria. Observações do desempenho do patrimônio edificado
		EBAA		2001	Recomendações não quantitativas acerca dos solos a não usar
	Espanha	NTE E 080	Adobe, BTC, taipa	1992	Adequabilidade acerca de usar os testes sensoriais para tomar decisões. Testes laboratoriais aconselháveis para escolha da granulometria
		SAZS 724	BTC	2008	Indica definições e procedimentos de ensaio para realizar ensaios laboratoriais
	Brasil	NBR 10833	BTC	2012	Procedimento para fabricação de BTC com prensa manual e hidráulica
		NBR 10836		2013	Métodos de ensaio para análise dimensional, determinação da resistência à compressão e da absorção de água
		NBR 16814	Adobe	2020	Requisitos e métodos de ensaio
Documentos técnicos	Houben and Guilaud	-	Adobe, BTC, taipa	1994	Propriedades essenciais: granulometria, plasticidade, compactação e coesão. Testes de identificação preliminares e laboratoriais são explicados. Ábacos de granulometria, plasticidade e compactação
	Rigassi V	-	BTC	1995	Granulometria, plasticidade e compatibilidade, identificação dos solos laboratorialmente e sensorialmente
	MC. Henry PG	-	Adobe, taipa.	1984	Escolha de solos que tem boa performance em construções existentes
	Smith and Austin	-	Adobe, BTC, taipa	1996	Identificação e seleção de solos não são dadas muita importância. Testar provete é a melhor solução
	OIA	-	Adobe, BTC, taipa	1970	Adequabilidade acerca de usar os testes sensoriais para tomar decisões
	Spence and Cook	-	Adobe, BTC, taipa	1983	Conhecer essencialmente as propriedades: tamanho das partículas, limites de Attemberg, compactação e classificação de solos, apesar de não darem as recomendações

Fonte: Adaptado de (D. Gomes, 2015)

A partir da análise de 91 documentos referentes à construção em terra, concluiu-se que 74% dos regulamentos contemplam apenas uma técnica construtiva, taipa, BTC ou adobe, e 27% só consideram a terra estabilizada (Cid, Mazarrón and Cañas, 2011).

Segundo Cid-Falceto et al. (2011), todas normas abrangem a seleção de solos, apresentando parâmetros que devem ser obedecidos. Por outro lado, os parâmetros citados são obtidos a partir de ensaios com baixo grau de confiabilidade. Para o produto final (como a parede de taipa e bloco de BTC), são definidos alguns requisitos para características físico-químicas.

Foi possível perceber, também, que diversos regulamentos analisados fazem referência a outras normas nacionais, para outras tipologias construtivas. Além disso, cada regulamentação trata de ensaios e técnicas específicos, devido à versatilidade e complexidade desse material. Portanto, constata-se que as normas possuem divergências nos procedimentos indicados, parâmetros encontrados e requisitos exigidos para esse tipo de material (Cid, Mazarrón and Cañas, 2011).

Conforme supracitado, Portugal não possui regulamentação para construção em terra. Esse fato foi responsável por parte das dificuldades enfrentadas na campanha experimental dessa investigação, uma vez que se fez necessário recorrer a outras normas (internacionais para construção em terra ou adaptações de normas nacionais referentes a outros materiais). De modo a aumentar a aceitação desse material de construção em novas edificações em solo lusitano, faz-se necessária a criação de um regulamento nacional específico para esse material.

CAPÍTULO 3

CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DOS SOLOS

3.1 Introdução

O programa experimental constituiu-se pela caracterização física e térmica de provetes de taipa, elaborados com dois solos diferentes. Todos os ensaios foram realizados para os dois solos. Provetes prismáticos de diferentes dimensões foram elaborados, com dimensões que melhor atendessem aos procedimentos abaixo propostos.

Este capítulo explicita o processo de caracterização dos materiais de estudo. Todos os ensaios realizados são descritos e detalhados. A campanha experimental foi realizada na Escola Superior de Tecnologia e Gestão, Instituto Politécnico de Bragança (ESTIG, IPB) e na Universidade de Trás-Os-Montes e Alto Douro (UTAD), no Laboratório de Materiais de Construção e Geotecnia e Laboratório de Engenharia Civil, respectivamente.

Para esse estudo, foram utilizados dois solos diferentes, ambos coletados previamente. O primeiro foi fornecido pela Universidade do Minho, em Guimarães, e é identificado como solo S1. Já o segundo foi proveniente de um fabricante de BTCs da região do Alentejo (Santiago do Cacém), identificado por solo S2. A Figura 19 expõe os solos S1 e S2 compactados dentro dos moldes usados nos ensaios propostos.

Esses solos foram selecionados pois já haviam sido empregados em algum tipo de construção em terra anteriormente. O solo S1 resultou da demolição de paredes de taipa construídas em laboratório, pelo que foi um solo previamente estudado para esse fim. Além disso, este solo resultou da correção granulométrica de um solo originalmente recolhido do Alentejo (Odemira), que apresentava uma percentagem de argila excessiva. Já o solo S2 é usado industrialmente na produção de BTCs.

Uma vez que ambos os solos já foram empregados em construções de taipa, estes foram considerados exemplos desse tipo de construção em Portugal. Dessa forma, esse capítulo pretende caracterizar os dois materiais e verificar suas propriedades quando utilizados na construção de taipa.

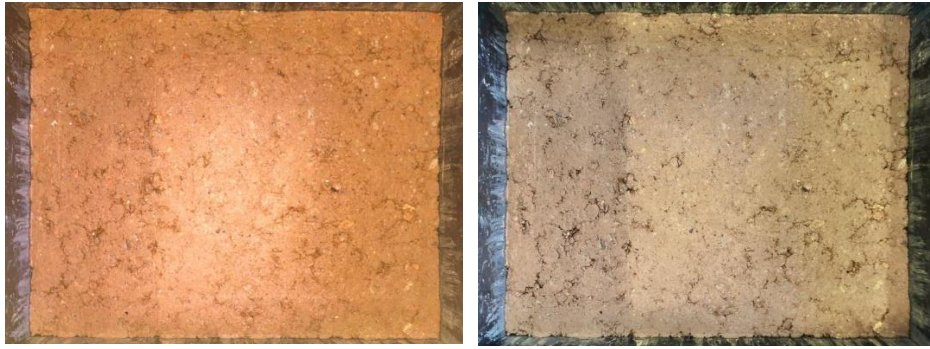


Figura 19. Solos utilizados no ensaio: (a) Solo S1; (b) Solo S2.

Os ensaios de caracterização dos solos foram realizados com o objetivo de enquadrar os solos estudados nos parâmetros existentes na literatura, de maneira a definir se os solos estudados são realmente adequados para a construção em terra crua compactada.

3.2 Teor em matéria orgânica no solo (MOS)

Os solos foram, inicialmente, analisados no âmbito de matéria orgânica, de modo a certificar, através da especificação E-196 (LNEC, 1966b), qual a metodologia mais adequada para a realização da análise granulométrica.

Para cada solo, uma amostra foi colocada em um recipiente cerâmico e seca em estufa a uma temperatura de $105\pm 3^\circ\text{C}$ durante 24 horas e em seguida teve sua massa aferida (m_i). Após, colocou-se o cadinho em uma mufla à temperatura de 550°C pelo período de 1 hora. Ao fim desse tempo, as amostras foram arrefecidas em um exsiccador com sílica gel e na sequência mediu-se as massas finais (m_f). O cálculo do teor de matéria orgânica no solo (MOS), em percentagem, é realizado a partir da Equação 1.

$$\text{MOS} = \left(\frac{m_f}{m_i} \right) \times 100 \quad (1)$$

A

Tabela 10, a seguir, apresenta a massa dos cadinhos e massa inicial e final das amostras, de modo a possibilitar o cálculo do teor em matéria orgânica dos solos.

Tabela 10 – Teor em matéria orgânica dos solos

Amostra	Massa recipiente (g)	Massa inicial (g)	Massa final (g)	MOS
S1	124.92	332.42	328.42	1.93%
S2	91.13	263.91	260.47	1.99%

Fonte: (A Autora, 2021)

A análise dos resultados possibilita perceber que ambos os solos, S1 e S2, não possuem significativo teor de matéria orgânica em sua composição (inferior a 2%) e, portanto, estão enquadrados no que sugere Walker (2005) acerca da mistura ideal para construções em terra. A partir disso, definiu-se a metodologia a ser utilizada na análise granulométrica dos solos, apresentada na sequência.

3.3 Peso específico das partículas

O ensaio para a determinação do peso específico das partículas de um solo foi realizado de acordo com a especificação NP 83 (LNEC, 1965). Separou-se duas amostras já destorroadas e passadas no peneiro ASTM nº 4, uma de cada solo, com 25 g, secas ao ar. Colocou-se cada amostra em um picnômetro, junto a 50 cm³ de água destilada. O provete foi, em seguida, levado a ebulição por 10 minutos, enquanto era agitado ininterruptamente, para libertar o ar aderido às partículas. Depois de arrefecido, o picnômetro foi enchido com água destilada até o traço de referência e foi pesado. Tomou-se nota, também, da temperatura da dispersão. Em seguida, o provete foi transferido para uma cápsula metálica e inserido na estufa, onde permaneceu a uma temperatura de 105±3°C por 48 horas.

O peso específico das partículas é determinado pela Equação 2, abaixo. A Figura 20 ilustra parte do procedimento realizado.

$$\gamma_g = \gamma_{wt} \times \frac{A}{A+B-C} \quad (2)$$

Onde:

γ_g = peso específico das partículas;

γ_{wt} = peso específico da água à temperatura (t) do ensaio;

A = peso da amostra depois de seca na estufa;

B = peso do picnômetro contendo água destilada;

C = peso do picnômetro contendo a amostra e água destilada, à temperatura t.

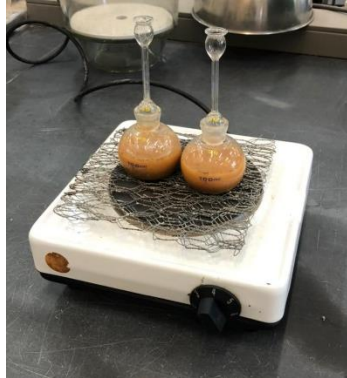


Figura 20. Picnômetros em aquecimento: solo S1 à esquerda, solo S2 à direita

Esse ensaio é importante para a obtenção dos dados necessários à análise granulométrica dos solos. A Tabela 11 compila os resultados alcançados para os dois materiais em estudo.

Tabela 11 – Peso específico das partículas

	S1	S2
Peso específico (g/cm³)	2.58	2.83

Fonte: (A Autora, 2021)

É possível perceber que os dois solos possuem pesos específicos de mesma unidade de grandeza, o que é esperado, considerando que se tratam de solos. Entretanto, a terra S1 possui peso específico das partículas cerca de 8% inferior ao de S2.

3.4 Análise granulométrica das partículas

Os solos estudados foram analisados em peneirações por via seca, de acordo com a E-329 (LNEC, 1970), a fim de classificar os grossos (seixo e areia). Os finos (siltes e argilas), porção de solo que passou pelo peneiro ASTM #200, foram classificados por via úmida, conforme a especificação E-196 (LNEC, 1966b). Após as análises, os resultados dos solos S1 e S2 obtiveram-se as curvas granulométricas.

3.4.1 Peneiração

Para a análise por via úmida, foram preparadas amostras de acordo com a especificação E-195 (LNEC, 1966a). Amostras dos solos S1 e S2 secas ao ar foram desagregadas com auxílio de um pilão, de forma a não alterar a granulometria individual das partículas. Após, fez-se o esquartelamento das amostras e porções de peso definido pela norma foram separadas.

Em seguida, as amostras de solo foram agitadas pela sequência de peneiros especificada, com o auxílio de um agitador mecânico. Ao fim, cada peneiro teve a massa de terra retida aferida por balança digital. Através da distribuição granulométrica do solo, determina-se o percentual de seixos, areias e siltes grossos no solo, bem como a identificação dos grossos.

3.4.2 Sedimentação

A porção de solo que passou pelo peneiro ASTM #200 foi analisada por sedimentação, a fim de classificar os finos. Esse ensaio é realizado de modo a medir a velocidade de sedimentação das partículas em uma proveta com água destilada e defloculante. A curva granulométrica desse material é obtida através da velocidade de queda das partículas, o que está relacionado ao tamanho dessas.

Inicialmente, diluiu-se o material em 100 ml de solução antifloculante (hexametáfosfato de sódio) e aqueceu-se a mistura suavemente durante 10 minutos. Em seguida, 150 cm³ de água destilada foram acrescentados e a solução foi agitada mecanicamente por 15 minutos. Após, lavou-se o solo com 500 cm³ de água destilada sobre o peneiro 200. Por fim, o material passante foi transferido para uma proveta, completa com 1000 cm³ de água destilada. Antes de dar início ao cronômetro, a proveta deve ser agitada.

Feito isso, o cronômetro foi ativado. Com o auxílio do densímetro, realizou-se leitura da densidade da solução após 1, 2, 5, 15, 30, 60, 250, 1440 e 2880 minutos. Em cada leitura realizou-se a medição da temperatura com termômetro digital. A Figura 21 mostra os materiais utilizados.



Figura 21. Materiais utilizados no ensaio de sedimentação: proveta, densímetro e termômetro

Para a obtenção da curva granulométrica, fez-se necessário realizar uma calibração do densímetro utilizado. Por fim, utilizaram-se tabelas e gráfico para a classificação do solo.

3.4.3 Resultados

A fim de traçar a curva granulométrica e determinar a composição do solo S1, analisaram-se os dados explicitados na curva da Figura 22.

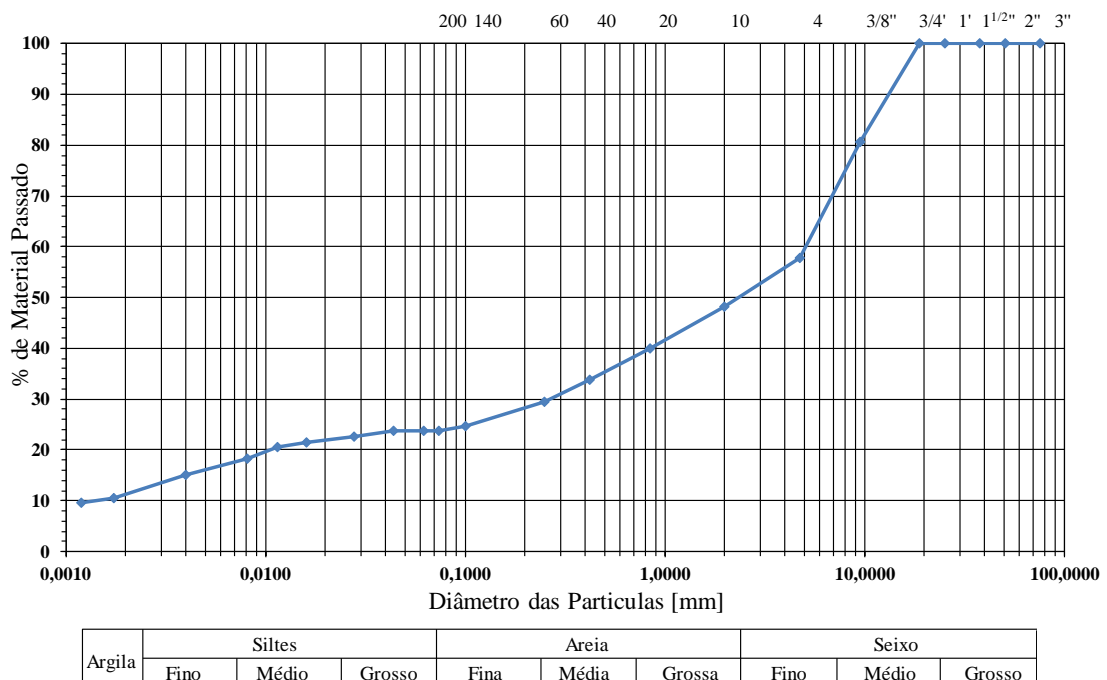


Figura 22. Curva granulométrica S1

Percebe-se, então, que se trata de um solo com ligeiramente menos de 50% de seixo (cascalho), cerca de 25% de areia e 25% de siltes e argilas. Para o solo S2, o mesmo

procedimento de análise dos resultados foi adotado. A curva granulométrica encontra-se na Figura 23.

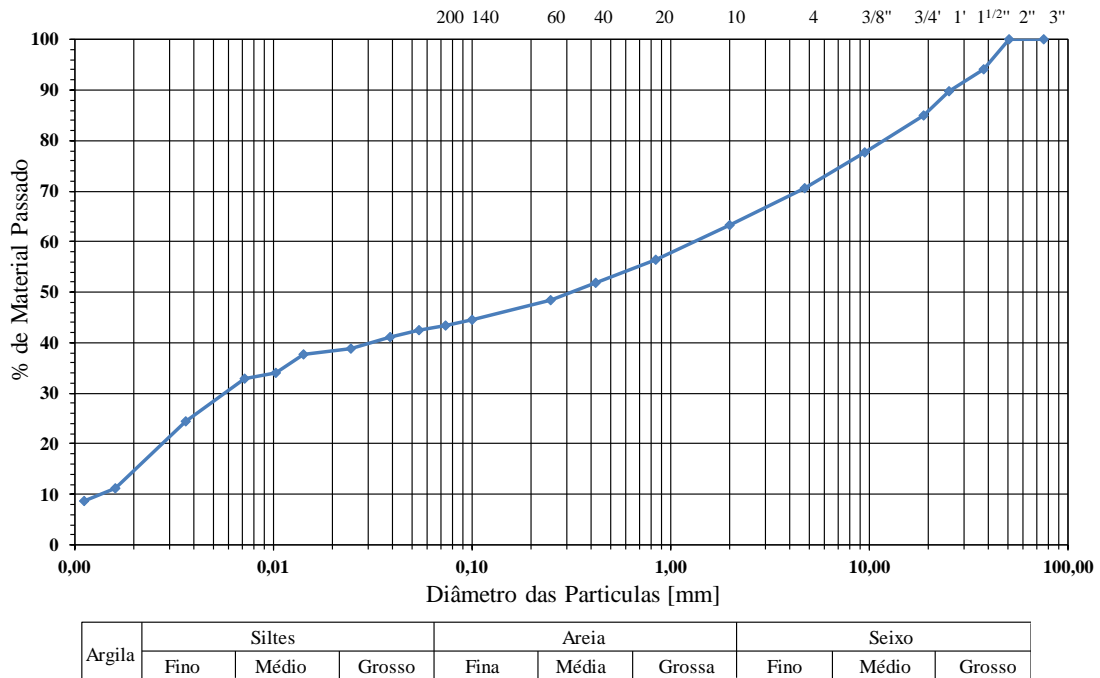


Figura 23. Curva granulométrica S2

O solo S2, por outro lado, é composto por cerca de 36% de seixo (cascalho), 21% de areia e 43% de siltes e argilas. A Tabela 12, a seguir, apresenta o resumo dos resultados obtidos, para posterior comparação e classificação.

Tabela 12 – Quadro comparativo das granulometrias

Material	Seixo (%)	Areia (%)	Siltes (%)	Argilas (%)
S1	48.62	25.87	13.51	12.00
S2	34.77	21.65	26.71	16.99

Fonte: (A Autora, 2021)

Com relação à classificação no Triângulo de Feret, os diagramas dos solos S1 e S2 estão representados na Figura 24.

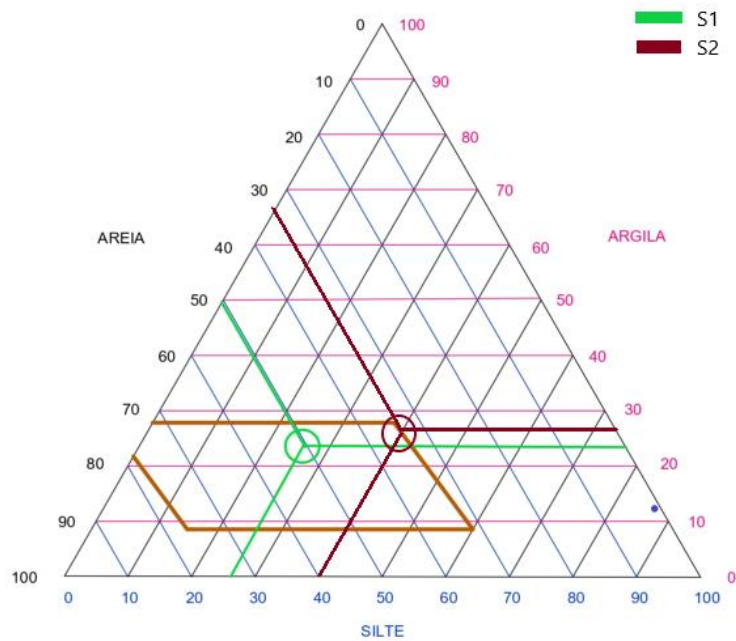


Figura 24. Triângulo de Feret para os solos S1 e S2

É possível perceber, através da análise da Tabela 12 e da Figura 24, que o material S1 é adequado para a construção em taipa. O diagrama de Feret explicita que essa terra se encontra, com certa folga, dentro do recomendado. Além disso, a curva granulométrica desse solo encontra-se dentro do recomendado em 2.5 por Brito (2006), Jayasinghe e Kamaladasa (2007) e McHenry (1984).

