



Caracterização do comportamento térmico e ao fogo de misturas à base de argila e lã de ovelha

Nathan Mazutti

Trabalho orientado por:

Prof^ª. Dra. Eduarda Cristina Pires Luso

Prof. Dr. Luís Miguel dos Santos Laím

Prof^ª. Dra. Elizângela Marcelo Siliprandi

Bragança, Portugal

Maio 2023



Caracterização do comportamento térmico e ao fogo de misturas à base de argila e lã de ovelha

Nathan Mazutti

Dissertação apresentada à Escola de Tecnologia e Gestão de Bragança para obtenção do grau de Mestre em Engenharia da Construção no âmbito do acordo de Duplo Diploma com a UTFPR. Este trabalho foi orientado pela Prof^ª. Dra. Eduarda Cristina Pires Luso, do IPB, pelo Prof. Dr. Luís Miguel dos Santos Laím, da Universidade de Coimbra, e pela Prof^ª. Dra. Elizângela Marcelo Siliprand, da UTFPR.

"Amanhã é hoje."

- *André Aciman*

Agradecimentos

Gostaria de expressar meus sinceros agradecimentos a todos que estiveram ao meu lado durante essa jornada acadêmica e pessoal. Aos meus pais, Luciane e Genilson, quero expressar minha profunda gratidão por todo o apoio incondicional, amor e dedicação que sempre me proporcionaram. Sem vocês, nada disso seria possível.

Um agradecimento especial também aos meus avôs, que generosamente permitiram minha vinda a Portugal e me proporcionaram todo o suporte necessário. Sua confiança, encorajamento e apoio foram essenciais para o meu sucesso.

À Prof^ª. Dra. Eduarda Cristina Pires Luso, ao Prof. Dr. Luís Miguel dos Santos Laím, ao Prof. Dr. Rui André Silva e à Prof^ª. Dra. Elizângela Marcelo Siliprandi, que me guiaram nesta jornada, sou profundamente grato por sua orientação, sabedoria e paciência ao longo deste trabalho. Seus ensinamentos foram fundamentais para o meu crescimento acadêmico.

Também expresso minha gratidão à Engenheira Luiza Barreira, responsável pelo Laboratório de Resistência dos Materiais, pelo apoio inestimável e compreensão demonstrados mesmo nos momentos mais desafiadores.

Aos meus amigos que se tornaram minha família aqui em Bragança, William, Fernando, Guilherme, Dalila, Alana, Maria, Mariah, Isa, Wellington e, especialmente, ao Joubert, quero expressar minha gratidão por todas as memórias criadas e compartilhadas ao longo dessa jornada. Sou grato por ter tido a oportunidade de vivenciar momentos inesquecíveis ao lado de pessoas tão especiais. E aos amigos que, mesmo estando distantes, me apoiaram e incentivaram, Lucas, Enrique, Reillow, Monique, Maria P., Carol e Charli, meus mais sinceros agradecimentos.

Resumo

O setor da construção civil desempenha um papel significativo nas emissões de gases de efeito estufa atuais, representando cerca de 40% das emissões totais, além de consumir aproximadamente 40% da energia produzida. Diante da urgência em enfrentar as mudanças climáticas e reduzir as emissões de gases de efeito estufa, é fundamental desenvolver materiais de construção sustentáveis que promovam um setor da construção civil mais responsável ambientalmente.

Um exemplo que se destaca nesse aspecto são as misturas de argila e fibras naturais. Além de serem mais sustentáveis, uma vez que utilizam recursos naturais, esses materiais têm o potencial de gerar uma melhoria no desempenho térmico, acústico, higrotérmico e ao fogo dos edifícios, oferecendo uma alternativa sustentável aos painéis de revestimento convencionais amplamente utilizados na indústria da construção.

A presente dissertação teve como objetivo investigar o comportamento funcional e a resposta ao fogo de materiais de misturas à base de solo argiloso e fibras de lã de ovelha com diferentes composições. A pesquisa concentrou-se na análise da condutividade térmica das misturas, bem como na avaliação da perda de massa e taxa de liberação de calor durante a exposição à um fluxo de calor, utilizando equipamentos como a placa quente protegida e o calorímetro de perda de massa.

Os resultados revelaram que a adição de fibras de lã de ovelha reduziu significativamente a condutividade térmica, melhorando o desempenho térmico das misturas. A presença de cal hidráulica e o tamanho da fibra também contribuíram para essa redução. As amostras com fibras de lã de ovelha tiveram perda de massa mais significativa durante a exposição ao calor, devido à decomposição das fibras. Além disso,

a taxa de liberação de calor mostrou um comportamento endotérmico nos primeiros minutos do teste.

Palavras-chave: Fibras naturais; Solo argiloso; Lã de ovelha; Condutividade térmica; Perda de massa

Abstract

The civil construction sector plays a significant role in current greenhouse gas emissions, accounting for approximately 40% of total emissions, and consumes around 40% of the energy produced. Given the urgency to address climate change and reduce greenhouse gas emissions, it is essential to develop sustainable construction materials that promote a more environmentally responsible construction sector.

One example that stands out in this regard is the mixtures of clay and natural fibers. In addition to being more sustainable by utilizing natural resources, these materials have the potential to improve the thermal, acoustic, hygrothermal, and fire performance of buildings, offering a sustainable alternative to the widely used conventional cladding panels in the construction industry.

The present dissertation aimed to investigate the functional behavior and fire response of clay-based soil mixtures with different compositions of wool fibers. The research focused on analyzing the thermal conductivity of the mixtures, as well as evaluating the mass loss and heat release rate during exposure to a heat flux, using equipment such as the guarded hot plate and the mass loss calorimeter.

The results revealed that the addition of wool fibers significantly reduced thermal conductivity, improving the thermal performance of the mixtures. The presence of hydraulic lime and the fiber size also contributed to this reduction. The samples with wool fibers experienced more significant mass loss during heat exposure due to fiber decomposition. Additionally, the heat release rate exhibited an endothermic behavior in the initial minutes of the test.

Keywords: Natural fibers; Clay soil; Sheep wool; Thermal conductivity; Mass loss

Conteúdo

Resumo	ix
Abstract	xi
Acrônimos	xxi
1 Introdução	1
1.1 Contexto e motivação	1
1.2 Objetivos propostos	4
1.3 Estrutura da tese	5
2 Revisão bibliográfica	6
2.1 Construções em Terra	6
2.2 Fibras naturais	9
2.3 Lã de Ovelha	11
2.4 Soluções construtivas no mercado a base de argila e/ou fibras naturais . . .	13
2.4.1 Painéis e placas de argila	14
2.4.2 Argamassas de argila	15
2.4.3 Tintas	16
2.4.4 Fibras vegetais para isolamento térmico	16
2.5 Propriedades térmicas	17
2.6 Resistência e reação ao fogo	20
2.6.1 Curvas Nominais	21

2.6.2	Curvas Paramétricas	22
2.6.3	Curva de Incêndio Natural	24
2.7	Transferência de calor	25
2.7.1	Condução	26
2.7.2	Convecção	26
2.7.3	Radiação	27
3	Programa Experimental	29
3.1	Caracterização dos Materiais	30
3.1.1	Solo Argiloso	30
3.1.2	Lã de ovelha	33
3.1.3	Areia	34
3.1.4	Cal hidráulica	35
3.2	Matriz de misturas	35
3.3	Procedimentos de mistura	37
3.4	Procedimento de ensaio	41
3.4.1	Placa quente protegida	41
3.4.2	Calorímetro de perda de massa	46
4	Resultados	51
4.1	Resultados na placa quente protegida	51
4.2	Resultados no calorímetro de perda de massa	59
5	Conclusão e trabalhos futuros	65
A	Declaração de Desempenho Cal Hidráulica - HL 5	81
B	Perda de Massa	85
C	Taxa de Liberação de Calor (HRR)	91

Lista de Tabelas

2.1	Efeitos da adição de cal hidráulica em amostras de solo e areia. Adaptado de [32].	8
2.2	Comparação entre placa de argila e placa de gesso.	15
2.3	Propriedades de diferentes materiais utilizados como isolantes térmicos. . .	17
2.4	Análise da adição de fibras de palmeira em elementos de gesso. Adaptado de [78].	18
2.5	Análise dos elementos em argila com adição de lã de ovelha. Adaptado de [64].	19
2.6	Análise térmica e mecânica de amostras à base de argila. Adaptado de [56].	19
2.7	Performance ao fogo de painéis de fibras de cânhamo, argila e madeira. Adaptado de [80].	20
3.1	Percentagem das frações granulométricas do solo argiloso. Adaptado de Antunes [32].	30
3.2	Resultados ensaios limites de consistência. Adaptado de Antunes [32]. . . .	31
3.3	Valores do ensaio de espalhamento. Adaptado de Antunes [32].	37
3.4	Matriz de composições (em peso).	37
3.5	Amostras testadas na placa quente protegida	46
4.1	Condutividade térmica (λ) das amostras ensaiadas (redução do λ entre parenteses)	52
4.2	Redução na condutividade térmica (λ) conforme a presença de cal (redução entre parenteses)	55