Em relação ao material S2, por outro lado, percebe-se, pela análise da Tabela 12 e da Figura 24, que o solo pode ser utilizado para a construção em taipa, ainda que não se enquadre dentro de todas as recomendações. O diagrama de Feret ilustra esse solo dentro do recomendado, mas no limite. Entretanto, a curva granulométrica da terra encontra-se fora do recomendado em 2.5 por Brito (2006), Jayasinghe e Kamaladasa (2007) e McHenry (1984), por conta do alto percentual de finos em sua composição (43,7%). Torgal e Jalali (2009), em contrapartida, ilustraram em sua investigação que terras com granulometria diferente da indicada pelos demais autores podem ser utilizadas, principalmente se cumprirem os requisitos relativos aos limites de consistência do material, que serão analisados em 3.8.

3.5 Equivalente de areia

O ensaio de equivalente de areia, executado a partir da especificação E-199 (LNEC, 1967), é tipicamente realizado em agregados, com o objetivo de determinar a quantidade e classificação de elementos finos plásticos em um solo. Agregados com alta

incidência de finos não podem ser utilizados em obras viárias, por conta da expansibilidade das partículas. Para as construções em taipa, no entanto, a recíproca é verdadeira: pode-se utilizar esse ensaio como outra alternativa à verificação da presença de areias, siltes e argilas no solo.

O procedimento foi realizado a uma temperatura ambiente de 18°C e com amostras dos solos S1 e S2 de 120 gramas cada, as quais foram passadas pelo peneiro 4,75 mm, sendo descartado o retido. O provete foi colocado na proveta graduada juntamente à solução de lavagem e ficou em repouso por 10 minutos. Em seguida, vibrou-se a proveta em mesa vibratória durante 30 segundos. Após, lavou-se o provete com movimentos rotativos até atingir a marca superior da proveta e deixou-a repousar por 20 minutos. Ao fim do tempo, mediu-se a altura total do material sedimentado, expressa como porcentagem da altura da solução na proveta. O valor encontrado é o equivalente de areia. A Figura 25 ilustra os materiais utilizados, bem como a realização do ensaio.



Figura 25. (a) Materiais utilizados no ensaio; (b) Proveta na mesa vibratória; (c) Lavagem do provete; (d) Medição da altura.

Para o ensaio de equivalente de areia, solos com E.A.>40% podem ser considerados areia pura, enquanto solos com E.A.<20% possuem relevante presença de finos (argilas e siltes). Na Tabela 13, os resultados para os dois solos.

Tabela 13 – Equivalente de areia

Solo	S1	S2
h1	32,8	91,3
h2	3,2	1,3
E.A.	9,8	4,2

Fonte: (A Autora, 2021)

Ao analisar a tabela acima, constatou-se que ambos os solos possuem relevante presença de argilas e siltes, por conta do baixo valor de equivalente de areia. E é justamente a existência dos finos que garante aos solos a capacidade coesiva necessária à taipa. Os dados corroboram, também, com os resultados das granulometrias apresentadas anteriormente, pois indicam que o material S2 possui mais finos e menos areia do que o solo S1.

3.6 Limites de consistência

Os limites de consistência de Attenberg, limites de liquidez (LL) e de plasticidade (LP), são obtidos de acordo com as diretrizes da NP 143 (LNEC, 1969). Os ensaios foram executados a partir de uma amostra de 250 g de solo passado no peneiro ASTM #4 (0,425 mm), segundo a especificação E-195 (LNEC, 1966a).

Uma vez que a parcela fina de solo é constituída por siltes e argilas, fez-se necessário calcular esses limites, pois a variação do teor de água provoca diferentes comportamentos no solo. Um solo argiloso com baixo teor de água não é moldável. Com o acréscimo da quantidade de água, atinge-se um estado plástico da argila, que avança para uma solução fluida em caso de demasiada adição (D. Gomes, 2015), conforme a Figura 26.

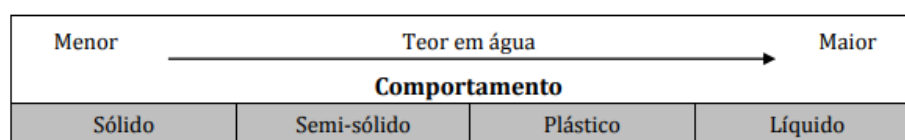


Figura 26. Comportamento dos solos com a variação do teor em água

Fonte: Adaptado de (Souza, 2011)

3.6.1 Limite de liquidez (LL)

O limite de liquidez é obtido através da especificação NP 143 (LNEC, 1969). Corresponde ao teor em água necessário para fechar a parte inferior do sulco realizado na

amostra de solo colocada na Concha de Casagrande com 25 pancadas. O ensaio foi realizado em três pontos para cada solo, de forma a possibilitar o traçado de uma reta, estipulando corretamente o LL.

A amostra foi composta por 100 g de solo (que não tenha ficado retido no peneiro #40) umedecido com água destilada até a formação de uma pasta homogênea. Para cada repetição do ensaio, acresceu-se solo à mistura, envolvendo-a com o auxílio de espátula por 5 minutos. A pasta foi colocada na Concha de Casagrande em uma camada de cerca de 1 cm. Com o riscador, abriu-se um sulco no provete, em sua extensão, conforme a Figura 27 e Figura 28. Após isso, aplicou-se golpes de queda no aparelho até que a parte inferior do sulco se fechou.

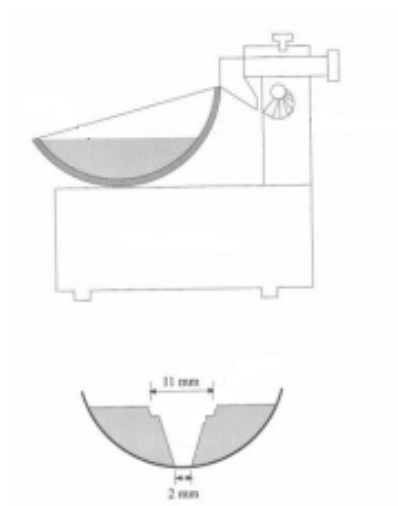


Figura 27. Execução do ensaio com o uso da Concha de Casagrande

Fonte: Adaptado de (Fernandes, 2006)

A pasta foi colocada em uma cápsula de alumínio e teve a massa aferida em sequência. Posto isso, colocou-se a cápsula na estufa em temperatura de $105 \pm 3^\circ\text{C}$ durante 48 horas. Em seguida, registrou-se a massa seca da amostra, a fim de obter-se o teor de umidade.



Figura 28. Concha de Casagrande e riscador; (a) Solo S1; (b) Solo S2.

3.6.2 Limite de plasticidade (LP)

Conforme a NP 143 (LNEC, 1969), para a determinação do LP, preparou-se uma pasta de solo com água destilada. A partir disso, moldaram-se porções esféricas de mesmo volume. A esfera foi rolada entre a palma da mão e uma placa de vidro, formando um filamento cilíndrico com diâmetro de 3 mm, conforme a Figura 29. O filamento deve começar a apresentar fissuras ao atingir esse diâmetro, se fissurar antes, deve-se adicionar mais água; se atingir esse diâmetro sem fissuras, acresce-se solo.

Ao obter o ponto certo para o ensaio, o provete foi colocado em uma cápsula de alumínio e teve a massa aferida em sequência. Posto isso, colocou-se a cápsula na estufa em temperatura de $105 \pm 3^\circ\text{C}$ durante 48 horas para posterior determinação do teor de umidade.

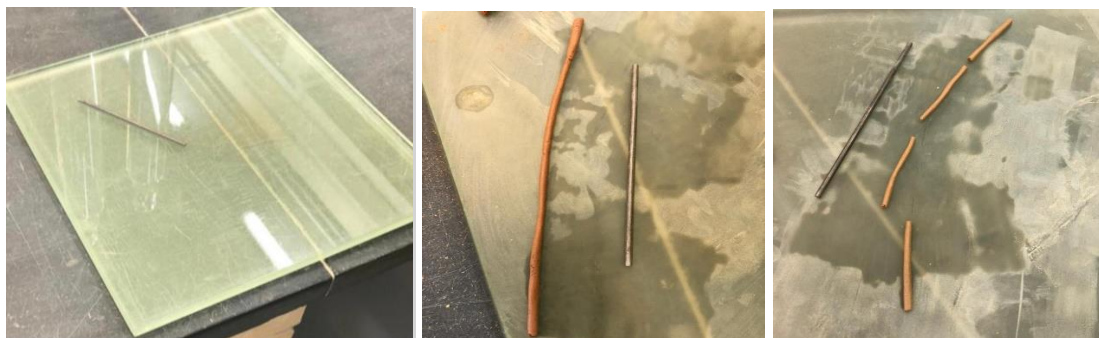


Figura 29. (a) Tábuia em vidro fosco e bastão guia; (b) Solo S1; (c) Solo S2.

3.6.3 Índice de plasticidade (IP)

O índice de plasticidade (IP), dado pela Equação 3, consiste no intervalo, no âmbito de teores em água, em que o solo apresenta comportamento moldável.

$$IP = LL - LP \quad (3)$$

A partir desse parâmetro definiu-se o grau de plasticidade do solo. Conforme explicitado em 2.5, solos com IP entre 1 e 7 são considerados fracamente plásticos, já para valores entre 7 e 15, possuem plasticidade média, por fim, solos com IP acima de 15 têm plasticidade elevada.

3.6.4 Resultados

Para a construção em taipa, de acordo com Doat (1985), o limite de liquidez do solo deve estar preferencialmente entre 30 e 35. No entanto, limites dentro do intervalo de 25 a 50 podem ser utilizados. A Tabela 14 e a Figura 30 explicitam os resultados obtidos.

Tabela 14 – Limites de Liquidez

	S1			S2		
	1	2	3	1	2	3
Número de ensaio	1	2	3	1	2	3
Número de pancadas	13	20	30	12	23	35
Número de recipiente	1	3	2	7	11	9
Peso do recipiente	11.06	13.5	13.36	13.64	13.39	13.41
Peso do recipiente + solo húmido	23.76	23.31	21.79	21.38	21.22	25.02
Peso do recipiente + solo seco	20.5	20.83	19.73	18.94	18.8	21.57
Peso da água	3.26	2.48	2.06	2.44	2.42	3.45
Peso do solo seco	9.44	7.33	6.37	5.3	5.41	8.16
Teor de umidade	34.53	33.83	32.34	46.04	44.73	42.28
Limite de Liquidez (%)	33.0			43.8		

Fonte: (A Autora, 2021)

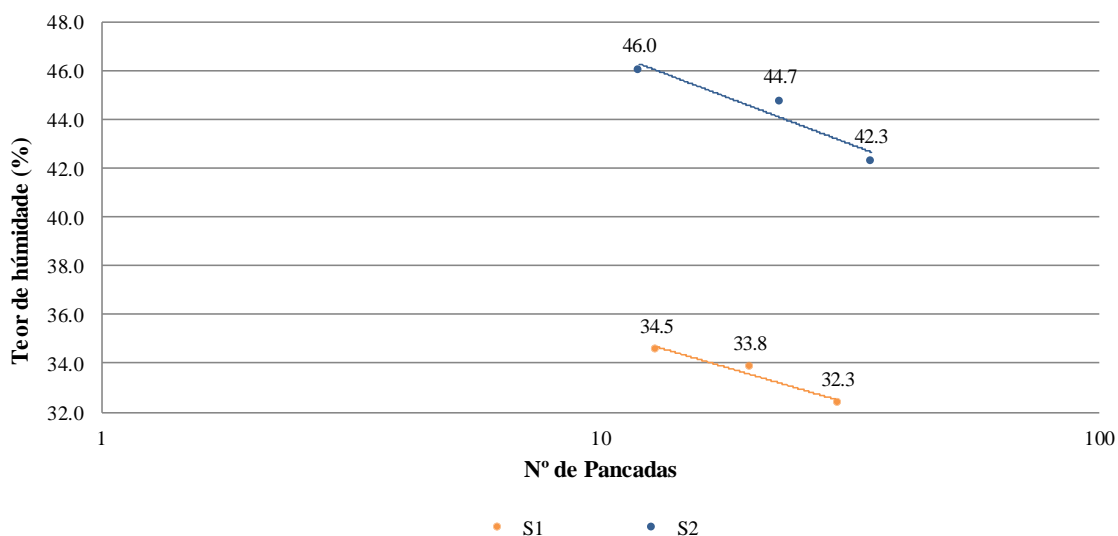


Figura 30. Limites de Liquidez

A partir da análise dos resultados obtidos, percebe-se que ambos os solos se encontram dentro do permitido para a construção de taipa. Entretanto, o solo S1, com LL de 33,0%, encontra-se dentro do intervalo recomendado, enquanto que o solo S2, LL de 43,8%, cumpre apenas os requisitos de valores mínimos e máximos permitidos.

Relativamente aos Limites de Plasticidade, Doat (1985) diz que os valores recomendados são de 12 a 22, mas solos com LPs entre 10 e 25 podem ser utilizados. Os resultados obtidos estão explicitados na Tabela 15.

Tabela 15 – Limites de Plasticidade

	S1		S2	
Número de ensaio	1	2	1	2
Número de recipiente	1	2	6	20
Peso do recipiente	16.97	17.35	16.96	17.62
Peso do recipiente + solo húmido	18.70	19.20	18.47	19.13
Peso do recipiente + solo seco	18.40	18.88	18.16	18.84
Peso da água	0.30	0.32	0.31	0.29
Peso do solo seco	1.43	1.53	1.20	1.22
Teor de umidade	21.0	20.9	25.8	23.8
Limite de Plasticidade (%)	20.95		24.80	

Fonte: (A Autora, 2021)

Assim como para o LL, o solo S1 apresenta Limite de Plasticidade dentro do recomendado pela bibliografia (20,95%). O solo S2, também em consonância com seu LL, apresenta Limite de Plasticidade dentro dos valores mínimos e máximos permitidos (24,80%).

Por fim, através da análise dos limites anteriores, foi possível obter-se o Índice de Plasticidade das terras. É definido na bibliografia que IPs entre 7 e 18 são considerados ideais para a construção em terra compactada. Entretanto, há a possibilidade de utilizar materiais com índices entre 7 e 29 para esses métodos construtivos assegurando a viabilidade da edificação. A Tabela 16 apresenta os resultados encontrados.

Tabela 16 – Índices de Plasticidade

	S1	S2
Índice de Plasticidade (%)	12	19

Fonte: (A Autora, 2021)

O Índice de Plasticidade do solo S1 (12%) se encontra dentro do considerado recomendado por Doat (1985), com plasticidade considerada média, enquanto que o solo S2 (19%) está, outra vez, dentro dos limites mínimos e máximos propostos e possui plasticidade elevada.

3.7 Ensaio de Compactação Proctor

O ensaio de compactação Proctor tem como objetivo determinar o teor ótimo em água de um solo, bem como sua baridade seca, através da máxima compactação de uma amostra. A partir da repetição do ensaio para diferentes teores de umidade, é possível elaborar a curva de compactação do solo. O ponto máximo da curva representa o teor em água ótimo, no qual se tem a baridade seca máxima.

O procedimento foi realizado em acordo com a especificação E-197 (LNEC, 1966c). Com base na análise granulométrica dos solos, os ensaios foram realizados em molde cilíndrico grande (152 mm de diâmetro e 178 mm de altura, incluindo a alonga), com alta energia de compactação, conforme sugere a metodologia utilizada por Pereira (2013) para a caracterização de solos para construção em taipa. Foram separadas 5 amostras de S1 e 5 amostras de S2 com aproximadamente 6 kg cada (todas passadas pelo peneiro ASTM #4). Para cada amostra ensaiada, o teor em água foi variado em 2%.

A compactação dos moldes foi realizada por camadas, com o uso de um pilão de massa 4,54 kg a cair de 457 mm de altura. Ao fim da compactação, retirou-se a alonga do molde e rasou-o, para então medir a massa do provete; dessa forma, é possível obter a baridade úmida do solo (quociente entre massa e volume). Para o cálculo do teor de umidade do provete, uma amostra de cada provete foi colocada em uma cápsula de alumínio, para a aferição de sua massa úmida e seca (após ser colocada na estufa a $105\pm 3^{\circ}\text{C}$ por 48 horas).

A baridade seca γ_s do solo é obtida através da Equação 4, que relaciona a baridade úmida (γ_w) e o teor de umidade (w).

$$\gamma_s = \frac{\gamma_w}{100+w} \times 100 \quad (4)$$

A baridade seca máxima do solo, ou massa volúmica seca, é determinada através da análise do gráfico composto pelos pontos ensaiados. Ao conectar os resultados, é possível obter uma parábola, que apresenta a massa volúmica máxima no ponto de máximo do gráfico. O respectivo valor de x representa o teor em água ótimo para o solo. Os resultados dos solos S1 e S2 estão compilados na Figura 31.

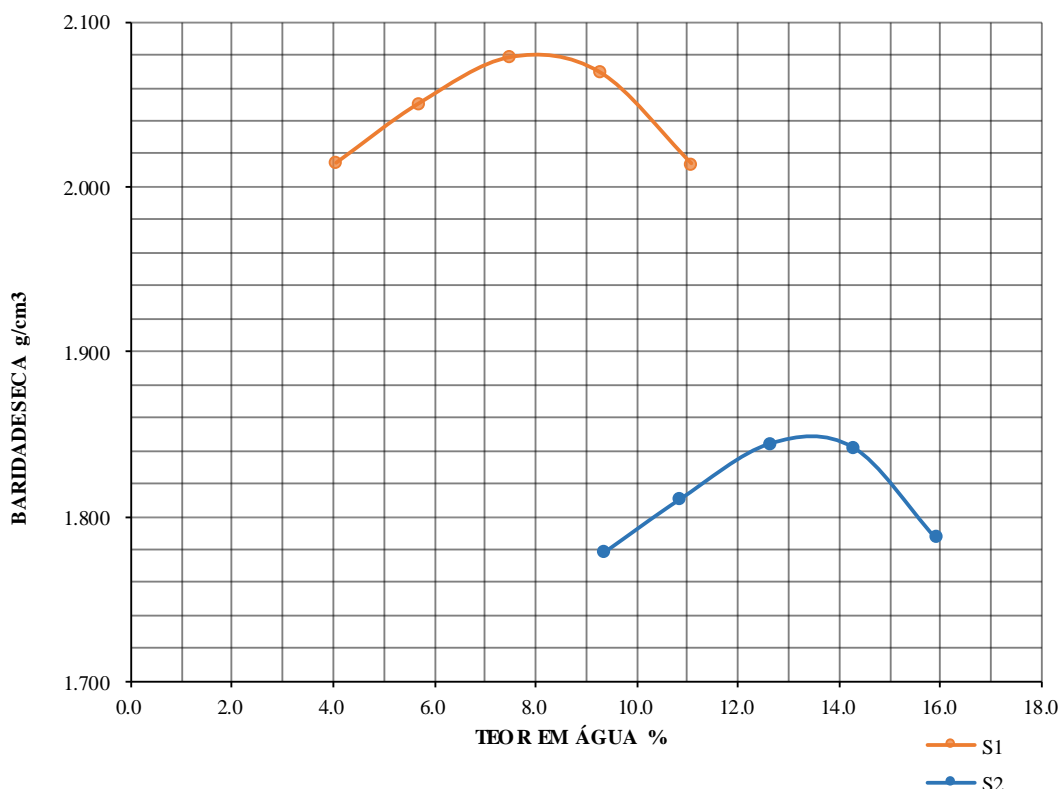


Figura 31. Curvas de compactação Proctor

Ao analisar a parábola referente ao S1, percebe-se que o teor em água ótimo para esse solo está em cerca de 8%, com a baridade seca máxima em 2,080 g/cm³. O solo S2, por outro lado, possui teor em água ótimo mais elevado, cerca de 13,5%, e baridade seca máxima próxima de 1,850 g/cm³. Um resumo dos valores obtidos é apresentado na Tabela 17.

Tabela 17 – Resultados do Ensaio Proctor

	S1	S2
Teor em água (%)	8.00	13.50
Baridade seca (g/cm³)	2.08	1.85

Fonte: (A Autora, 2021)

De acordo com as diretrizes do CRATerre (1979), para que um material seja realmente adequado para construção em terra, ele deve apresentar teor de umidade ótimo para compactação entre 9% e 17%. Nesse caso, apenas o solo S2 cumpriria o requisito, ainda que o solo S1 não esteja muito abaixo do indicado. Por outro lado, a NZS, considerada das mais respeitadas normas de construção em terra a nível mundial, determina que solos com quaisquer teores em água podem ser utilizados para esses métodos, desde que a compactação seja realizada com teor de umidade até 3% abaixo ou 5% acima do teor de água ótimo.

Já relativamente à baridade seca, as duas terras apresentam valores considerados muito satisfatórios por Doat et al. (1979). Por fim, os dois solos, no que diz respeito ao Ensaio Proctor, foram considerados como adequados para uso em taipa.

3.8 Discussão dos resultados

De modo a auxiliar na melhor compreensão de todos os resultados, a Tabela 18 traz um comparativo entre os valores obtidos para o solo S1, S2 e o que indica a literatura.

Tabela 18 – Resumo da caracterização física

Ensaio	S1	S2	Literatura	Autor
TEOR EM MATÉRIA ORGÂNICA	1.93%	1.99%	<2%	Walker et al. (2005)
EQUIVALENTE DE AREIA	9.80%	4.20%	-	-
LIMITE DE LIQUIDEZ	33.00%	43.80%	30 - 35	Doat et al. (1979)
LIMITE DE PLASTICIDADE	20.95%	24.80%	12 - 22	Doat et al. (1979)
ÍNDICE DE PLASTICIDADE	12.00%	19.00%	7 - 18	Doat et al. (1979)
BARIDADE MÁXIMA SECA	2,08 g/cm ³	1,85 g/cm ³	Muito satisfatório	Doat et al. (1979)
TEOR EM ÁGUA ÓTIMO	8.00%	13.50%	9 - 17 3% abaixo a 5% acima do teor ótimo	Doat et al. (1979) NZS 4297: 1998

Fonte: (A Autora, 2021)

Percebe-se, através da análise dos resultados, que o solo S1 se encontra dentro do recomendado pela literatura para todos os ensaios realizados, com exceção do teor em água ótimo. Entretanto, é sabido que os valores indicados para esse parâmetro não são unânimes na bibliografia, uma vez que um material com teor em água ótimo de 8%,

preparado em concordância com a NZS 4298:1998, apresenta diferenças irrisórias se comparado ao mesmo material com teor ótimo de 9%. Com relação à análise granulométrica, a terra também cumpre o recomendado na distribuição das partículas e no Diagrama de Feret.

O solo S2, por outro lado, apresenta teor em água e matéria orgânica em concordância com o proposto, bem como baridade máxima seca muito satisfatória (ainda assim, a baridade de S1 é significativamente superior), mas encontra-se fora do recomendado para os Limites de Consistência. Além disso, sua granulometria não é considerada adequada no que diz respeito à distribuição das partículas. Ainda que o solo S2 não possa ser enquadrado nos parâmetros indicados na literatura, e uma vez que conta com valores dentro do permitido pela bibliografia, é possível garantir a exequibilidade de suas edificações. Além disso, a pesquisa realizada por Torgal e Jalali (2009) explicita outras edificações existentes em Portugal cujo solo utilizado possui parâmetros enquadrados apenas dentro do permitido pela bibliografia.

Ainda que os dois solos apresentem diferenças do que diz respeito às características físicas, ao classificar os materiais através da norma ASTM D2487-85 (ASTM, 1987), percebe-se que ambos possuem a mesma classe: cascalho argiloso com areia.

Por fim, é possível concluir que, no âmbito da caracterização física, o solo S1 é considerado mais adequado para a construção em taipa do que o S2. Contudo, os parâmetros apresentados em 2.5 foram definidos a partir da trabalhabilidade ideal de um solo e em função do impacto das propriedades do solo na resistência mecânica da construção que o utiliza. Assim sendo, o estado do conhecimento acerca do impacto da escolha de um solo no desempenho térmico da construção em que é empregado carece de estudos. Por esse motivo, no capítulo que segue, esse tema será abordado com mais detalhes.

CAPÍTULO 4

CARACTERIZAÇÃO TERMOHIGROMÉTRICA

4.1 Introdução

Uma vez que existe pouca investigação nas últimas décadas acerca do desempenho termohigrométrico de paredes de taipa, a caracterização termohigrométrica desses elementos tem como objetivo contribuir para o aumento do conhecimento científico nesta área, nomeadamente no que respeita à indicação de parâmetros para outros tipos de solos.

Dessa forma, o comportamento térmico de paredes de taipa será analisado através de dois ensaios experimentais, para estimar o valor dos coeficientes de transmissão térmica e condutibilidade térmica. O primeiro permite determinar o valor de U através da norma ISO 9869 (ISO, 2014), por meio de sistemas de medição de fluxo de calor. Já o segundo possibilita a determinação de λ através do método de placas quentes, norma EN 12667 (European Committee For Standardization, 2001). Para complementar a análise dos resultados, utilizou-se, ainda, de termogramas recolhidos durante o ensaio de determinação do coeficiente de transmissão térmica.

Por fim, analisaram-se os diferentes solos estudados com relação à teor de umidade e absorção da água sob baixa pressão. O ensaio de absorção da água sob baixa pressão é regido pela ficha do LNEC FE Pa 39.1 (LNEC, 2002), com o auxílio de Tubos Karsten.

4.2 Fabricação dos provetes

De modo a realizar os ensaios para a caracterização termohigrométrica dos solos, foram desenvolvidos provetes prismáticos de dimensões diversas, de acordo com cada ensaio. Para o ensaio de absorção de água a baixa pressão, executou-se 1 provete de cada solo com dimensões de 150 x 150 x 150 mm. Já para o ensaio de condutibilidade térmica, os provetes utilizados foram de 150 x 150 x 50 mm e 3 unidades para cada solo.

Perante a dificuldade em executar e transportar paredes reais para a avaliação térmica dos solos, desenvolveu-se, para os ensaios de transmissão térmica e teor em água, 5 protótipos de paredes (3 do material S1 e 2 do material S2), com 500mm de largura, 300mm de altura e diferentes espessuras. Para garantir que os ensaios simulassem ao máximo o comportamento de uma parede real, optou-se por utilizar espessuras condizentes com a realidade: entre 350 e 500 mm (Augusta et al., 2007).

Uma vez que o ensaio de transmissão térmica comporta 3 provetes simultaneamente, optou-se por executar apenas 2 provetes do solo S2. Dessa forma, foi possível manter um provete do solo S1 durante o ensaio 2, de modo a comparar os

resultados obtidos. Além disso, a quantia de solo S2 poderia não ter sido suficiente para a execução dos 3 provetes.

A Tabela 19 traz um compilado de informações acerca dos provetes executados. É possível compreender, também através da Tabela 19, a nomenclatura dos provetes. Para o ensaio de transmissão térmica, utilizou-se a letra *W* de *wall* (parede em inglês) seguida da espessura do provete, por fim, identificou-se o solo, se *S1* ou *S2*. No ensaio de condutibilidade térmica, adotou-se a letra *A* de amostra seguida do número que representa o provete, visto que são idênticos, por último, a identificação do solo. O ensaio de absorção de água, por fim, foi realizado com apenas uma amostra de cada solo.

Tabela 19 – Provetes executados

Ensaio	Solo	Nome	Comprimento x Altura	Espessura
Coefficiente transmissão térmica e Teor em água	1	W11		35 cm
		W12	50 x 30 cm	40 cm
		W13		50 cm
	2	W21	50 x 30 cm	35 cm
		W22		40 cm
	Absorção d'água a baixa pressão	1	A1	15 x 15 cm
2		A2	15 x 15 cm	15 cm
Condutibilidade térmica	1	A11		5 cm
		A12	15 x 15 cm	5 cm
		A13		5 cm
	2	A21		5 cm
		A22	15 x 15 cm	5 cm
		A23		5 cm

Fonte: (A Autora, 2021)

De modo a melhor compreender as diferenças entre os provetes, o esquema ilustrado na Figura 32 mostra as quantidades e tamanhos.







	Coefficiente de transmissão térmica e Teor em água	Absorção da água	Condutibilidade térmica
S1	 W35S1 W40S1 W50S1	 A1	 A1S1 A2S1 A3S1
S2	 W35S2 W40S2	 A2	 A1S2 A2S2 A3S2

Figura 32. Provetes executados

A metodologia utilizada na execução de todos os provetes foi a mesma, a qual está detalhada na sequência.

4.2.1 Preparação do solo

Previamente à execução dos provetes, foi necessário preparar o solo. Para tal, o solo foi colocado em tabuleiros metálicos, que foram levados à estufa, a uma temperatura de 105°C pelo período de 3 horas, de modo a retirar parte da umidade do solo. Após o arrefecimento, todos os torrões de terra foram desfeitos, com auxílio de pilão de borracha.

Na sequência, realizou-se a correção da umidade do solo, de modo a torná-lo ideal à compactação. Dessa forma, acrescentou-se, aos poucos, água ao material, enquanto o solo foi misturado e homogeneizado com as mãos. Para cada tabuleiro de solo (cerca de 12 kg), o processo de preparo levou em torno de 40 minutos. De modo a determinar a umidade ótima de compactação para a construção em taipa, utilizaram-se dois métodos indicados na bibliografia: ensaio de compactação Proctor e teste de queda.

A umidade ótima de acordo com o ensaio Proctor foi encontrada conforme descrito em 3.6.4. Entretanto, na prática, diferentes porções de solo podem apresentar granulometrias ligeiramente diferentes. Dessa forma, para cada tabuleiro preparado, percebeu-se que o teor em água necessário para o solo adquirir a trabalhabilidade adequada foi ligeiramente diferente. De modo a garantir a homogeneidade do comportamento do solo em todos os provetes, e como validação prática da umidade indicada no ensaio Proctor, realizou-se o teste de queda, descrito na norma neozelandesa NZS4298 (NZS, 1998b), em todos os tabuleiros de solo preparados.

O teste consiste na moldagem de uma porção de solo em formato esférico entre as duas palmas das mãos. Depois de moldada, deve-se deixar cair a amostra de uma altura de 1,5 m sobre uma superfície plana e rígida (e.g. tabuleiro metálico). Em seguida deve-se analisar o estado do solo após a queda. Se tiver pouca umidade no solo, não será possível formar uma bola. Já quando muito úmido, a bola fica “achatada”, com aspecto encharcado (saturado de umidade), mas não desagrega. A Figura 33 esquematiza os estados do solo nesse teste.



Figura 33. Esquema do teste de queda

Fonte: Adaptado de (NZS, 1998b)

A Figura 34 ilustra o aspecto do solo durante o teste de queda, para melhor compreensão.



Figura 34. Aspecto do solo no teste de queda: (a) Muito seco; (b) Utilizável; (c) Muito úmido

Por fim, todos os tabuleiros de solo umedecidos foram despejados em um recipiente, o qual foi coberto, para que o solo não perdesse umidade, e deixado em repouso por 24h, a fim de homogeneizar o teor em água das partículas. Cada tabuleiro umedecido teve uma pequena amostra de solo colocada em cápsula metálica. Ao fim do preparo do solo necessário para a compactação de uma camada, a cápsula metálica com a amostra do solo teve sua massa aferida. As cápsulas foram secas na estufa a uma temperatura de $105\pm 3^{\circ}\text{C}$ por 48 horas e, depois de arrefecidas, as massas foram aferidas novamente, conforme a Tabela 20. Dessa forma, obteve-se o teor em água real para cada

provetes executado, o que possibilitou confrontar com o teor em água encontrado pelo ensaio Proctor.

Tabela 20 – Teor de umidade dos provetes

Ensaio	Solo	Provete	Dimensões	Espessura	Umidade real (Teste de queda)	Umidade ótima (Proctor)	Limite (NZS)
Coefficiente transmissão térmica e Teor em água	1	W35S1	50 x 30 cm	35 cm	8.86%	8.00%	5% - 13%
		W40S1		40 cm	8.91%		
		W50S1		50 cm	8.92%		
	2	W35S2	50 x 30 cm	35 cm	14.59%	13.50%	10.5% - 18.5%
		W40S2		40 cm	14.85%		
	Absorção da água	1	A1	15 x 15 cm	15 cm	8.93%	8.00%
2		A2	15 x 15 cm	15 cm	14.78%	13.50%	10.5% - 18.5%
Condutibilidade térmica	1	A1S1	15 x 15 cm	5 cm	8.96%	8.00%	5% - 13%
		A2S1		5 cm	8.79%		
		A3S1		5 cm	8.88%		
	2	A1S2	15 x 15 cm	5 cm	14.68%	13.50%	10.5% - 18.5%
		A2S2		5 cm	14.61%		
		A3S2		5 cm	14.76%		

Fonte: (A Autora, 2021)

Todos os resultados obtidos através do teste de queda mostram que as umidades reais de todos os provetes estão dentro do limite proposto pela NZS, relativamente aos resultados encontrados através do ensaio Proctor. Entretanto, percebe-se que os resultados obtidos pelo teste de queda indicam necessidade de mais água (cerca de 1%) do que o sugerido na compactação Proctor para atingir a trabalhabilidade adequada do solo. Visto que o teste de queda é o método mais utilizado para a determinação da umidade ótima em construções reais de taipa, optou-se por executar os provetes de acordo com seus resultados.

4.2.2 Compactação

A compactação dos provetes ocorreu da mesma forma independentemente de suas dimensões. As camadas foram compactadas a cada 100 mm. Percebeu-se que a altura da camada diminuiu, em média, pela metade após a compactação, portanto, uma camada de 100 mm de pré-compactação representa cerca de 50 mm compactados. Dessa forma, os provetes cúbicos do ensaio de absorção de água a baixa pressão foram compactados em 3 camadas, enquanto os do ensaio de condutibilidade térmica foram compactados em apenas uma. Já os provetes maiores, de 300 mm de altura, foram executados com 6 camadas. A Figura 35 auxilia na compreensão da quantidade de camadas por provete.

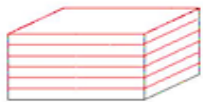


	Coefficiente de transmissão térmica e Teor em água	Absorção da água a baixa pressão	Condutibilidade térmica
Camadas de compactação	 6 camadas	 3 camadas	 1 camada

Figura 35. Esquema das camadas compactadas em cada provete

Os provetes menores, dos ensaios de condutibilidade térmica e absorção de água a baixa pressão, foram moldados em cofragem de ferro (normalmente utilizada para moldagem de provetes cúbicos de betão), conforme a Figura 36.



Figura 36. Molde de ferro utilizado para execução de provetes

Já para os protótipos de paredes, utilizados nos ensaios de teor em água e coeficiente de transmissão térmica, os moldes foram desenvolvidos em placas de compensado naval de 21 mm, com medidas específicas para cada provete, e sistema que possibilitou que as formas fossem desmontadas, para desmoldagem das paredes, e posterior remontagem para compactação de outro provete de mesma dimensão. A Figura 37 explicita uma dessas cofragens de madeira.



Figura 37. Molde de madeira utilizado para execução de provetes

De modo a padronizar a energia de compactação, optou-se por utilizar o compactador manual do ensaio Proctor Modificado, que possui cerca de 4,5kg. Uma base metálica quadrada foi posicionada abaixo do compactador, de modo que a ferramenta alcançasse todos os cantos do molde, conforme a Figura 38. Aplicou-se, em cada camada, o número de golpes necessário para que o solo atingisse o estado máximo de compactação. Uma vez que esse estado é atingido, o solo emite um ruído metálico quando recebe pancadas. Para um protótipo de parede de 40 cm de espessura, por exemplo, cada camada foi compactada por cerca de 25 minutos até atingir o nível de compactação adequado.



Figura 38. Solo compactado, molde em madeira e compactador manual

Todos os provetes foram executados em um período de 45 dias. Cada parede demorou em torno de uma semana para ser executada, a variar com a espessura de cada uma, enquanto os demais provetes foram todos concluídos em três dias. De modo a garantir a ligação entre as camadas dos provetes, foram feitas pequenas ranhuras na superfície da camada recém compactada. Ainda, ao fim de cada dia (durante o processo de compactação de um provete), o provete era coberto com um plástico e vedado com fita

cola, para garantir que a superfície da camada inferior, já compactada, não perdesse umidade.

Após o final da compactação, todos os provetes foram desmoldados e levados à estufa por 72 horas a uma temperatura de 38°C, de modo a auxiliar na secagem das superfícies. Os protótipos de parede permaneceram no laboratório por 20 dias, até serem transportadas para a UTAD, em Vila Real. Os outros provetes foram ensaiados cerca de 20 dias após sua compactação.

Após a compactação, os provetes foram desmoldados e levados à estufa por 48 horas, em uma temperatura de 35°C, para auxiliar na secagem das superfícies.

4.3 Determinação experimental do coeficiente de transmissão térmica

O coeficiente de transmissão térmica (U) é um dos coeficientes que traduz a transferência de calor em um sistema. É a taxa com a qual o calor é transmitido através do elemento, em função da área de superfície e diferença de temperatura entre as faces exterior e interior (Leftheriotis and Yianoulis, 2012).

O procedimento experimental descrito abaixo foi realizado com o objetivo de estimar o valor do coeficiente de transmissão térmica para protótipos de paredes dos dois solos estudados com diferentes espessuras. Ao fim, foi possível, com a utilização de valores do Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação (DRE, 2015b), estimar o valor da condutibilidade dos materiais S1 e S2.

O ensaio foi executado de acordo com a norma internacional ISO 9869 (ISO, 2014). Além disso, a metodologia foi executada com êxito em investigações anteriores realizadas no Laboratório de Engenharia Civil da UTAD (Cunha et al., 2015; Sá et al., 2016; Magalhães, 2017; Pinto et al., 2017; Fernandes, 2020).

4.3.1 Configuração experimental

Em alternativa à célula de teste térmico, proposta na norma utilizada, utilizou-se uma sala de teste térmico, com dimensões de 4,00 x 3,00 x 2,54 m (comprimento, largura e altura) e fachada orientada a Norte com três vãos de janelas. A sala ainda contava com três sistemas de medição do fluxo de calor, um para cada provete, compostos por dois sensores de fluxo de calor e quatro sensores de temperatura superficial e dois sistemas compostos por um datalogger e um termohigrômetro, um no interior e um no exterior.

Por fim, a sala contava com um computador para recolha dos resultados e dois aquecedores. A Figura 39 apresenta um esquema da sala de teste.

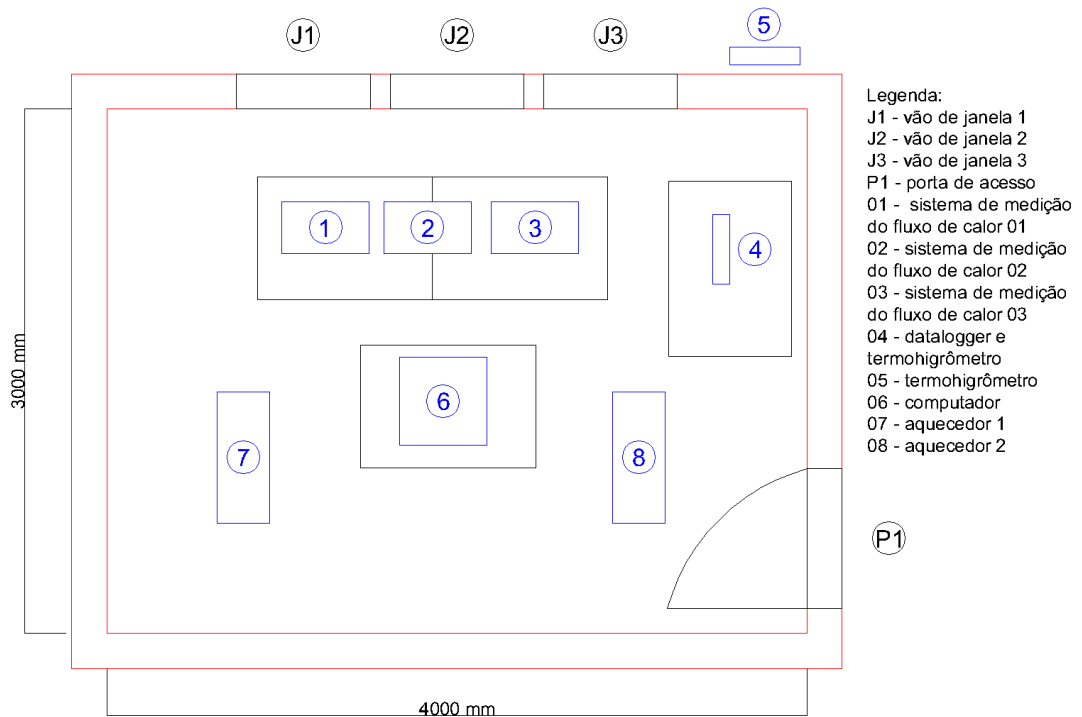


Figura 39. Esquema da sala de ensaios térmicos

Para os ensaios, os protótipos foram posicionados no centro dos vãos das janelas, de dimensões 615 x 765 mm, a uma altura de 1,60m, conforme a Figura 40.