4.3	Comparação da condutividade térmica (λ) da amostra S40A60L10F45_4 com outros materiais	58
4.4	Resultados da perda de massa de amostras de diferentes composições . . .	59
4.5	Taxa de liberação total de calor (THR) [MJ/m ²] para as amostras ensaiadas	62
4.6	Comparação dos resultados obtidos com os de outros materiais. Adaptado de [109]	64

Lista de Figuras

1.1	Energia incorporada em materiais de isolamento térmico. Adaptado de [9].	3
2.1	Cidade de Bam no sul do Irã [22].	7
2.2	Classificação das fibras naturais conforme origem. Adaptado de [39].	10
2.3	CO_2e em kg emitida para a produção e processamento de diferentes rebocos. Adaptado de [52].	13
2.4	A) Clay Dry Plasterboard. B) Clayboard Heavy (LEMIX) [52].	14
2.5	Clay Undercoat Plaster With Straw [52].	16
2.6	CLAYFIX Clay Paint [52].	17
2.7	Curvas de incêndio nominais [85].	23
2.8	Fases de desenvolvimento de um incêndio [86].	24
3.1	Curva granulométrica do solo argiloso [32].	31
3.2	Estufa utilizado para secagem dos materiais e amostras utilizadas.	32
3.3	Solo não processado à esquerda e solo processado à direita.	32
3.4	Lã de ovelha utilizada.	33
3.5	Molde de papel cartão para corte da lã de ovelha	34
3.6	Curva granulométrica da areia utilizada.	35
3.7	Nomenclatura adotada com % em massa.	36
3.8	Misturadora utilizada.	39
3.9	a) Mistura final com aspecto homogêneo. b) Aglomeração das fibras durante a mistura.	39

3.10	Aspecto final das amostras, onde: A) S30A70. B) S30A70F15_4. C) S30A70F30_4. D) S30A70F45_4. E) S30A70L10. F) S30A70L10F45_4.	40
3.11	Placa quente protegida λ -Meter EP500e [102].	42
3.12	Amostra com suporte no λ -Meter EP500e.	43
3.13	Interface para preparação do teste no <i>software</i> computacional do λ -Meter EP500e.	45
3.14	Componentes do calorímetro de perda de massa com termopar e unidade de controle. Adaptado de [104].	49
3.15	Amostra posicionada no porta-amostras.	50
4.1	Condutividade térmica (λ) das amostras nas diferentes temperaturas de teste	52
4.2	Condutividade térmica (λ) das amostras S30A70 conforme quantidade de lã	53
4.3	Condutividade térmica (λ) das amostras S40A60 conforme quantidade de lã	54
4.4	Influência da adição de cal hidráulica na condutividade térmica (λ)	55
4.5	Influência do tamanho da fibra na condutividade térmica (λ)	56
4.6	Influência da massa volúmica na condutividade térmica (λ)	57
4.7	Correlação de Spearman entre os componentes e a condutividade térmica .	57
4.8	Comparação da perda de massa em função do tempo.	60
4.9	Média do HRR em função do tempo.	61
4.10	Fumo observado no início do teste.	63
4.11	Amostras após ensaio no calorímetro.	63

Acrônimos

A	Área da superfície exposta da amostra	m^2
Ed	Módulo de elasticidade dinâmico	GPa
HRR	Taxa de liberação de calor por unidade de área	kW/m^2
$MMPR$	Taxa média de perda de massa	g/s
TML	Massa total perdida	g
CO_2e	Equivalência em dióxido de carbono	ton
Φ	Fator de forma	W/m^2K
λ	Condutividade térmica	W/mK
μ	Resistência a difusão de vapor de água	-
ρ	Massa volúmica	kg/m^3
θ_g	Temperatura do gás no compartimento	$^{\circ}C$
θ_m	Temperatura do corpo receptor	$^{\circ}C$
θ_r	Temperatura de radiação na vizinhança do elemento	$^{\circ}C$
ε_f	Emissividade do compartimento de incêndio	-
ε_m	Emissividade do corpo receptor	-
$h_{net,r}$	Fluxo de calor por radiação	W/m^2
h_c	Coefficiente de transferência de calor por convecção	W/m^2K
q''	Fluxo térmico de calor por unidade de área	W/m^2
q_c	Fluxo de calor	W/m^2
f_c	Resistência a compressão	MPa
f_b	Resistência a flexão	MPa

m_1	Massa inicial da amostra	g
m_2	Massa final da amostra	g
T_f	Temperatura do fluido	°C
THR	Taxa de liberação total de calor	MJ/m ²
T_s	Temperatura da superfície	°C
T_f	Temperatura do fluido	°C
TP_0	Valor de saída inicial da termopilha	mV
TP_1	Valor de saída final da termopilha	mV
w_{eq}	Teor de humidade em equilíbrio	%
t	Tempo	min

Capítulo 1

Introdução

1.1 Contexto e motivação

O crescimento econômico e o desenvolvimento tecnológico acentuados a partir da primeira revolução industrial contribuíram para uma mudança no modo de vida da população, levando a um estilo de vida regado ao consumo. Esse comportamento consumista, associado ao aumento populacional, maior longevidade e intensa urbanização, implica em uma utilização massiva de recursos naturais e geração de resíduos, gerando emissão de gases de efeito estufa e impactos ambientais significativos [1], [2]

Em 2018, a emissão mundial de gases de efeito estufa aumentou em cerca de 50 % em relação a 1990, chegando a 48,94 bilhões de toneladas de CO_2e (equivalência em dióxido de carbono) [3]. Modelos climáticos analisaram diferentes cenários para o futuro e estima-se que no final do século XXI o aquecimento médio da superfície aumentará de 1,1 a 6,4 °C e o nível do mar de 0,18 a 0,59 m [4].

Na União Europeia 75 % das emissões de gases de efeito estufa são resultantes da produção e do consumo de energia [5], cuja maior parte é gerada durante a queima de carvão e gás em centrais elétricas [6]. Pelo menos 40 % de toda a energia é utilizada pelo setor da construção civil, tornando-a um dos maiores consumidores da sociedade, sendo

o seu uso distribuído entre a construção, a operação e a demolição dos edifícios [7].

A fase operacional do edifício é a responsável pelo maior consumo de energia. Na União Europeia, o aquecimento e arrefecimento dos ambientes consome 50 % da energia final, com 80 % dessa energia utilizada por edifícios [5]. Mas esse cenário apresenta perspectivas de mudança. Com a concepção e construção de edifícios de baixo consumo energético e casas passivas, a energia operacional utilizada durante a vida útil do edifício diminui, e a energia para a construção dos edifícios aumenta, dando importância à escolha dos materiais utilizados [7], [8].

A energia incorporada nos materiais de construção corresponde a energia consumida na fabricação de um produto e representa 85 a 90 % da energia da fase de construção do edifício. Ela pode advir de um consumo direto ou indireto. O direto está relacionado com a extração da matéria-prima e do processo de produção. O indireto refere-se ao consumo energético das máquinas, da climatização e iluminação das fábricas e das manutenções necessárias no ambiente de trabalho. Outra parcela da energia incorporada é definida pela energia gasta no transporte das matérias-primas e dos materiais básicos utilizados, que depende da distância percorrida, do modo de transporte e combustível utilizado [7].

Até 2030, a União Europeia (UE) pretende reduzir as emissões de gases em 55 % em relação ao ano de 1990. Para isso a UE estabeleceu o Pacto Ecológico Europeu, um conjunto de iniciativas estratégicas para tornar a União Europeia o primeiro continente neutro em termos climáticos até 2050, com um crescimento econômico dissociado da utilização de recursos e sem impacto no clima, apresentando emissões líquidas de gases de efeito estufa nulas [5]. Logo, a escolha de materiais de construção que são mais eficientes do ponto de vista energético é fundamental para promover a eficiência energética e reduzir as emissões de gases de efeito estufa em edifícios. A Figura 1.1 destaca o impacto causado pela escolha dos materiais através da comparação do potencial de aquecimento global de diferentes materiais utilizados como isolamento térmico [9]. Sendo notável o impacto menor causado pelos materiais naturais.