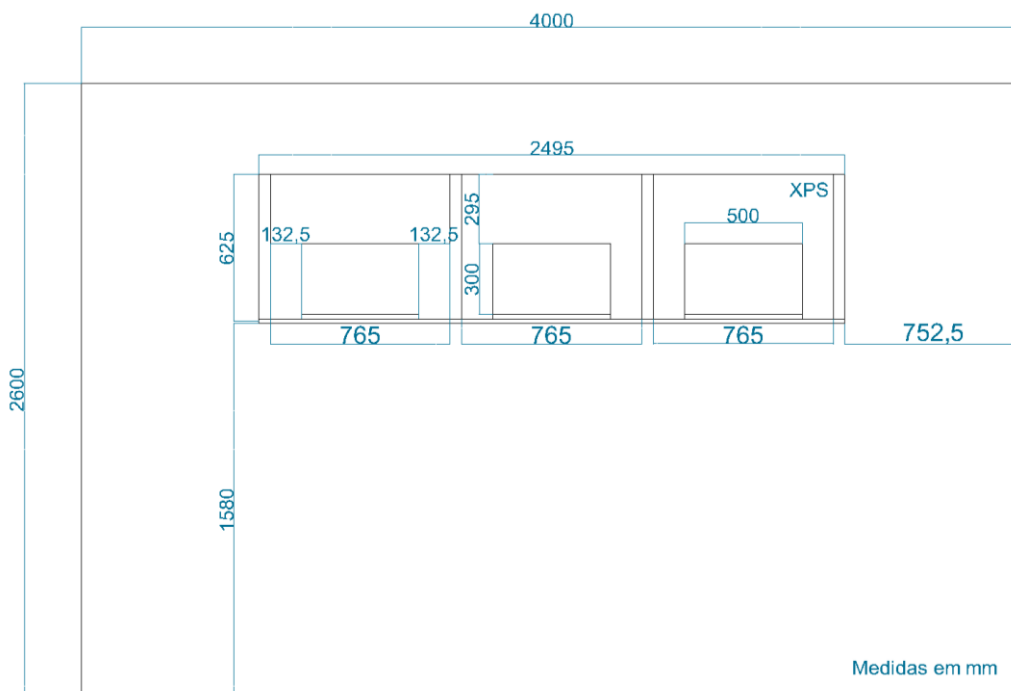


Figura 40. Posicionamento dos provetes em relação a sala de ensaio

Por conta das grandes dimensões e elevada massa dos provetes (pesavam entre 100 e 200kg), foi necessário recorrer ao uso de uma empilhadeira para auxiliar no posicionamento dos protótipos. Além disso, de modo a garantir que a estrutura existente na sala de teste não sofresse danos com a carga excessiva, desenvolveu-se um sistema de escoras e apoios para diluir a carga aplicada, conforme a Figura 41.



Figura 41. Provetes posicionados na sala de ensaio

O compartimento foi controlado termicamente através da utilização de dois aquecedores domésticos, que permaneceram continuamente ligados durante todo o ensaio, de modo a garantir uma temperatura interior estável e constante. Deve-se assegurar que a temperatura no interior do compartimento de teste seja superior à temperatura exterior para garantir a ocorrência do fluxo de calor do interior para o exterior da sala de teste. Para os ensaios realizados, a temperatura interior variou entre 32°C e 40°C. Já a temperatura exterior variou de -2,3°C a 17,8°C durante todo o período de execução do ensaio.

Para a realização desse ensaio, foram utilizados 5 provetes de dimensões 0,5 x 0,3 m (largura e altura): 3 do solo S1 e 2 do solo S2. O procedimento foi realizado em duas partes: o ensaio 1 ocorreu entre os dias 08 e 20 de janeiro e 2021 com os três provetes do solo S1, denominados de W35S1, W40S1 e W50S1; já no ensaio 2, decorrido entre 21 de janeiro e 08 de fevereiro de 2021, manteve-se o provete W35S1 e substituiu-se os outros dois pelos provetes do solo S2, denominados W35S2 e W40S2. Os protótipos já posicionados, durante os dois ensaios, são ilustrados na Figura 42.

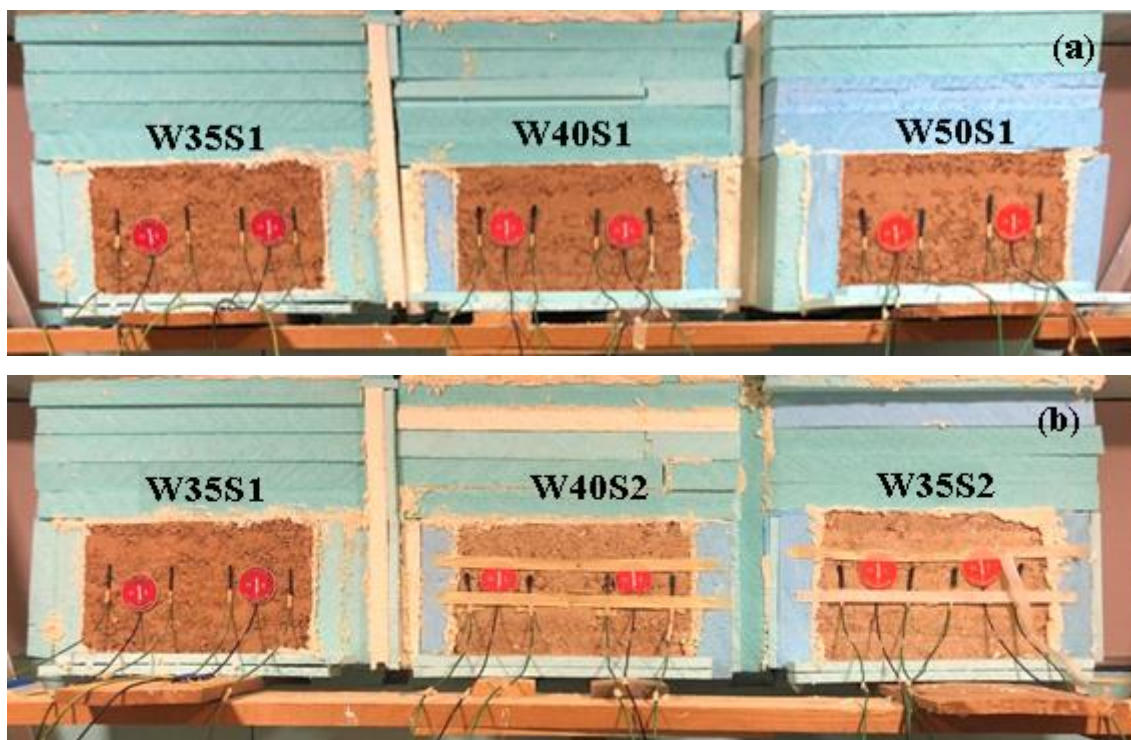


Figura 42. Protótipos de paredes posicionados: (a) Durante o ensaio 1; (b) Durante o ensaio 2

Optou-se por manter um dos protótipos de S1 (W35S1) utilizados no ensaio 1 durante o ensaio 2. Essa decisão foi tomada, principalmente, por dois motivos: falta de material S2 disponível para executar o provete com maior espessura e a possibilidade de comparar, em simultâneo, dois protótipos de mesmo solo (W35S2 e W40S2) e dois protótipos de mesma espessura e materiais diferentes (W35S1 e W35S2).

A fim de minimizar as pontes térmicas nas envolventes dos provetes e vedar os vãos das janelas, foram utilizados painéis de XPS de variadas espessuras e para a selagem das frestas, utilizou-se espuma expansiva de poliuretano, tanto pelo interior quanto pelo exterior. A Figura 43 ilustra os provetes posicionados e os vãos vedados com XPS e espuma expansiva de poliuretano pelo interior.



Figura 43. Provetes e isolante XPS posicionados nos vãos e selados com espuma expansiva de poliuretano

Para a determinação experimental do valor de U, foram utilizados três sistemas de medição: um para cada amostra em cada período de ensaio. Cada sistema é composto por dois sensores de fluxo de calor e quatro sensores de temperatura superficial. Os valores foram registrados com intervalos de 10 minutos durante os ensaios.

Os sensores de fluxo de calor utilizados possuem formato arredondado e pequena espessura. Em cada amostra, utilizaram-se dois sensores de fluxo de calor, HF1 e HF2. Com relação aos sensores de temperatura superficial, foram utilizados quatro por provete, denominados ts1,1 e ts1,2 (próximos ao HF1) e ts2,1 e ts2,2 (próximos ao HF2). Um esquema da distribuição desses equipamentos é apresentado na Figura 44.

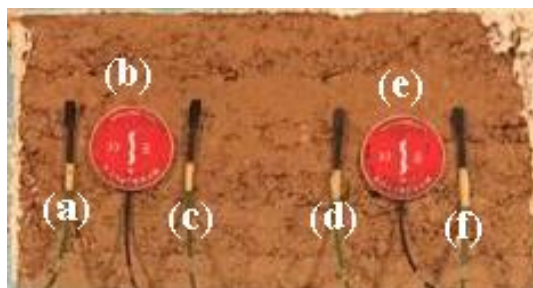


Figura 44. Posição dos sensores de fluxo de calor e de temperatura superficial: (a) ts1,1; (b) HF1; (c) ts1,2; (d) ts2,1; (e) HF2; (f) ts2,2

Algumas dificuldades foram encontradas para a correta fixação desses sensores nos protótipos. Por se tratar de troços de parede de taipa, os provetes apresentaram superfícies irregulares, com presença de vazios e partículas que desagregam facilmente, além de agregados de maiores dimensões. Além disso, alguma umidade ainda existia superficialmente nos provetes. Por isso, a fixação, realizada normalmente com cola térmica, não resultou facilmente. Entretanto, para as paredes do ensaio 1, foi possível

fixar os sensores após algumas tentativas. Já para as paredes do material S2, utilizadas no ensaio 2, foi preciso recorrer ao uso conjunto de cola térmica e fita cola fixada nas superfícies com pregos.

Ainda, para o cálculo do coeficiente, foi necessário utilizar termohigrômetros colocados no exterior e interior, a fim de registrar a umidade relativa e a temperatura, também em intervalos de 10 minutos. Esse equipamento é composto por: uma sonda de temperatura, uma sonda de umidade e um datalogger, conforme a Figura 45.

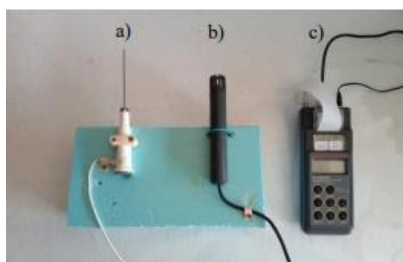


Figura 45. (a) Sonda de temperatura; (b) Sonda de umidade; (c) Datalogger

Fonte: (Magalhães, 2017)

O datalogger é um instrumento portátil que registra a temperatura e a umidade, digitalmente, a cada intervalo de tempo. Os dados podem ser acessados após o registro, por meio do software LoggerNet. Os dados de umidade, em contrapartida, não são usados nos cálculos, mas auxiliam na interpretação dos resultados (Gonçalves do Poço, 2015).

Por fim, para complementar os resultados obtidos, utilizou-se uma câmara termográfica. Esse equipamento possibilitou a captura de termogramas de todas as imagens, através de raios infravermelhos. Ao analisar essas imagens, pode-se identificar melhor o comportamento dos materiais.

4.3.2 Termografia

Durante a execução do ensaio para determinação de U , utilizou-se uma câmara termográfica para auxiliar na análise dos resultados. Esse equipamento permite obter termogramas dos materiais através de raios infravermelhos. A energia emitida através desses raios está relacionada com a temperatura superficial do material (Paulo, 2016). A câmara de termografia utilizada no presente estudo foi a FLIR BT Series T365, ilustrada na Figura 46.



Figura 46. Flir BT Series T365

Fonte: (Flir Thailand, acesso em 2021)

De modo a obter termogramas corretos, faz-se necessário inserir parâmetros de utilização na câmera. É importante, também, registrar os momentos em que os termogramas foram obtidos. A Tabela 21 traz esses dados.

Tabela 21 – Parâmetros para obtenção dos termogramas

	Data	Horário	Emissividade	Distância (m)	Temperatura de referência (°C)
Ensaio 1	20/01/2021	11h15	0.93	2	20
Ensaio 2	08/02/2021	10h45	0.93	2	20

Fonte: (A Autora, 2021)

Para a padronização dos termogramas, determinou-se que as fotografias seriam todas tiradas pela mesma pessoa, portanto a uma mesma altura, e na mesma distância, indicada acima.

4.3.3 Teor em água

O teor em água dos provetes de taipa foi avaliado através de um medidor de umidade portátil HF Sensor MOIST 250 B. O equipamento possui dois sensores com capacidade de medição a diferentes profundidades: o sensor PM efetua medições até 30 cm de profundidade, enquanto que o R1M mede entre 1 e 3 cm. O teor em água de cada provete foi avaliado no último dia de execução de cada período de ensaio, através do registro do índice de umidade (MI) fornecido pelo equipamento e através da curva de calibração do teor em água de arenitos (SS) configurada no equipamento.

Uma vez que o equipamento não tem uma curva de calibração específica para taipa, selecionou-se a curva do arenito por se julgar ser o material mais semelhante, dentro dos disponíveis. Além disso, os valores do índice de umidade foram utilizados para calcular

o teor em água (W_{calc}) baseado em curvas de calibração obtidas em anterior investigação de paredes de taipa. A medição é ilustrada na Figura 47.

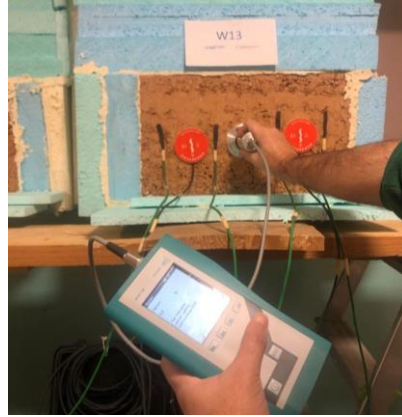


Figura 47. Medição de umidade dos provetes

4.3.4 Metodologia de cálculo

A metodologia utilizada na análise do comportamento térmico de paredes de terra é proveniente da norma ISO 9869 (ISO, 2014). Conforme normatizado, o coeficiente de transmissão térmica (U) de um material pode ser quantificado através da Equação 5.

$$U (ntotal) = \frac{\sum_{n=1}^{ntotal} q(n)}{\sum_{n=1}^{ntotal} (Ti(n) - Te(n))} \quad (5)$$

Onde:

$q(n)$ = fluxo de calor através da amostra de parede no momento n ;

$Ti(n)$ = temperatura interior no momento n ;

$Te(n)$ = temperatura externa no momento n ;

$ntotal$ = número total de momentos em que os dados foram coletados.

Considerando que foram utilizados dois medidores de fluxo de calor, HF1 e HF2, para cada um das amostras que permitiram medir $q1(n)$ e $q2(n)$, pôde-se estimar dois coeficientes de transmissão térmica, $U1(ntotal)$ e $U2(ntotal)$. Portanto, a determinação do coeficiente de transmissão térmica final do provete, $U'(ntotal)$, é realizada através da média aritmética dos coeficientes anteriores, conforme a Equação 6.

$$U'(ntotal) = \frac{U1(ntotal) + U2(ntotal)}{2} \quad (6)$$

Em seguida, utilizou-se do valor obtido para o coeficiente de transmissão térmica no cálculo de determinação da resistência térmica (R) da solução construtiva, através da Equação 7.

$$R = \frac{1}{U} \quad (7)$$

Por fim, por meio da Equação 8, é possível estimar a condutibilidade térmica (λ) do material. Que leva em consideração a espessura (e) e a resistência térmica obtida (R), bem como a superficial interior (R_{si}) e a superficial externa (R_{se}) (DRE, 2015a).

$$\lambda = \frac{e}{R - (R_{si} + R_{se})} \quad (8)$$

A ISO determina que o ensaio deve ser realizado por, no mínimo, 3 dias, a partir do momento de estabilização da temperatura nos medidores de fluxo de calor. Caso o anterior não ocorra no sistema, deve-se efetuar as medições por um período superior a 7 dias, analisando o caso de acordo com a inércia térmica do material (ISO, 2014). Nesse estudo, dada a inércia que caracteriza as amostras e para garantir maior confiabilidade nos resultados obtidos, optou-se por realizar cada ensaio por um período de 14 dias, desde a montagem do sistema até a retirada final dos dados.

4.3.5 Resultados

A seguir, os resultados obtidos durante os dois ensaios serão apresentados. As temperaturas interiores e exteriores à sala de ensaio serão explicitadas, bem como as temperaturas superficiais dos provetes e seus fluxos de calor. Por fim, os coeficientes de transmissão térmica serão discutidos.

4.3.5.1 Termografia

Abaixo, estão explicitados os termogramas obtidos ao fim dos dois ensaios: 20 de janeiro de 2021 para a Figura 48 e 08 de fevereiro de 2021 para a Figura 49.

A escala utilizada nos termogramas precisou ser adequada por ambiente e momento, de modo que se percebesse melhor os detalhes da captura. Nas três imagens da parte superior da Figura 48, utilizou-se escala com valores de 15 a 25 °C. Para a Figura 49, a escala vai de 20 a 30 °C. Já nas três imagens da parte inferior de ambas as figuras, os valores vão de 0 a 15 °C.

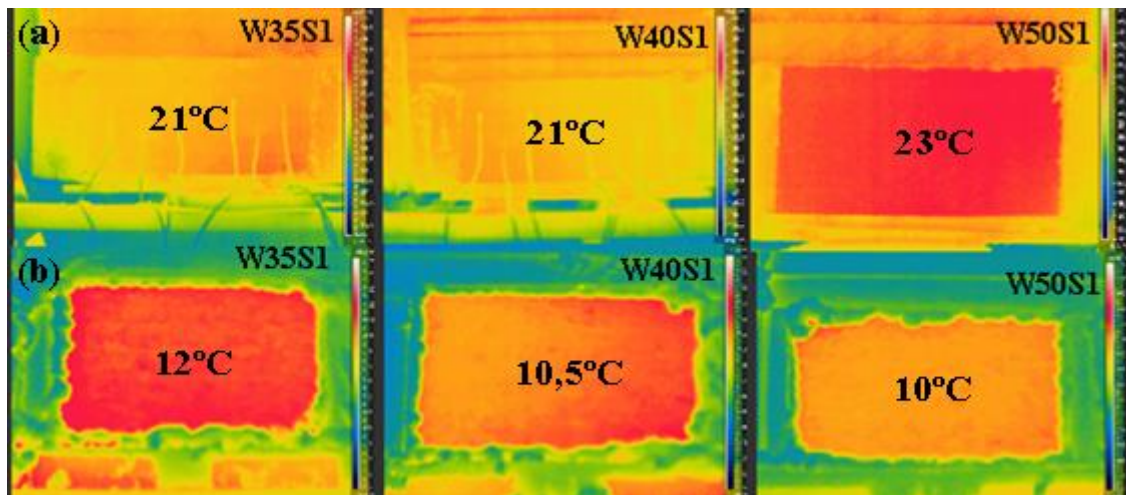


Figura 48. Termogramas obtidos ao fim do ensaio 1, na manhã do dia 20 de janeiro: (a) Interior; (b) Exterior

A partir da análise dos termogramas, é possível perceber que, pelo exterior, a superfície mais quente no momento da análise, com cerca de 12 °C, é a de W35S1. Os demais provetes apresentaram temperaturas superficiais exteriores de 10,5 °C (W40S1) e 10 °C (W50S1). Já pelo interior, o provete W50S1 apresenta a maior temperatura superficial, cerca de 23 °C; enquanto os demais provetes têm temperatura de 21 °C.

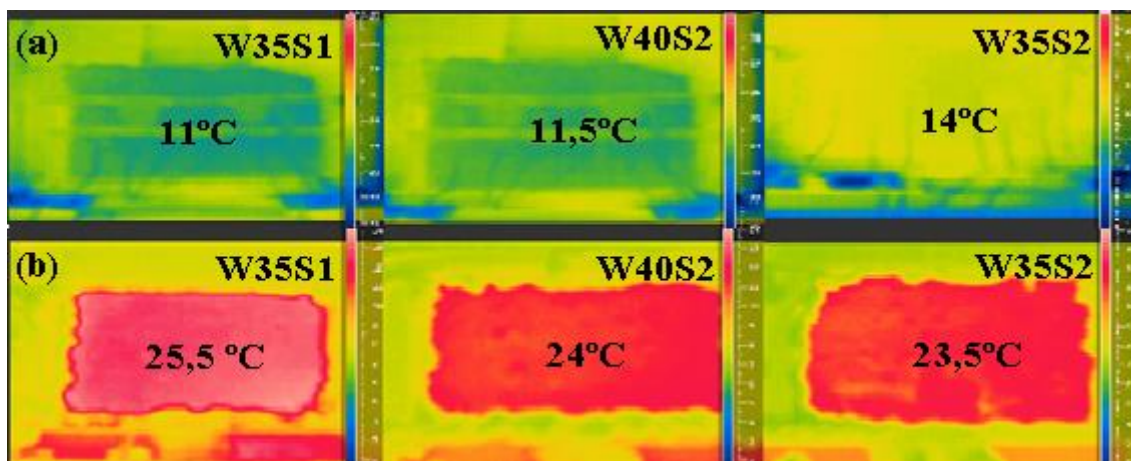


Figura 49. Termogramas obtidos ao fim do ensaio 2, na manhã do dia 08 de fevereiro: (a) Exterior; (b) Interior

Para os termogramas obtidos ao fim do ensaio 2, as temperaturas superficiais externas estavam entre 11 °C e 14 °C. Já as temperaturas superficiais interiores estavam entre 23,5 °C e 25,5 °C. Da mesma forma ao descrito acima, a parede mais à direita (W35S2) possui maior temperatura superficial interior, enquanto que a parede mais à esquerda (W35S1) possui maior temperatura superficial externa.

4.3.5.2 Teor em água

A Tabela 22 traz os valores encontrados ao final dos dois períodos de ensaio para os dois sensores utilizados e para o interior e o exterior da sala de ensaio.

Tabela 22 – Umidade dos provetes

Ensaio	Provete	Exterior				Interior				
		R1M	W_{calc} (%)	PM	W_{calc} (%)	R1M	W_{calc} (%)	PM	W_{calc} (%)	
Ensaio 1	W35S1	MI	382	3.3	1431	1.5	365	3.0	1399	1.1
		SS (%)	2.4		1.1		3.8		0.3	
	W40S1	MI	412	3.7	1533	2.7	361	3.0	1366	0.8
		SS (%)	4.1		1.1		5.6		0.2	
	W50S1	MI	380	3.2	1449	1.7	351	2.8	1414	1.3
		SS (%)	2.8		0.7		3.7		0.5	
Ensaio 2	W35S1	MI	347	2.8	1473	2.0	304	2.1	1470	1.9
		SS (%)	3.5		1.8		3.2		1.8	
	W40S2	MI	437	4.1	1585	3.2	332	2.5	1374	0.9
		SS (%)	4.6		2.3		2.5		0.9	
	W35S2	MI	540	5.6	1705	4.6	321	2.4	1490	2.2
		SS (%)	3.7		3.2		2.4		1	

Fonte: (A Autora, 2021)

É possível perceber que a umidade no interior dos provetes é menor do que a de sua superfície, o que pode ser justificado pelo comportamento higroscópico da taipa: o provete absorve a umidade do ambiente, o que pode contribuir para a melhoria do conforto interior. Por conta disso, a superfície da parede é mais úmida do que o seu centro. Além disso, as medidas obtidas para o interior da sala de ensaio são inferiores às do exterior, uma vez que o ambiente é mais aquecido e menos úmido.

Ainda, pode-se perceber que a diferença entre as umidades pelo exterior (sentido em que ocorre o fluxo) dos provetes no ensaio 1 é significativa, principalmente relativamente à medição com a sonda PM. Uma vez que a umidade do provete W40S1 é de 80% superior à de W35S1, essa diferença pode interferir no valor do coeficiente de transmissão térmica.

Com relação ao ensaio 2, nota-se que a umidade de W35S1 pode ser considerada constante quando comparada ao ensaio 1 (considerando a precisão do equipamento utilizado). Entretanto, os provetes do solo S2 possuem umidade entre 60% e 130% superior à do provete W35S1. Esse grau de umidade pode estar relacionado ao fato de o solo S2 possuir umidade ótima superior ao S1. Dessa forma, seria necessário um tempo

de secagem maior para que todos os provetes possuísem igual grau de saturação no momento do ensaio.

4.3.5.3 Temperatura interior e exterior

De modo a garantir a exequibilidade do ensaio, foi necessário garantir que a temperatura no interior da sala de ensaio estivesse estabilizada. O ambiente foi aquecido, então, por aquecedores domésticos, de modo que o fluxo de calor fosse realizado do exterior para o interior. Esse fato é determinante para a fiabilidade dos resultados obtidos. A Figura 50 e a Figura 51 ilustram a evolução das temperaturas interior e exterior, no decorrer dos dois períodos de ensaio.

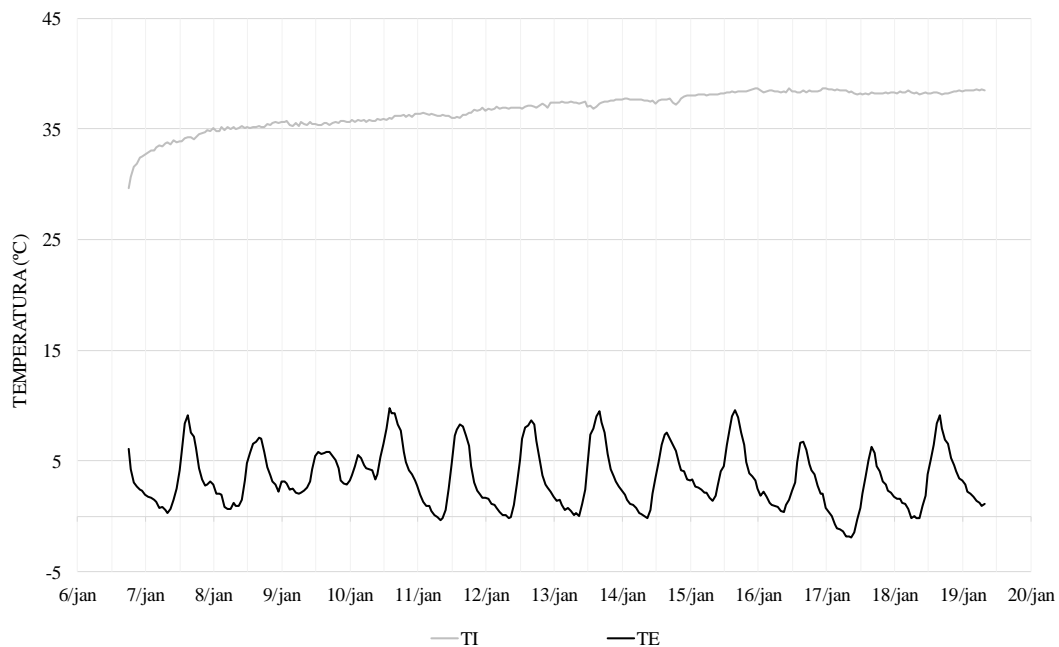


Figura 50. Evolução das temperaturas interior e exterior no decorrer do ensaio 1

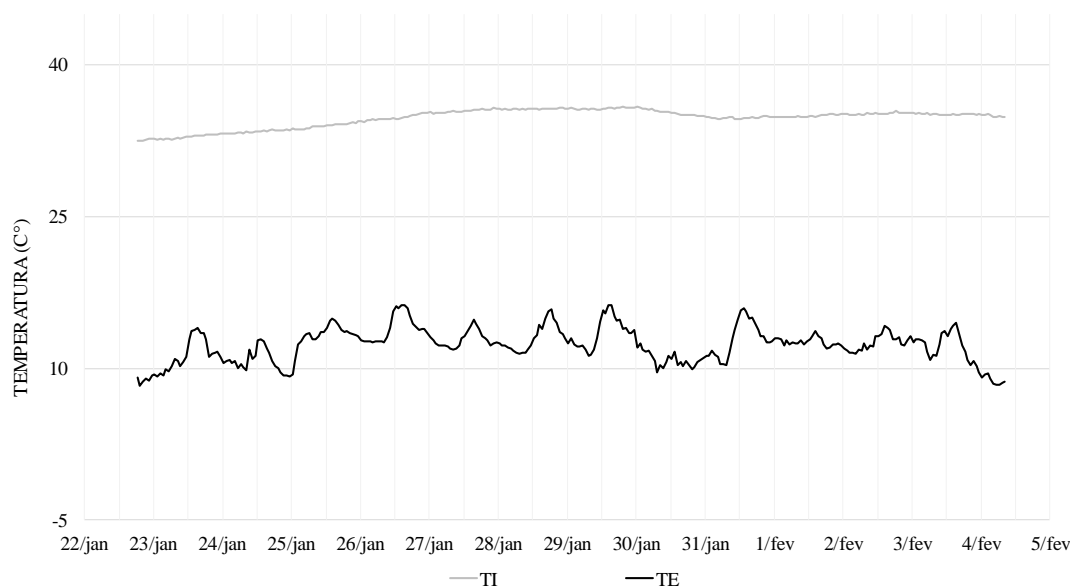


Figura 51. Evolução das temperaturas interior e exterior no decorrer do ensaio 2

A partir dos dados mostrados acima, é possível perceber que a temperatura interior da sala manteve-se constante durante os dois períodos de ensaio. No ensaio 1, a temperatura média foi de 37,0 °C, enquanto que no ensaio 2 essa média foi de 34,6 °C. No exterior, por outro lado, a temperatura variou bastante, com valores máximos e mínimos, respectivamente, de 12,3 °C e -2,3 °C durante o ensaio 1 e 17,8 °C e 2,0 °C no ensaio 2. A Tabela 23 apresenta os valores mínimos, máximos e médios durante os ensaios.

Tabela 23 – Temperaturas interiores e exteriores durante os ensaios

	Temperatura (°C)	Média	Máxima	Mínima
Ensaio 1	Interior (Ti)	37.0	39.6	28.5
	Exterior (Te)	3.7	12.3	-2.3
Ensaio 2	Interior (Ti)	34.6	36.1	32.3
	Exterior (Te)	11.3	17.8	2.0

Fonte: (A Autora, 2021)

Para o ensaio 1, o diferencial médio entre as temperaturas interior e exterior foi de 33,3°C. Já para o ensaio 2, esse valor foi inferior, de 23,3°C. Tendo em vista os diferenciais de temperatura durante os dois períodos de ensaio, pode-se dizer que o cenário foi favorável para garantir o fluxo de calor no sentido correto.

4.3.5.4 Temperaturas Superficiais (Tsi)

Com o uso dos quatro sensores de temperatura superficial, foi possível aferir a evolução das temperaturas nas superfícies de cada um dos provetes durante todo o ensaio. Essas informações servem para perceber o comportamento e inércia térmica dos provetes. De modo a compreender melhor o gráfico, os valores de temperatura superficial dos quatro sensores, para cada amostra, foram convertidos em um único valor de temperatura superficial média. A Figura 52 ilustra as temperaturas superficiais médias dos provetes W35S1, W40S1 e W50S1, durante o ensaio 1. A Tabela 24, na sequência, mostra os diferenciais médios entre a temperatura superficial de cada amostra e a temperatura interior da sala de ensaio.

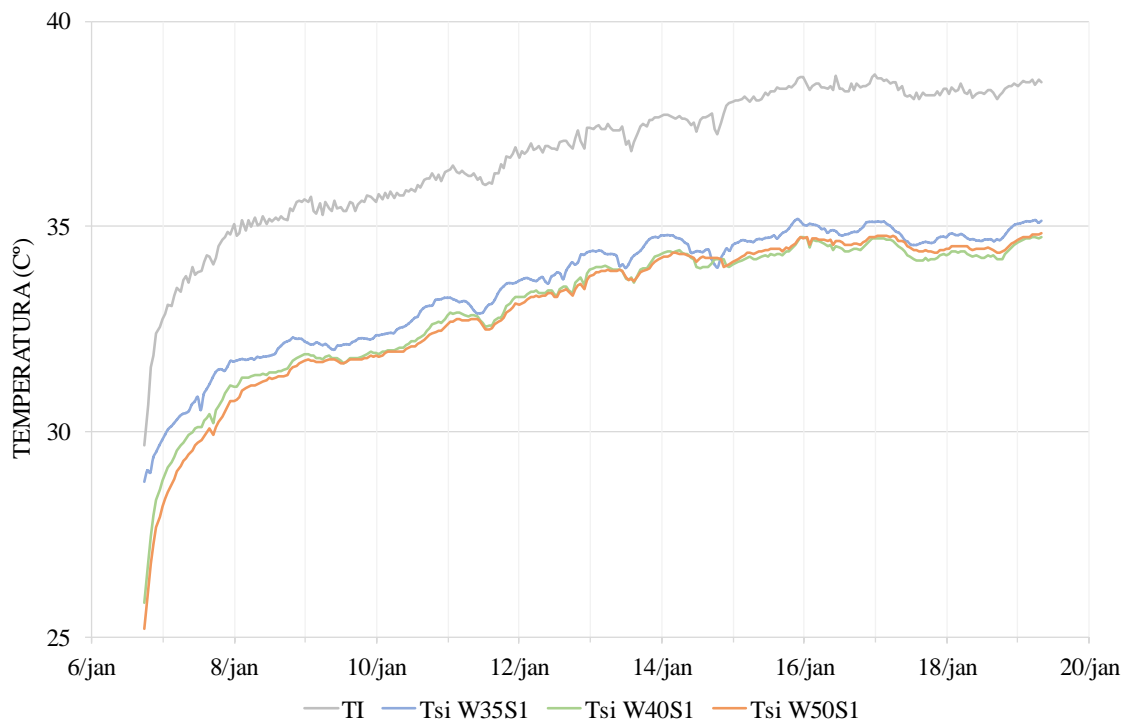


Figura 52. Temperaturas superficiais no ensaio 1

Tabela 24 – Diferencial médio entre Tsi e Ti no ensaio 1

Proвете	Diferencial médio
W35S1	3.32
W40S1	3.79
W50S1	3.83

Fonte: (A Autora, 2021)

É de fácil percepção que as temperaturas superficiais dos provetes variam de acordo com a temperatura interior e que apresentam sempre valores inferiores para todas

as amostras. As superfícies dos provetes apresentaram temperaturas entre 30 e 35 °C na maior parte do tempo, com diferenciais médios entre a temperatura interior e as temperaturas superficiais entre 3,32 e 3,83. Ao comparar esses valores de temperatura superficial com os a temperatura exterior durante o ensaio, que teve valor máximo de 12,3°C, conforme a Figura 50, pode-se comprovar que a transferência de calor durante o ensaio foi realizada do interior para o exterior da sala de ensaio. Ainda que as temperaturas das três amostras sejam bastante próximas, nota-se que o provete W35S1 apresenta temperatura média levemente superior aos demais (média de 33,68 °C), enquanto a W40S1 possui uma temperatura intermediária, 33,21 °C, e a W50S1 apresenta a menor das três temperaturas médias, 33,17 °C.

Além disso, foi possível perceber, através da análise das curvas, o atraso térmico referente a cada provete. As temperaturas superficiais dos provetes W40S1 e W50S1 ficam muito próximas durante todo o ensaio, tendo o mesmo desfasamento, de 1 hora, com relação à temperatura interior. Já o provete W35S1 não apresentou desfasamento perceptível pela análise da curva.

Para o ensaio 2, a Figura 53 ilustra as curvas de temperatura superficial. A Tabela 25 mostra os diferenciais médios entre temperatura interior e temperaturas superficiais durante esse ensaio.

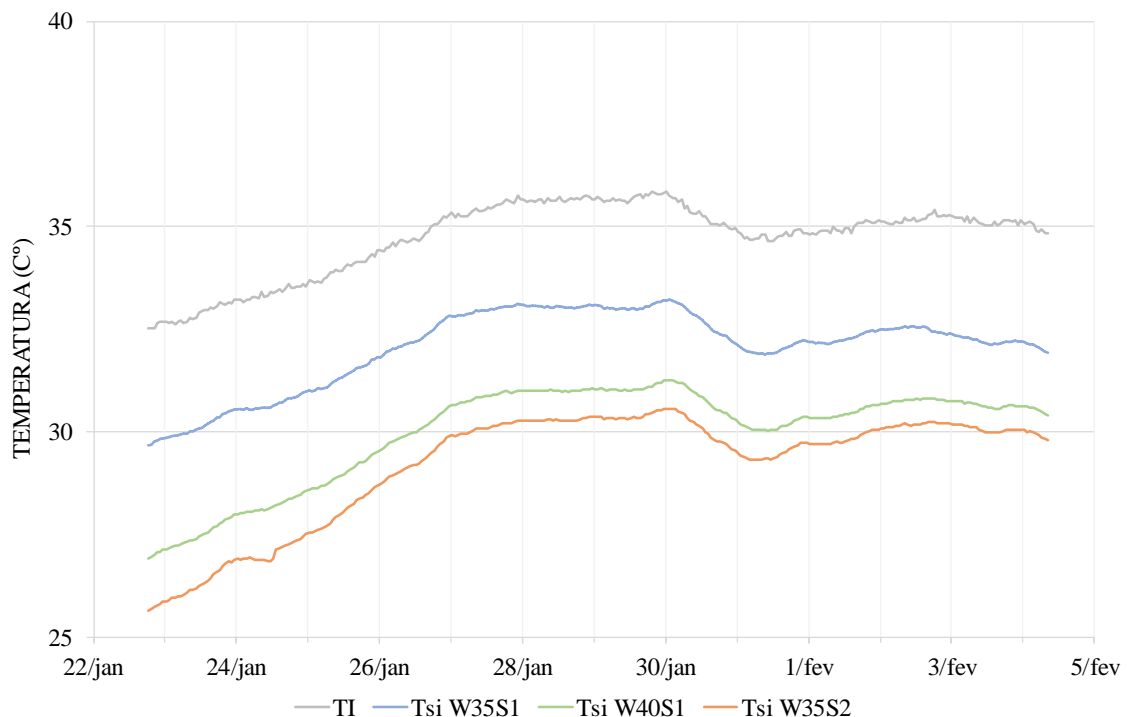


Figura 53. Temperaturas superficiais no ensaio 2

Tabela 25 – Diferencial médio entre Tsi e Ti no ensaio 2

Proвете	Diferencial médio
W35S1	2.79
W40S2	4.73
W35S2	5.48

Fonte: (A Autora, 2021)

De forma análoga ao ensaio anterior, as temperaturas superficiais dos provetes variam de acordo com a temperatura interior. As superfícies dos troços de parede apresentaram temperaturas médias entre 29 e 32°C, com diferenciais médios entre a temperatura interior e as temperaturas superficiais entre 2,79 e 5,48. Ao comparar esses valores de temperatura superficial com os a temperatura exterior durante o ensaio, que teve valor máximo de 12,3°C, conforme a Figura 51, pode-se comprovar que a transferência de calor durante o ensaio foi realizada do interior para o exterior da sala de ensaio.

As temperaturas superficiais de W40S2 e W35S2 se mostram próximas no decorrer do ensaio, com média de 29,9 e 29,1°C, respectivamente. Entretanto, a temperatura de W35S1, mostra-se mais elevada do que as demais, com média de 31,8 °C. Além disso, foi possível perceber, através da análise das curvas, o atraso térmico referente a cada provete. As temperaturas superficiais dos provetes W40S2 e W35S2 ficam mais próximas entre si do que W35S1. Entretanto, o desfasamento das curvas dos provetes W35S1 e W35S2 ocorreu da mesma forma, sem desfasamento perceptível, enquanto que a o provete W40S2 apresentou desfasamento de 1 hora, com relação à temperatura interior.

Por fim, ainda que esses dados também tenham sido obtidos pelos termogramas apresentados em 4.3.2, os dados correspondem a momentos diferentes do mesmo dia, para ambos os ensaios. Portanto, a comparação desses dados não foi realizada.

4.3.5.5 Fluxos de Calor (Q)

A análise dos fluxos de calor nos provetes ensaiados é crucial para a compreensão do funcionamento da transferência de calor ao longo do ensaio, bem como para a obtenção do coeficiente de transmissão térmica dos provetes. Esses valores foram registrados a partir dos sensores de fluxo de calor posicionados nas superfícies das amostras e dos valores das temperaturas interior e exterior medidas através dos termohigrômetros,

conforme ilustrado anteriormente, em 4.3.2. De modo a melhor compreender a evolução dos fluxos de calor de cada provete, calculou-se o fluxo de calor médio para cada provete. A seguir, os fluxos de calor médios relativos ao ensaio 1 estão explicitados na Figura 54.

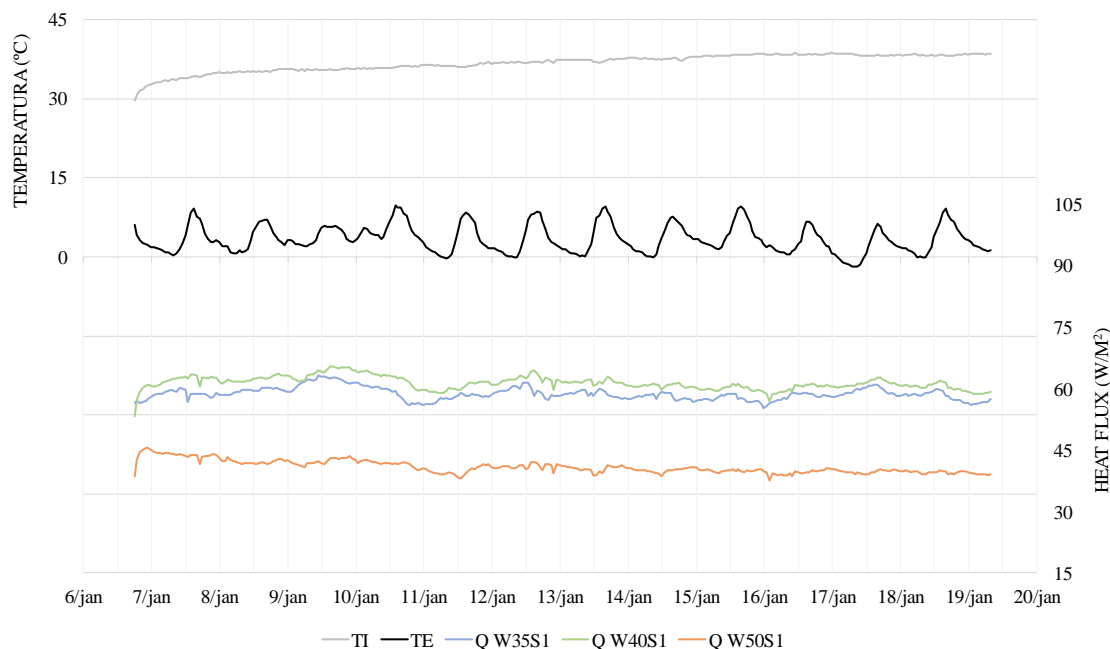


Figura 54. Fluxos de calor do ensaio 1

Por meio da Figura 54 é possível observar que o provete com o menor fluxo de calor é o W50S1, como era esperado, por conta de sua espessura ser maior. Os outros dois provetes apresentam fluxos com evolução semelhante e valor médio próximo. No entanto, o fluxo de W35S1 se mostrou levemente inferior ao de W40S1, o que não era esperado, já que a segunda parede tinha espessura 5 cm superior à primeira. Os valores médios para W35S1, W40S1 e W50S1, respectivamente, são de 58,6 W/m², 61,1 W/m² e 40,7 W/m².

O valor médio do fluxo de calor de W40S1 pode ter sido influenciado por algumas variáveis. O primeiro motivo é que o sensor do fluxo de calor pode ter sido fixado em uma zona com granulometria diferente, entrando em contato com seixos. Entretanto, uma vez que os dois sensores posicionados nesse provete apresentaram resultados semelhantes, essa causa é considerada menos provável, ainda que possível (as zonas nas quais os dois termofluxímetros teriam que possuir seixos). Outro motivo que pode ter influenciado nesses resultados é a umidade dos provetes. Conforme 4.3.3, esse provete apresenta umidade superior aos demais constituintes desse estudo, o que valida essa possibilidade. Levando em consideração que o provete W40S1 foi o último dentre os três

a ser executado, o período de tempo inferior em que ele foi submetido à secagem foi determinante para os resultados obtidos.

Com relação ao desfasamento das curvas, é possível perceber que o provete W50S1 apresenta variações na curva com 1 hora de atraso se comparado ao provete W40S1 e 4 horas de atraso quando comparado a W35S1. Esse fato pode ser justificado pela diferença de espessura dos protótipos, uma vez que quanto maior a espessura, maior a massa e maior o atraso térmico proporcionado pela parede.

Para a análise do ensaio 2, a Figura 55 contém os resultados encontrados para os fluxos de calor médios dos provetes ensaiados.

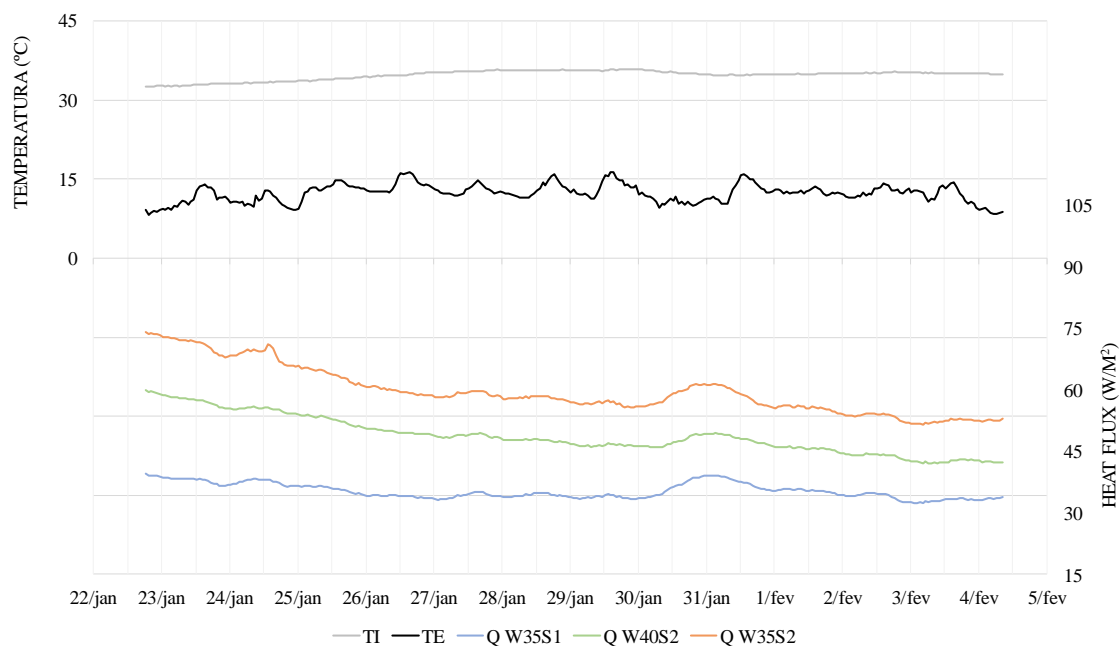


Figura 55. Fluxos de calor do ensaio 2

No ensaio 2 pôde-se perceber, de imediato, o menor diferencial entre temperaturas interiores e exteriores acarretam em fluxos de calor menores; a exemplo de W35S1, que no ensaio 1 teve fluxo médio de quase 60 W/m², enquanto nesse momento apresenta fluxo de 35,5 W/m². Diferentemente do ocorrido no ensaio anterior, esse provete apresentou o menor fluxo de calor dentre as três amostras.

Já os provetes do solo S2, nomeados W35S2 e W40S2, apresentaram fluxo médio de 58,6 W/m² e 47,8 W/m², respectivamente. Dessa forma, é possível perceber que o fluxo de calor inerente ao solo S1 é inferior ao do solo S2, visto que, para uma mesma espessura (35 cm), o provete W35S2 apresentou fluxo cerca de 65% maior do que W35S1 neste

ensaio. Também foi possível perceber que o provete W35S2 apresenta variações na curva com 1 hora de antecedência, comparado a W35S1 e W40S1. Uma vez que o solo S1 apresenta maior baridade, é esperado que este apresente maior atraso térmico do que S2 para uma mesma espessura de parede.

4.3.5.6 Coeficiente de Transmissão Térmica (U)

Os coeficientes de transmissão térmica dos provetes foram obtidos através dos valores dos fluxos de calor e do diferencial entre temperatura exterior e interior. De modo a garantir a veracidade dos resultados, o coeficiente de transmissão térmica passa a ser registrado apenas após o quinto dia de ensaio, momento em que são consideradas estáveis as condições dos ensaios. Para facilitar a análise e comparação dos resultados, foram determinados valores médios de U para cada provete. Os valores médios de U para o ensaio 1 estão registrados na Figura 56.

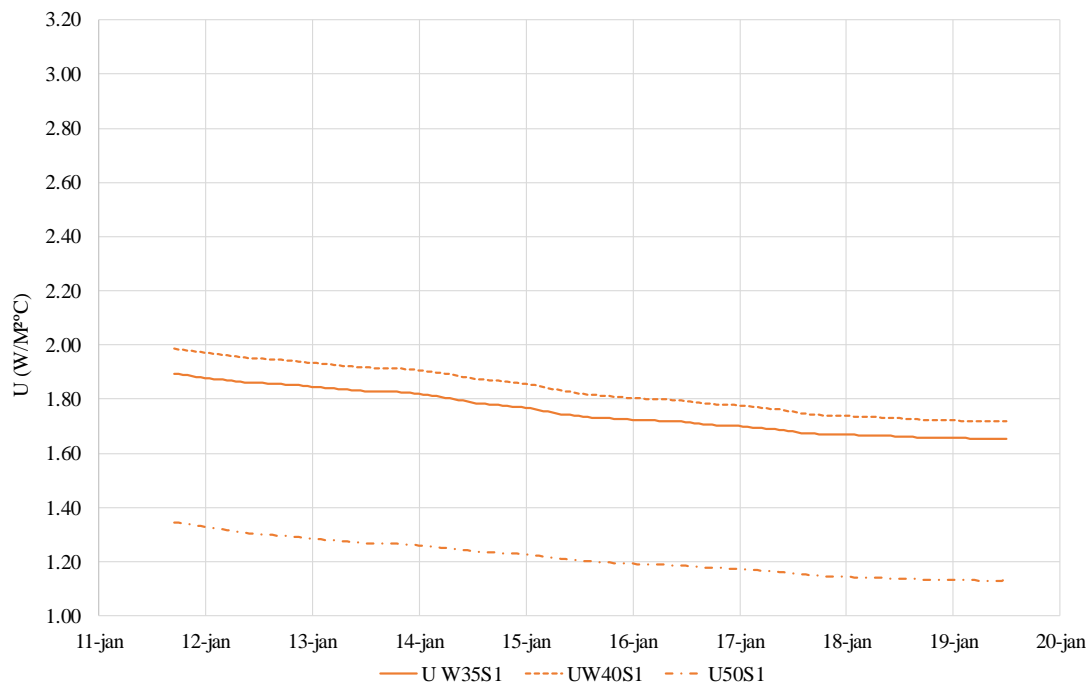


Figura 56. Coeficientes de transmissão térmica no ensaio 1

Com a estabilização do sistema, no decorrer do ensaio, as curvas possuem a tendência de convergir para o valor de U. Conforme esperado, por conta de possuir a maior espessura (50cm), W50S1 apresentou o coeficiente U mais baixo dentre os provetes, com valor médio de 1,13 W/m² °C. No entanto, esperava-se que o provete W40S1 apresentasse valor entre o de W50S1 e W35S1 para esse coeficiente; o que não

ocorreu, visto que o valor médio de W40S1 é de $1,72 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$. Ainda, o provete W35S1 apresentou valor próximo de W40S1, mas inferior: $1,65 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$.

O primeiro motivo para o resultado inesperado é que o sensor do fluxo de calor pode ter sido fixado em uma zona com granulometria diferente, entrando em contato com seixos. No entanto, essa causa pode ser considerada improvável, visto que os dois sensores posicionados nesse provete apresentaram resultados semelhantes. Para que o supracitado ocorresse, seria necessário que as zonas nas quais foram posicionados os dois termofluxímetros teriam que possuir seixos. Além dessa possibilidade, a diferença de umidade entre os provetes pode ter influenciado nos resultados. Conforme 4.3.3, esse provete apresenta umidade superior aos demais constituintes desse estudo, o que valida a possibilidade. Visto que o provete W40S1 foi o último dentre os três a ser executado, o tempo inferior em que ele foi submetido à secagem pode ter sido determinante para os resultados obtidos.

A análise dos resultados do ensaio 2 foi realizada a partir da Figura 57, a seguir.

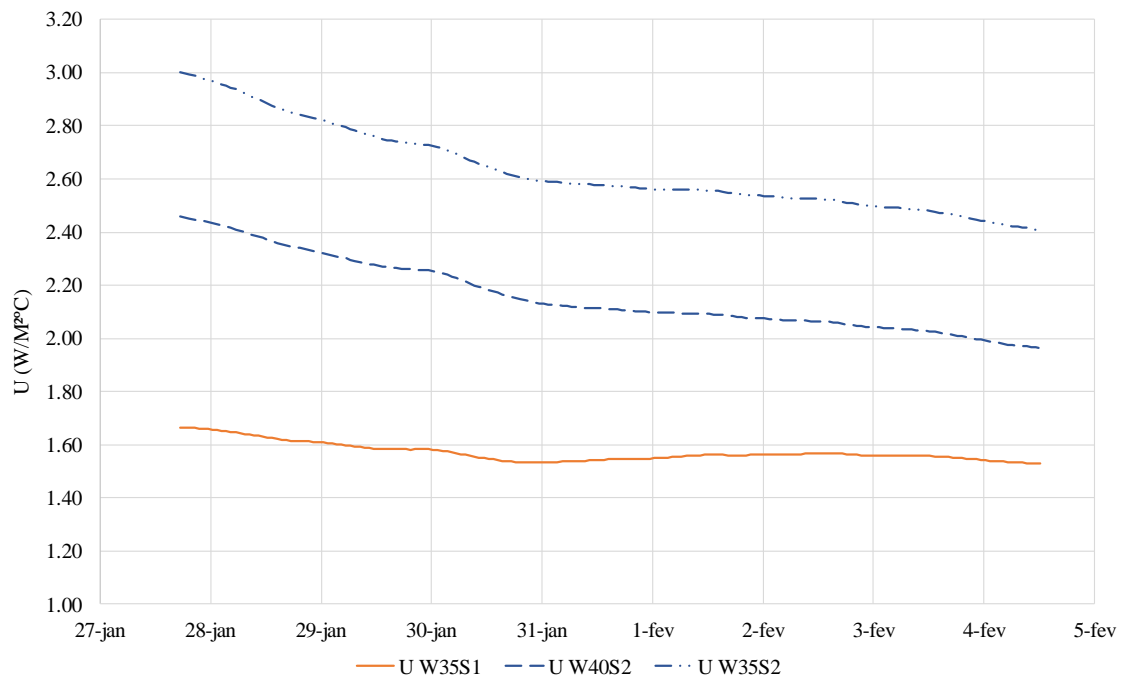


Figura 57. Coeficientes de transmissão térmica no ensaio 2

No ensaio 2, as curvas, da mesma maneira, têm tendência a convergir para o valor de U no decorrer do tempo. Para esse caso, o W35S1 apresenta o menor coeficiente de transmissão do ensaio, com valor médio de cerca de $1,53 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$. Já o provete W35S2, de mesma espessura, mas outro solo, possui o maior valor de U, com cerca de

2,43 W/m² °C. O provete de solo S2 e espessura de 40 cm apresentou um resultado intermediário: de 1,96 W/m² °C.

A partir do cálculo dos coeficientes de transmissão térmica para os dois ensaios, obtiveram-se os valores da resistência térmica dos provetes por meio da metodologia descrita anteriormente, bem como o λ estimado para cada provete. Para o cálculo de λ , foram assumidos valores do REH (DRE, 2015b) para R_{se} (0,04 m².°C/W) e R_{si} (0,13 m².°C/W). Esses valores estão ilustrados na Tabela 26.

Tabela 26 – Resistência térmica

Ensaio	Provete	U (W/m ² °C)	R (m ² °C/W)	λ estimado (W/m °C)
1	W35S1	1.65	0.61	0.80
	W40S1	1.72	0.58	0.97
	W50S1	1.13	0.88	0.70
2	W35S1	1.53	0.65	0.72
	W40S2	1.93	0.52	1.15
	W35S2	2.43	0.41	1.45

Fonte: (A Autora, 2021)

No ensaio 1, como era imaginado, o provete W50S1 apresentou menor valor de U (1,13 W/m² °C) e, conseqüentemente, maior R. Os provetes W40S1 e W50S1, por outro lado, apresentaram coeficientes cerca de 35% superiores ao do primeiro. Vale ressaltar que o valor médio de W40S1 foi ocasionado, provavelmente, pelo excesso de umidade existente no provete, visto que sua espessura é superior à de W35S1. Na análise do λ estimado, o provete W40S1 teve resultado 39% superior ao provete W50S1, enquanto que W35S1 foi 15% superior ao provete mais espesso.

Para o ensaio 2, no entanto, o provete com menor valor de U e maior R foi o W35S1. Sua resistência térmica é de 0,65 W/m² °C, número 20% maior do que a resistência de W40S2 e 35% superior à de W35S2. Entretanto, ao observar as baridades obtidas no ensaio Proctor, em 3.7, nota-se que o solo S1 possui maior baridade (2,05 g/cm³) se comparado ao solo S2 (1,85 g/cm³). Por conta disso, esperava-se que, durante o ensaio 2, W35S1 apresentasse maior U se comparado ao outro provete de mesma espessura,

W35S2. Mais uma vez, essa diferença entre os resultados esperados e obtidos no ensaio de coeficiente de transmissão térmica pode ser justificada pelo maior teor de umidade existente nos provetes de solo S2 quando comparados ao de solo S1. Uma vez que se optou por manter o provete W35S1 nos dois ensaios, deve-se considerar que, durante o ensaio 2, este já esteve submetido a temperaturas elevadas durante o tempo de medição do ensaio 1, o que contribuiu para sua secagem. Esse fato potencializou a diferença de umidade entre os provetes do ensaio 2.

Outro aspecto passível de análise é a diferença de desempenho térmico do provete W35S1 nos ensaios 1 e 2. Uma vez que, durante o ensaio 1, o provete foi exposto a altas temperaturas e que, na altura do ensaio 2, este já havia passado por duas semanas a mais de secagem, período de execução do ensaio 1, é esperado que exista alguma diferença em seu comportamento nos dois ensaios. O coeficiente de transmissão térmica obtido no ensaio 2 é cerca de 7% inferior ao do primeiro ensaio. Esse resultado reflete nos valores de R e, consequentemente, no λ estimado, que é 10% inferior no ensaio 2.

4.4 Determinação experimental do Coeficiente de Condutibilidade térmica

O coeficiente de condutibilidade térmica (λ) dos solos foi obtida através dos procedimentos presentes na norma EN12667 (European Committee For Standardization, 2001), através do método de placas quentes. Para tal, utilizou-se três provetes prismáticos (40 x 150 x 150 mm) de cada um dos solos, denominados conforme 4.2. Os provetes foram confeccionados 20 dias antes do ensaio conforme o procedimento de 4.2. Além dos seis provetes de terra ensaiou-se também um provete de XPS, nas mesmas dimensões, para possibilitar a validação do método através da comparação com valores apresentados no ITE 50 (Santos and Matias, 2006).

Para determinação do coeficiente de condutibilidade das amostras foi usado equipamento Thermal Conductivity Test Tool λ -Meter EP500, da marca Lambda-Meßtechnik o qual é constituído por duas placas paralelas protegidas de temperatura regulável. Antes de iniciar o ensaio, deve-se configurar o aparelho: primeiramente, a amostra é inserida no local apropriado e cercada completamente por isolantes térmicos fornecidos juntamente com o equipamento. Em seguida, são determinados os parâmetros do ensaio: a pressão utilizada de 1000 Pa (conforme o European Committee for Standardization, 2001) as dimensões dos provetes (150 x 150

mm) e espessura nominal de 40 mm, a qual é aferida com maior precisão pelo próprio equipamento. O provete posicionado corretamente para o ensaio é ilustrado na Figura 58.



Figura 58. Provete posicionado para o ensaio

Em relação aos parâmetros inerentes à térmica, os ensaios foram realizados em sequência nas temperaturas de 10 °C, por se tratar da temperatura de referência do ITE 50 (Santos and Matias, 2006), 25 °C, como sendo uma temperatura amena, e 40°C, para ensaiar o comportamento do material em temperaturas extremas. A temperatura entre as placas escolhida foi de 5 °C. Ainda, determinou-se as condições de término do ensaio: 1% de desvio no resultado. Ou seja, o ensaio seria terminado quando o resultado apresentasse desvio mínimo. Cada ensaio durou cerca de nove horas em cada temperatura, afim de obter resultados com alta confiabilidade.

Ao fim do período de ensaio, pôde-se obter, diretamente no ecrã do aparelho, os valores dos coeficientes de condutibilidade térmica (para as três temperaturas ensaiadas), bem como o desvio nos 15 minutos finais. Outros dados foram extraídos do software do equipamento, e serão apresentados na sequência. A Figura 59 ilustra o equipamento utilizado no ensaio.



Figura 59. Ensaio de condutibilidade térmica. (a) Equipamento Thermal Conductivity Test Tool λ -Meter EP500; (b) Configuração dos parâmetros de ensaio.

O ITE 50 (Santos and Matias, 2006) adota 10 °C como a temperatura de referência para os ensaios base para a obtenção dos valores de condutibilidade térmica. O resultado apresentado pelo documento para o λ do isolante XPS é de 37,00 mW/m°C, enquanto que o valor obtido através do ensaio realizado foi de $32,91 \pm 0,01$ mW/m°C. É possível constatar, portanto, que os valores são semelhantes em ordem de grandeza e o ensaio pode, dessa forma, ser validado.

Uma vez que o ensaio foi repetido três vezes em cada temperatura para cada solo, realizou-se o cálculo das médias aritméticas e do desvio padrão dos resultados obtidos. Esses valores estão compilados na Tabela 27.

Tabela 27 – Condutibilidade térmica dos materiais

Solo	Condutibilidade térmica [mW/m°C]					
	10 °C		25 °C		40 °C	
	λ	D.P	λ	D.P	λ	D.P
S1	413.833	0.010	448.533	0.040	486.167	0.053
S2	341.230	0.007	363.733	0.017	388.333	0.053

Fonte: (A Autora, 2021)

A partir da análise da tabela, verifica-se que a condutibilidade térmica dos materiais aumentou juntamente com a temperatura, assim como o desvio padrão. Além disso, é

possível notar que o solo S2 apresenta condutibilidade térmica inferior ao de S1. A comparação dos resultados para as diferentes temperaturas está exposta na Figura 60.

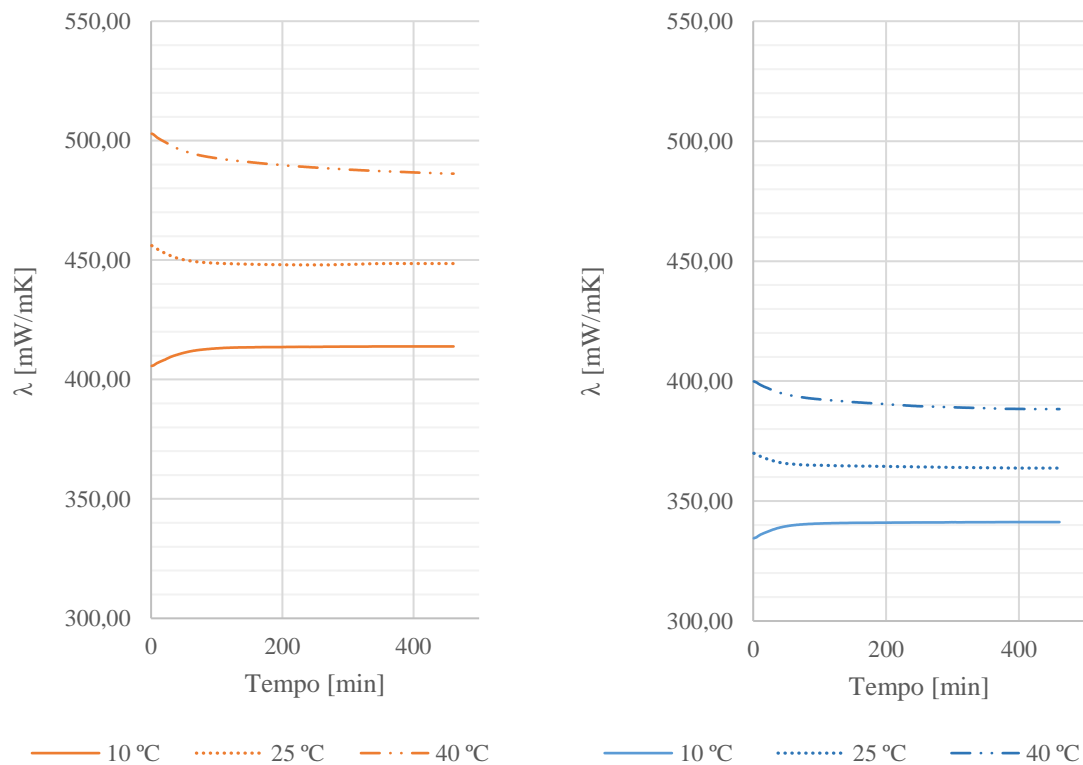


Figura 60. Condutibilidade térmica. (a) Solo S1; (b) Solo S2

Através da evolução dos coeficientes no decorrer do tempo, percebe-se que os coeficientes relativos à temperatura de 10°C, para ambos os solos, aumentam até a convergência para um valor. Já nas duas outras temperaturas, os dois solos contam com a queda do coeficiente até atingir a estabilidade.

Pereira (2013) ensaiou termicamente provetes de taipa de solo com características semelhantes ao S1 (limites de consistência e granulometria). O coeficiente de condutibilidade térmica médio obtido nos ensaios foi de 1.080 mW/m°C. Além desse autor, o ITE 50 (2006) considera o valor de referência para paredes de taipa como 1.100 mW/m°C.

Ao comparar o valor resultante da investigação citada, bem como o valor de referência do ITE 50, com os coeficientes médios obtidos nos ensaios a 10 °C, verifica-se que os provetes executados no presente trabalho apresentam condutibilidade térmica inferior ao previsto anteriormente.

Uma vez que o XPS foi ensaiado de modo a validar a metodologia utilizada e verificar a calibração do equipamento diante ao previsto no regulamento português, pode-se concluir que os dois solos, S1 e S2, apresentam condutibilidade térmica inferior ao proposto pelo ITE 50 (2006) para taipa. Além disso, é possível perceber que, também de acordo com o documento, os solos utilizados podem ser considerados menos condutores se comparados a diversos materiais, como o estuque de baridade semelhante (800 mW/m°C), argamassas e rebocos não tradicionais de baridade semelhante (1.000 mW/m°C) e o betão convencional (1.650 mW/m°C).

4.5 Absorção de água a baixa pressão

O ensaio dos Tubos Karsten, chamado de ensaio de absorção de água a baixa pressão, tem como objetivo determinar a resistência à água líquida de uma superfície, por meio de sua capacidade de absorção de água sob baixa pressão. A permeabilidade de um material define-se pela capacidade de serem atravessados por um fluido ao serem submetidos a um gradiente de pressão (Freitas and Pinto, 1999).

O ensaio foi realizado a partir da metodologia apresentada na ficha do LNEC FE Pa 39.1 (LNEC, 2002). Moldou-se um provete cúbico para cada solo (S1 e S2), conforme metodologia descrita em 4.2, e de lado 150 mm. Foram realizados 4 ensaios por provete, com a fixação de um Tubo Karsten em cada face vertical desse, conforme Figura 61. Inicialmente, os tubos foram fixados com massa de betume nas faces do provete, de modo que o local de contato entre a vidraria e o provete não fosse obstruído, mas sua circunferência ficasse totalmente vedada. Após, cada tubo foi preenchido com água até a altura de 9,8 cm, na marca de 0 cm³, dando início ao ensaio. Essa coluna de água corresponde a uma pressão de 961,38 Pa ou a uma pressão dinâmica do vento de 142,6 km/h (LNEC, 2002).

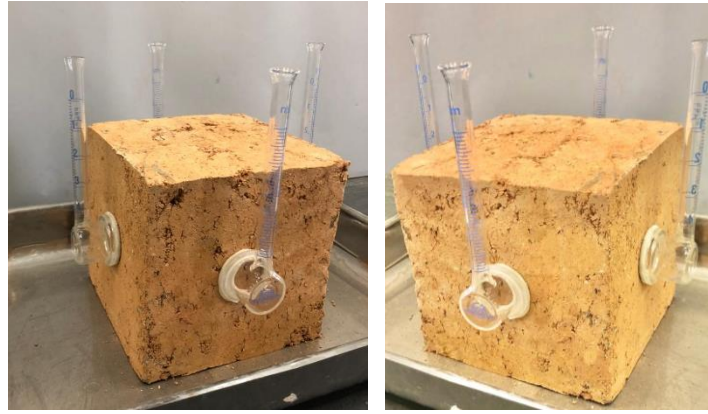


Figura 61. Tubos Karsten fixados

Os volumes de água absorvidos pelo solo foram medidos ao fim de 5, 10 e 15 minutos. Com esses dados, possibilitou-se determinar o coeficiente de absorção de água pôde ser obtido, em $\frac{kg}{m^2\sqrt{h}}$, através da Equação 9.

$$C_{abs} = \frac{x \times 10^{-3}}{d^2 \times \left(\frac{\pi}{4} \times 10^{-6} \times \sqrt{t}\right)} \quad (9)$$

Onde:

x = quantidade de água absorvida durante um intervalo t (ml);

d = diâmetro da superfície de penetração da água (mm);

t = intervalo de tempo (h).

Os resultados de água absorvida (em ml) nos dois provetes estão explicitados na Tabela 28, a seguir.

Tabela 28 – Quantidade média de água absorvida

		Absorção (ml)		
		Tempo (min)		
Solo		5	10	15
S1	Média	0.60	0.90	1.2
	DP	0.10	0.10	0.10
S2	Média	1.40	2.35	3.20
	DP	0.00	0.05	0.10

Fonte: (A Autora, 2021)

Através da tabela, percebe-se que o solo S2 absorveu mais que o dobro de água do S1 nos primeiros 5 minutos. Para os intervalos subsequentes, o primeiro solo apresentou

um acréscimo de 0,3 ml a cada 5 minutos. Já o segundo solo apresentou um acréscimo de cerca de 0,9 ml a cada 5 minutos. Ao fim do ensaio, o S2 acumulou quase o triplo de água absorvida quando comparado ao S1. Já os coeficientes de absorção obtidos são apresentados em sequência, na Tabela 29.

Tabela 29 – Coeficientes de absorção de água

Solo	Coeficiente de Absorção (kg/m ² √h)		
	Tempo (min)		
	5	10	15
S1	3.91	4.15	4.52
S2	9.13	10.84	12.05

Fonte: (A Autora, 2021)

Os coeficientes de absorção de S1, da mesma forma, são menores que os de S2. As curvas são apresentadas na Figura 62 para melhor compreensão.

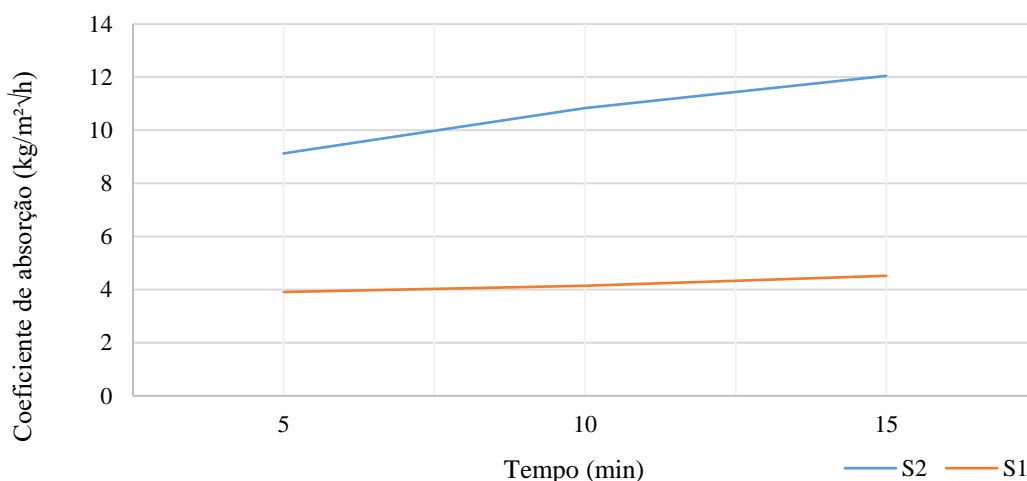


Figura 62. Coeficiente de absorção de água

Além de possuir coeficiente de absorção, aos 5 min, equivalente a menos de metade do outro solo, o material S1 apresenta uma evolução na curva de absorção menos acentuada que o S2, de modo que, ao fim dos 15 min, a diferença entre um e outro é de quase 3 vezes.

Em anterior investigação acerca da absorção da água em parede de taipa, constatou-se que o coeficiente médio de absorção (aos 5 min de ensaio) foi de 67,39 kg/m²√h (Dias, 2013). Ao comparar esse valor com os respectivos coeficientes de S1, 3,91 kg/m²√h, e S2, 9,13 kg/m²√h, é possível perceber que os provetes da presente pesquisa apresentaram

resultados muito satisfatórios. O fato de Dias (2013) ter encontrado resultados diferentes pode estar relacionado a alguns fatores: escolha de solo pior para a construção em taipa, má compactação do solo, má vedação dos tubos no ensaio ou erosão camada superficial da mureta (construída exposta ao tempo). A erosão da camada superficial proporciona o aumento de vazios na taipa, o que proporciona mais rápida absorção da água.

4.6 Discussão dos resultados

A caracterização termohigrométrica dos solos teve como objetivo verificar se alguns dos valores existentes na bibliografia são válidos, bem como acrescentar conhecimento na caracterização higrotérmica de solos utilizados para a construção em taipa. O resumo dos resultados médios obtidos no ensaio do coeficiente de transmissão térmica (o mais extenso dentre os realizados) está exposto na Tabela 30 para melhor discussão.

Tabela 30 – Resultados do ensaio de determinação experimental do coeficiente de transmissão térmica

Ensaio	Provete	Ti (°C)	Te (°C)	Tsi (°C)	Q (W/m ²)	U (W/m ² °C)	R (m ² °C/W)	λ estimado (W/m °C)
1	W35S1			33.68	58.50	1.65	0.61	0.80
	W40S1	36.95	3.71	33.22	61.10	1.72	0.58	0.97
	W50S1			33.17	40.69	1.13	0.88	0.70
2	W35S1			31.81	35.75	1.53	0.65	0.72
	W35S2	34.58	11.34	29.12	58.63	2.43	0.41	1.15
	W40S2			29.87	47.76	1.93	0.52	1.45

Fonte: (A Autora, 2021)

Além do ensaio de determinação experimental do coeficiente de transmissão térmica, realizou-se, também, o ensaio de Determinação experimental da condutibilidade térmica. Por meio de ambos os ensaios foi possível obter valores de λ para cada provete: seja o λ obtido pelo método das placas quentes ou estimado através do valor de U. Faz-se necessário, então, comparar os valores de λ obtidos nos dois ensaios. Para tal, elaborou-se a Tabela 31, que traz os valores encontrados em cada método.

Tabela 31 – Valores de λ

Ensaio	Provete	λ (W/m °C)	λ (W/m °C)
		Placas quentes	Determinação de U
1	W35S1	0.49	0.80
	W40S1	0.49	0.97
	W50S1	0.49	0.70
2	W35S1	0.49	0.72
	W40S2	0.39	1.15
	W35S2	0.39	1.45

Fonte: (A Autora, 2021)

Pode-se perceber que os valores de λ obtidos através do método de placas quentes são menores aos estimados por meio do ensaio de determinação experimental do coeficiente de transmissão térmica. No entanto, é sabido que existem diferenças no teor de umidade dos provetes utilizados nos dois ensaios, visto que foram submetidos ao mesmo período de secagem e os provetes utilizados na determinação experimental do coeficiente de condutibilidade térmica possuem dimensões muito inferiores. Assim, percebe-se que os diferentes valores obtidos são coerentes com as diferentes condições de ensaio dos provetes.

Conforme mencionado anteriormente, esperava-se que provetes de maior espessura apresentassem menor valor de U quando comparados aos de maior espessura e mesmo solo. Entretanto, por influência da umidade existente no provete W40S1, este apresentou U superior ao do provete W35S1, de menor espessura.

Além disso, é esperado que materiais com maior baridade apresentem maior coeficiente de transmissão térmica, maior condutibilidade térmica e menor resistência térmica. Considerando as baridades obtidas no ensaio Proctor, esperava-se que os valores de U para os provetes de S1 fossem maiores aos de S2, o que não se verificou. No entanto, ao observar os valores de λ obtidos pelos dois métodos, apresentados acima, percebe-se que os valores determinados através do método de placas quentes corroboram com o esperado.

O ITE 50 (2006) considera 1,10 W/m°C para o valor da condutibilidade térmica da taipa. Já Pereira (2003) encontra 1,08 W/m°C para a taipa feita de solo do tipo areia argilosa com cascalho. Dessa forma, percebe-se que todos os λ obtidos na presente investigação são de ordem de grandeza semelhante aos registrados anteriormente na bibliografia. Soudani et al. (2016) refere que a condutibilidade térmica não pode ser considerada propriedade fixa de um solo, mas sim uma propriedade de um solo a uma determinada umidade. Portanto, é ainda mais provável que os valores obtidos pelos diferentes métodos sejam diferentes para os mesmos provetes simplesmente por influência do teor de umidade, não havendo erros experimentais envolvidos.

Ainda que os resultados encontrados não estejam, em sua totalidade, de acordo com o esperado no início do programa experimental, foi possível comprovar o afirmado por Soudani et al. (2016) e verificar a influência da umidade no comportamento térmico da taipa. Dessa forma, constatou-se que a caracterização térmica de um solo a um único teor de umidade não é suficiente para determinar, com precisão, seu comportamento térmico. Por conta de suas características higrotérmicas, é necessário caracterizar um mesmo solo com diversas umidades, de modo a perceber como uma parede de taipa pode se comportar nas mais diversas circunstâncias. Assim, pode-se afirmar que os resultados encontrados servem como contribuição ao estado de conhecimento atual acerca do comportamento higrotérmico da taipa.

Outro ponto que vale ser analisado é a validade da solução construtiva taipa dentro do Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação. Desde 2015, o valor de U máximo para as paredes em uma zona de Inverno III é de 0,35 (DRE, 2015b), conforme a Tabela 32.

Tabela 32 – Coeficientes de transmissão térmica superficiais máximos admissíveis de elementos opacos, $U_{m\acute{a}x}$ [W/(m² . °C)]

$U_{m\acute{a}x}$ [W/(m ² °C)]		Zona Climática		
		I1	I2	I3
Elemento da envolvente em contacto com o exterior ou com espaços não úteis com coeficiente de redução de perdas $b_{tr} > 0.7$	Elementos verticais	0.50	0.40	0.35
	Elementos horizontais	0.40	0.35	0.30

Fonte: (DRE, 2015b)

Através da análise dos coeficientes de transmissão térmica, apresentados anteriormente, percebe-se que a utilização da parede de taipa sem nenhum tipo de acabamento ou isolamento não é suficiente para satisfazer o requisito em qualquer das situações.

No entanto, é importante lembrar que, raramente, um elemento de vedação (e.g. tijolo cerâmico, betão ou bloco de betão) é utilizado sem isolantes térmicos ou acabamento para regularização. Dessa forma, a verificação da adequação de solução composta contendo parede de taipa se faz válida. A composição considerada está disposta na Tabela 33.

Tabela 33 – Solução construtiva com taipa

	Solução	Espessura
Vedação	Parede de taipa	35 cm - 40 cm
Argamassa colante	Adesivo A 50	0.5 cm
Isolamento / Revestimento exterior	Aglomerado de cortiça expandida MDFachada	8 cm

Fonte: (A Autora, 2021)

A solução construtiva acima foi proposta por se tratar de uma composição ecoeficiente a base de terra com principais materiais naturais (terra e cortiça). Além disso, a construção continua a ser sustentável e em grande parte reutilizável, visto que, caso venha a ser demolida, o isolamento pode ser retirado e, então, a estrutura será composta basicamente por solo.

Além disso, verificou-se a possibilidade de utilizar o aglomerado de cortiça expandida como revestimento externo, através do produto MDFachada (Amorim Cork Insulation, 2002). Dessa forma, a parede de taipa possui uma camada de proteção contra a água pelo exterior, mas garante suas propriedades de inércia térmica pelo interior. Por fim, o uso dessa solução garante a menor produção de resíduos, visto que o isolante térmico é o próprio revestimento externo, enquanto que a face da parede de taipa pode servir como o próprio revestimento interno.

As espessuras de parede em construções em taipa variam, tipicamente, entre 30 e 120 cm (Augusta et al., 2007). Dessa forma, optou-se por analisar, na solução proposta, o caso menos favorável dentre os abordados no procedimento experimental: a parede com espessura de 35 cm. Além disso, de modo a comparar os resultados das soluções, o cenário utilizando a parede de espessura de 40 cm também será analisado. Para o cálculo do U das soluções, foram considerados quatro cenários para cada uma das espessuras: λ do ensaio de determinação experimental da condutibilidade térmica e λ do ensaio de determinação experimental do coeficiente de transmissão térmica para os provetes dos solos S1 e S2. Além desses valores, também foi necessário considerar o valor da condutibilidade térmica para Rse e Rsi. Foram utilizados os valores de referência do ITE 50 (2006): 0,04 para Rse e 0,13 para Rsi. Para o λ referente ao aglomerado de cortiça expandida, utilizou-se o valor de 0,045 W/m °C, conforme o regulamento e o fabricante (Amorim Cork Insulation, 2002; Santos and Matias, 2006). A Tabela 34 a seguir mostra os valores obtidos para a solução proposta com parede de 35 cm de espessura.

Tabela 34 – Valores de U para a solução com parede de taipa de 35 cm

Método (λ)	Determinação experimental do coeficiente de transmissão térmica		Placas quentes		
	Solo	S1	S2	S1	S2
U (W/m ² .°C)		0.32	0.35	0.30	0.28

Fonte: (A Autora, 2021)

Através da análise dos resultados, percebe-se que uma parede com 35 cm executada com ambos os solos poderia ser utilizada em qualquer zona climática se utilizada em conjunto com isolante de aglomerado de cortiça expandida, desde que o teor de umidade do elemento fosse compatível ao presente no provete do ensaio de determinação experimental do coeficiente de transmissão térmica para o solo S2, e pouco superior ao presente no provete do mesmo ensaio para o solo S1. Já essas mesmas paredes poderiam ser utilizadas em todas as zonas com maior assertividade, caso possuam umidades compatíveis às do ensaio de placas quentes.

É possível verificar que, com a solução proposta, os valores de U obtidos podem ser enquadrados dentro do permitido pelo regulamento mesmo com certa variação na umidade do solo. O que serve como validação da realidade, visto que a parede de taipa, por suas propriedades termohigrométricas, pode apresentar oscilações no nível de

umidade em função do tempo. A Tabela 35 ilustra o comportamento da solução proposta com parede de 40 cm de espessura.

Tabela 35 – Valores de U para a solução com parede de taipa de 40 cm

Método (λ)	Determinação experimental do coeficiente de transmissão térmica		Placas quentes		
	Solo	S1	S2	S1	S2
U (W/m ² .°C)		0.33	0.33	0.29	0.27

Fonte: (A Autora, 2021)

Através da análise dos resultados, percebe-se que uma parede com 40 cm executada com qualquer um dos solos, calculada a partir do valor de λ obtido pelos métodos de placas quentes e determinação experimental do coeficiente de transmissão térmica, poderia ser utilizada em qualquer zona climática, desde que utilizada em conjunto com isolante de aglomerado de cortiça expandida. É possível perceber, porém, que o protótipo de parede do solo S1 com 35 cm possui melhor desempenho térmico se comparado ao de 40 cm. Isso se deve à diferença de umidade dos provetes.

Então, percebe-se que as paredes de taipa são capazes de cumprir os requisitos do REH quando combinados com isolantes térmicos, o que é obrigatório (DRE, 2015b). Também foi possível verificar que a escolha do solo possui impacto na caracterização térmica da taipa.

Por fim, percebeu-se, através do programa experimental, o impacto da umidade existente no interior de uma parede de taipa em seu comportamento térmico. Em construções reais em taipa, deve-se considerar que existe a variação do teor de umidade no interior da parede no decorrer do tempo, por conta das características termohigrométricas do material. Dessa forma, a análise do comportamento térmico da taipa com variadas umidades se faz necessário, visto que um solo com diferentes umidades possui diferentes comportamentos e coeficientes, o que, na realidade, também ocorre.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Os dois solos estudados possibilitaram a análise da influência da escolha do solo no comportamento térmico de uma parede de taipa. Com a seleção e caracterização física do solo, buscou-se analisar dois solos distintos que se encaixassem no que permite a literatura: um deles dentro dos limites recomendados e outro dentro dos limites permitidos. As granulometrias encontradas são diferentes, ainda que ambos os solos sejam classificados como cascalho argiloso com areia, o solo S1 apresenta maior quantidade de partículas grossas, enquanto que o solo S2 possui mais finos. Além disso, os limites de consistência se mostraram diferentes: o solo S2 é mais plástico que o solo S1. Por fim, a compactação Proctor foi onde os solos apresentaram mais diferenças, visto que S2 possui umidade ótima quase 70% superior e baridade máxima seca 11% inferior a S1.

Ainda, foi possível verificar a influência da variação da espessura da parede nos resultados da caracterização térmica. Dessa forma, conclui-se que paredes com espessura de 50 cm apresentam diferença significativa no conforto térmico, se comparado a paredes de 40 cm ou menos. Alguns ensaios, como o de condutibilidade térmica e absorção de água a baixa pressão, foram necessários para melhor compreender o comportamento do material, independentemente da dimensão do provete.

Através do ensaio de determinação experimental do coeficiente de transmissão térmica foi possível estimar um valor para λ , que foi comparado ao λ resultante do ensaio de determinação experimental do coeficiente de condutibilidade térmica. Percebeu-se que os valores obtidos para o solo S1, que possuiu provetes com menor umidade no ensaio de U, apresentaram o λ estimado entre 44 e 100% superiores ao valor de λ obtido pelo método de placas quentes. Já para o solo S2, a diferença foi significativamente superior: os valores estimados superaram de 197 a 243% o valor de λ experimental. Assim, é possível perceber o impacto da umidade no desempenho térmico do provete.

Os resultados obtidos também foram comparados com os valores indicados para U e λ no REH (2015) e no ITE 50 (2006). Constatou-se que a taipa pode ser enquadrada nos requisitos do Regulamento e, portanto, utilizada em novas construções, desde que combinada a um isolante térmico, nesse caso natural e ecológico. Além do mais, uma vez que existem inúmeros tipos de solos com propriedades diferentes, seria interessante, para os cálculos dos projetos térmicos, que o valor de referência para taipa no ITE 50 (2006) fosse dividido em faixas, por baridade seca, como tantos outros materiais.

Além disso, vale ressaltar que a taipa apresenta diversas qualidades, que não são expressas diretamente nos parâmetros utilizados no cálculo térmico, não reconhecidas pelo REH (2015). A alta inércia térmica resultante das paredes espessas e pesadas, que confere maior conforto térmico e menor necessidade de aquecimento e arrefecimento do ambiente, não é considerada no cálculo. Também, as propriedades higrométricas da terra, que regulam a umidade do ambiente de modo a conferir maior conforto térmico aos usuários, não são consideradas. Por fim, o fato de a terra ser um material de construção natural, não industrializado, totalmente reutilizável e sem emissão de carbono diretamente relacionado ao processo construtivo não é contabilizado no regulamento, uma vez que métodos convencionais, industrializados e poluentes (e.g. betão) possuem os mesmos parâmetros de avaliação do que uma construção *verde*.

Com relação a execução do programa experimental, os ensaios para determinação de U e λ apresentaram as maiores dificuldades em sua execução. Desde a execução dos provetes, que exigiu demasiado esforço físico, tempo e conhecimento de normas internacionais e propriedades diversas dos materiais, até a montagem da estrutura necessária para a execução do ensaio de transmissão térmica, em que foi demandada a execução de adaptações na sala de ensaio, de modo a comportar provetes de dimensões e, principalmente, massa tão elevados e um transporte especial (com carga e descarga utilizando empilhadeira) dos protótipos de parede até o sítio do ensaio. Além disso, o ensaio de condutibilidade térmica apresentou o desafio de executar provetes de terra com superfícies lisas e regulares, de modo a não prejudicar a execução do procedimento.

Ainda, vale destacar que alguns dos provetes utilizados no ensaio de U apresentaram umidade bastante superior a outros em seu interior. Uma vez que os provetes utilizados em todos os ensaios foram executados da mesma forma, resta concluir que o período dedicado à secagem desses protótipos de parede não foi suficiente para a evaporação da umidade de seu interior. Como os provetes dos demais ensaios são menos espessos (5 e 15 cm), o tempo de secagem foi suficiente para que esses ensaios fossem realizados com provetes mais secos. Já os protótipos de parede, com espessuras entre 35 e 50 cm, deveriam ter sido submetidos a maior período de cura, de modo que o ensaio do coeficiente de transmissão térmica fosse realizado, da mesma forma, com umidade igual em todos os casos. É estimado que, para a secagem total de uma parede real de terra, esta deve ser submetida a um período de cura de seis meses (Augusta et al., 2007).

O momento em que essa investigação foi realizada, durante a pandemia do Coronavírus, acabou por restringir o tempo disponível para a secagem dos provetes, visto que foi necessário aguardar a reabertura dos laboratórios após confinamento para a execução do programa experimental. Além disso, o ensaio do coeficiente de transmissão térmica deve ser realizado durante o período do inverno, de modo a não prejudicar o controle da temperatura da sala de ensaio e nem a direção do fluxo de calor durante o ensaio.

Uma vez que a investigação da construção em terra, mais especificamente a taipa, é escassa, faz-se necessário aprofundar, em oportunidades futuras, os conhecimentos abordados no presente trabalho. Sugere-se que sejam analisados:

- Caracterização térmica dos materiais todos com mesmo grau de saturação;
- Caracterização térmica de diferentes solos com diferentes graus de saturação;
- Análise dos mesmos materiais no âmbito mecânico;
- Avaliação do desempenho térmico e da exequibilidade de construções com outros tipos de solo;
- Análise do desempenho térmico de troços de parede de outras espessuras;
- Realização de estudo de caso em edificação realizada com o mesmo material estudado, de modo a perceber o comportamento real do material e realizar a comparação com os ensaios laboratoriais;
- Análise da influência nas condições termohigrométricas do espaço interior para construções em taipa;
- Verificação do comportamento de solos estabilizados;
- Realização de outros ensaios que possam agregar na caracterização térmica e física dos materiais.

REFERÊNCIAS

- Adam, E. A. and Jones, P. J. (1995) ‘Thermophysical properties of stabilised soil building blocks’, *Building and Environment*, 30(2), pp. 245–253. doi: 10.1016/0360-1323(94)00041-P.
- Amorim Cork Insulation (2002) ‘MD Fachada Materiais naturais para soluções técnicas’, 200(mm).
- ASTM (1987) ‘ASTM D2487-85’, *Annual Book of ASTM Standards*.
- Augusta, M. *et al.* (2007) ‘Taipas : a Arquitetura De Terra’, (January 2004), pp. 1–8.
- Avrami, E., Guillaud, H. and Hardy, M. (2008) ‘Terra literature review—an overview of research in earthen architecture conservation.’, in *Characterization of earthen materials*, pp. 21–31.
- Brito, J. (2006) ‘Características do Solo para a Execução de Taipa. Parte I.’, *Revista Construção Magazine*, pp. 42–45.
- Burroughs, S. (2008) ‘Soil Property Criteria for Rammed Earth Stabilization’, *Journal of Materials In Civil Engineering*, pp. 265–273.
- Cagnon, H. *et al.* (2014) ‘Hygrothermal properties of earth bricks’, *Energy and Buildings*, 80, pp. 208–217. doi: 10.1016/j.enbuild.2014.05.024.
- Cid, J., Mazarrón, F. R. and Cañas, I. (2011) ‘Las normativas de construcción con tierra en el mundo’, *Informes de la Construcción*, 63(523), pp. 159–169. doi: 10.3989/ic.10.011.
- CIDRLD (2016) ‘Housing and Construction: Building codes general. NEW MEXICO HISTORIC EARTHEN BUILDINGS’, *NMAC*, p. 10.
- Cordeiro, C. C. M. *et al.* (2020) ‘Thermophysical characterization of lateritic soil for manufacturing rammed earth walls’, *Revista Materia*, 25. doi: 10.1590/s1517-707620200001.0889.
- Cunha, S. *et al.* (2015) ‘A contribution for the improvement in thermal insulation of tabique walls coated with metal corrugated sheets’, *Building Services Engineering Research and Technology*, 36(4), pp. 439–454. doi: 10.1177/0143624414558720.
- D. Gomes, N. (2015) ‘Caracterização de blocos de terra para construção de alvenarias

- ecoeficientes’, *Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa*.
- Dal Soglio, C. R. (2019) ‘Comportamento higrotérmico de ambientes internos com paredes em adobe : Estudo de caso em edificação residencial em Florianópolis / SC’.
- Dias, I. M. (2013) ‘Desenvolvimento e caracterização de argamassas de cal aérea e terra’. Available at: <http://run.unl.pt/handle/10362/10261>.
- Diferente, C. (2020) ‘Bloque de tierra comprimido, BTC: el ladrillo ecológico’. Available at: <http://construyediferente.com/bloque-tierra-comprimido/>.
- Doat, P. *et al.* (1979) ‘Construire en terre’, *CRATerre*, Ed. Altern.
- DRE (2015a) ‘Portaria nº. 379-A/2015’, *Diário da República*.
- DRE (2015b) ‘Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação - Decreto-Lei nº 194/2015’, *Diário da República*, 179.
- European Committee For Standardization (2001) ‘EN 12667: Thermal performance of building materials and products. Determination of thermal resistance by means of guarded hot plate and heat flow meter methods. Products of high and medium thermal resistance’.
- Fernandes, C. R. (2020) ‘Madeira e seus derivados na construção – Caso de estudo de proposta de um material alternativo’.
- Fernandes, M. (2006) ‘Técnicas de construção em terra’, *Terra: Forma de Construir. 10ª Mes Redonda de Primavera Arquitectura, Antropologia, Arqueologia.*, pp. 20–25.
- El Fgaier, F. *et al.* (2016) ‘Effect of sorption capacity on thermo-mechanical properties of unfired clay bricks’, *Journal of Building Engineering*, 6, pp. 86–92.
- Freitas, V. P. and Pinto, P. (1999) ‘Permeabilidade ao Vapor de Materiais de Construção - Condensações Internas’, *Informação Técnica NIT 002*, LFC 1998(Laboratório de Física das Construções), p. 56.
- GAIURB (2013) ‘Regulamento Geral das Edificações Urbanas (RGEU)’, *Câmara Municipal de Vila Nova de Gaia*, 1951, pp. 1–47.
- Gomes (2013) ‘Arqueologia da arquitectura de terra em Portugal’, *Arquitetura de Terra em Portugal*, pp. 125–132.
- Gomes, M. I. (2013) ‘Conservação de construções de taipa: argamassas de reparação’,

Tese de Doutorado. FCT-UNL.

Gonçalves do Poço, G. (2015) ‘Avaliação do desempenho térmico do sistema modular Geogreen aplicado em fachadas’.

Hall, M. and Djerbib, Y. (2004) ‘Moisture ingress in rammed earth: Part 1—the effect of soil particle-size distribution on the rate of capillary suction’, *Construction and Building Materials*, 18(4), pp. 269–280. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2003.11.002>.

Imbroisi, M. and Martins, S. (2021) ‘Construindo com Taipa de Mão e de Pilão’, *História das Artes*.

IPEC (2014) ‘Construções de adobe’, *REC Brasil: Rede de Economia Criativa*. Available at: <http://recbrasil.com.br/2014/04/construcoes-de-adobe/>.

ISO (2014) ‘ISO 9869-1:2014’, *Thermal insulation — Building elements — In-situ measurement of thermal resistance and thermal transmittance — Part 1: Heat flow meter method*.

Jaquin, P. A., Augarde, C. E. and Gerrard, C. M. (2008) ‘Chronological description of the spatial development of rammed Earth techniques’, *International Journal of Architectural Heritage*, 2(4), pp. 377–400. doi: 10.1080/15583050801958826.

Jayasinghe, C. and Kamaladasa, N. (2007) ‘Compressive Strength of Cement Stabilized Rammed Earth Walls’, *Construction and Building Materials*, 21, pp. 1971–1976.

Leftheriotis, G. and Yianoulis, P. (2012) ‘Glazings and coatings’, *Comprehensive Renewable Energy*, 3, pp. 313–355. doi: 10.1016/B978-0-08-087872-0.00310-3.

Librelotto, L. and Telli, F. (2014) ‘Tecnologias, sistemas construtivos e tipologias para habitações de interesse social em reassentamentos: Taipa de pilão’.

Liuzzi, S. *et al.* (2013) ‘Hygrothermal behaviour and relative humidity buffering of unfired and hydrated lime-stabilised clay composites in a Mediterranean climate’, *Building and Environment*, 61, pp. 82–92. doi: 10.1016/j.buildenv.2012.12.006.

LNEC (1965) ‘NP 83. Solos: Determinação da densidade das partículas.’, *Laboratório Nacional de Engenharia Civil*.

LNEC (1966a) ‘Especificação LNEC E-195. Solos: Preparação por via seca de amostras para ensaios de identificação. Lisboa – Portugal.’, *Laboratório Nacional de Engenharia*

Civil.

LNEC (1966b) ‘Especificação LNEC E-196. Solos: Análise granulométrica’, *Laboratório Nacional de Engenharia Civil.*

LNEC (1966c) ‘Especificação LNEC E-197. Solos: Ensaio de compactação’, *Laboratório Nacional de Engenharia Civil.*

LNEC (1967) ‘Especificação LNEC E-199. Solos: Ensaio de equivalente de areia’, *Laboratório Nacional de Engenharia Civil.*

LNEC (1969) ‘NP 143. Solos: Determinação dos Limites de consistência’, *Laboratório Nacional de Engenharia Civil.*

LNEC (1970) ‘Especificação LNEC E-239. Solos: Análise granulométrica de terrenos: vocabulário’, *Laboratório Nacional de Engenharia Civil.*

LNEC (2002) ‘FE Pa 39 - Ensaio de Absorção de Água sob Baixa Pressão.’, *Ficha de Ensaio - Revestimento de Paredes.*

Lourenço, P. (2002) ‘Construções em Terra’.

Magalhães, L. J. R. (2017) ‘Estudo do potencial de aplicação de resíduos têxteis em elementos de betão leve’.

McGregor, F. *et al.* (2014) ‘The moisture buffering capacity of unfired clay masonry’, *Building and Environment*, 82, pp. 599–607. doi: 10.1016/j.buildenv.2014.09.027.

McGregor, F. *et al.* (2016) ‘A review on the buffering capacity of earth building materials’, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Construction Materials*, 169(5), pp. 241–251. doi: 10.1680/jcoma.15.00035.

Minke, G. (2000) ‘Earth Construction Handbook’.

Moran, E. (1984) ‘Uso del Terrocemento en la Construcción de Vivienda de Bajo Costo’, *Tesis de Grado (Facultad de Ingeniería Civil. Pontificia Universidad Católica del Ecuador).*

Motta, M. (1997) ‘Construções Rurais em Alvenaria de Terra Crua no Baixo Alentejo’.

NZS (1986) ‘New Zealand Standard: Methods of testing soils for Civil Engineering purposes. Part 4: Soil compaction tests (NZS 4402.4.1.1:1986)’.

NZS (1998a) ‘New Zealand Standard: Materials and workmanship for earth buildings (NZS 4297: 1998)’.

NZS (1998b) ‘New Zealand Standard: Materials and workmanship for earth buildings (NZS 4298: 1998)’, (1).

NZS (1998c) ‘New Zealand Standard: Materials and workmanship for earth buildings (NZS 4299: 1998)’, (1).

Osula, D. O. (1996) ‘A comparative evaluation of cement and lime modification of laterite’, *Engineering Geology*, 42, pp. 71–81. doi: doi:10.1016/0013-7952(95)00067-4.

Pacheco-Torgal, F. and Jalali, S. (2012) ‘Earth construction: Lessons from the past for future eco-efficient construction’, *Construction and Building Materials*, 29, pp. 512–519. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2011.10.054.

Parellada, C. I. (1995) ‘Análise da malha urbana de Villa Rica dei Espiritu Santo (1589-1632)’, *Revista Do Museu De Arqueologia E Etnologia*, 5, pp. 51–61. doi: <https://doi.org/10.11606/issn.2448-1750.revmae.1995.109218>.

Paulo, B. (2016) ‘Avaliação de sustentabilidade da utilização de resíduos de garrafas PET enquanto material de construção’.

Pereira, J. P. B. (2013) ‘Análise do comportamento térmico de paredes de taipa’, *Universidade de Évora - Escola de Ciências e Tecnologias*.

Pereira, J. P. B. and Correia da Silva, J. J. (2012) ‘Contributo para a melhoria do desempenho térmico das paredes de taipa’, *Congresso Construção 2012 - 4.º Congresso Nacional*, pp. 5–17.

PET-UFPR (2016) ‘Programa de Educação Tutorial Engenharia Civil da Universidade Federal do Paraná’.

Picorelli, L. (2011) ‘Construção de terra: Parte 2 - Adobe’. Available at: <http://lecympicorelli-bioarquitetura.blogspot.com/2011/06/construcao-de-terra-parte2-adobe.html#axzz3SkyeuZHO>.

Pinto, J. *et al.* (2017) ‘Earth-based Render of Tabique Walls—An Experimental Work Contribution’, *International Journal of Architectural Heritage*, 11(2), pp. 185–197. doi: 10.1080/15583058.2015.1020459.

- Qin, M. *et al.* (2011) ‘Simulation of whole building coupled hygrothermal-airflow transfer in different climates’, *Energy Conversion and Management*, 52(2), pp. 1470–1478. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2010.10.010>.
- Ramos, N. and Freitas, V. (2011) ‘The Evaluation of Hygroscopic Inertia and Its Importance to the Hygrothermal Performance of Buildings’, *Heat Mass Transfer Porous Media*, pp. 25–45. doi: 10.1007/978-3-642-21966-5_2.
- Rigassi, V. (1985) ‘Compressed Earth Blocks : Manual of Production. CRAterre-EAG, GATE (Vol. I)’.
- Rix, C. G. (1998) ‘Stabilisation of a highly plastic clay soil for the production of compressed earth blocks’, *University of the Witwatersrand*.
- Sá, A. B. *et al.* (2016) ‘An approach on the thermal behaviour assessment of tabique walls coated with schist tiles: Experimental analysis’, *Energy and Buildings*, 117, pp. 11–19. doi: 10.1016/j.enbuild.2016.02.016.
- Santos, C. A. P. and Matias, L. (2006) ‘ITE 50: Coeficientes de transmissão térmica de elementos da envolvente dos edificios’, *LNEC*.
- SENSICO (2006) ‘Reglamento Nacional de Edificaciones (Decreto Supremo 011-2006)’.
- Serrano, S. *et al.* (2017) ‘Rammed earth walls in Mediterranean climate: Material characterization and thermal behaviour’, *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 12(3), pp. 281–288. doi: 10.1093/ijlct/ctw022.
- Silva, M. F. C. G. da (2015) ‘Blocos de terra compactada com e sem materiais cimentícios’, *Técnico Lisboa*, p. 130. Available at: [https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/563345090414529/Blocos de Terra Compactada com e sem materiais cimentícios - Miguel FCG da Silva.pdf](https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/563345090414529/Blocos%20de%20Terra%20Compactada%20com%20e%20sem%20materiais%20cimenticios%20-%20Miguel%20FCG%20da%20Silva.pdf).
- Silva, R. A. *et al.* (2013) ‘Rammed earth construction with granitic residual soils: The case study of northern Portugal’, *Construction and Building Materials*, 47, pp. 181–191. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.05.047.
- Soebarto, V. (2009) ‘Analysis of indoor performance of houses using rammed earth walls’, *IBPSA 2009 - International Building Performance Simulation Association 2009*, (January 2009), pp. 1530–1537.

Soudani, L. (2016) ‘Assessment of the validity of some common assumptions in hygrothermal modeling of earth based materials’, *Energy and Buildings*, 116, pp. 498–511.

Soudani, L. *et al.* (2017) ‘Energy evaluation of rammed earth walls using long term in-situ measurements’, *Solar Energy*, 141, pp. 70–80. doi: 10.1016/j.solener.2016.11.002.

Souza, P. M. L. P. de (2011) ‘Limite de liquidez - Correlações e comparações entre os métodos de Fall cone e da concha de casagrande’, p. 148. Available at: https://run.unl.pt/bitstream/10362/5674/1/Sousa_2011.pdf.

Taylor, P., Fuller, R. J. and Luther, M. B. (2008) ‘Energy use and thermal comfort in a rammed earth office building’, *Energy and Buildings*, 40(5), pp. 793–800. doi: 10.1016/j.enbuild.2007.05.013.

Torgal, F. and Jalali, S. (2009) ‘Construção em terra : Algumas considerações sobre a selecção de solos’, *Conferência Engenharia, Covilhã, Portugal*.

Torgal, F. P. and Jalali, S. (2009) ‘Construção em Terra: o passado, o presente e o futuro’, *Arte & Construção*.

UGreen (2019) ‘Taipa: um guia para arquitetos e engenheiros’.

Walker, P. *et al.* (2005) ‘Rammed earth: design and construction guidelines’, *IHS BRE*, p. 146.