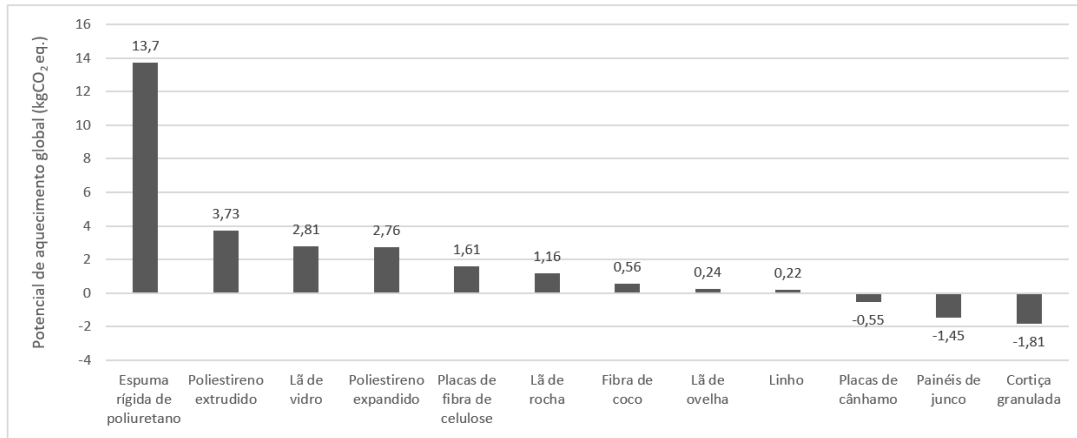


Figura 1.1: Energia incorporada em materiais de isolamento térmico. Adaptado de [9].

Além do comportamento térmico, a escolha de materiais com bom comportamento ao fogo é de suma importância para a segurança de edifícios e estruturas, uma vez que eles contribuem para a proteção passiva contra incêndios, promovendo a segurança das pessoas que ocupam o espaço e podendo reduzir a propagação de incêndios [10]. A capacidade do sistema construtivo em resistir ao fogo pode ser significativamente melhorada com a aplicação de revestimentos e acabamentos adequados, contribuindo para minimizar os danos e prejuízos causados pelo fogo [11].

Existem diversas opções de sistemas e equipamentos de proteção passiva contra incêndios disponíveis no mercado, sendo os revestimentos resistentes ao fogo um dos mais comuns. Esses revestimentos incluem a colocação de painéis pré-fabricados resistentes ao fogo ao redor dos elementos estruturais a serem protegidos, o uso de mantas fibrosas resistentes ao fogo, a aplicação de argamassas à base de cimento ou gesso e tintas e revestimentos intumescentes [12].

Entretanto, a preocupação ambiental tem levado a busca por materiais alternativos de proteção ao fogo que sejam menos prejudiciais ao meio ambiente e à saúde humana. Como a utilização de materiais à base de fibras, resíduos industriais e agroindustriais [13], [14].

As construções vernaculares são uma solução exemplar que apresenta um gasto energético próximo a zero, utilizando recursos naturais e locais que reduzem o impacto

ambiental causado pelo transporte dos materiais. Além disso, elas contribuem para o fortalecimento da economia local [15], [16]. No entanto, é importante ressaltar que as construções devem ser projetadas de forma a garantir a segurança estrutural e das pessoas presentes em caso de incêndio. Nesse sentido, o projeto ClaySkin, no qual se integra esta dissertação, tem como objetivo estudar as propriedades térmicas e de resistência ao fogo de painéis de revestimento produzidos a partir de materiais como fibras naturais e solo argiloso. Esses materiais são comumente utilizados em construções vernaculares e possuem potencial para serem aplicados em construções modernas mais sustentáveis.

1.2 Objetivos propostos

O objetivo principal desta dissertação é avaliar as propriedades térmicas e o comportamento ao fogo de painéis de revestimento constituídos por solo argiloso com adição de fibras de lã de ovelha, buscando contribuir para o desempenho higrotérmico dos edifícios, promovendo a redução do consumo de energia e do impacto ambiental da construção civil. Além disso, pretende-se avaliar a influência da adição de diferentes percentagens de fibras de lã de ovelha nas misturas, bem como o impacto da estabilização com um ligante. Para alcançar esses objetivos, serão realizados ensaios em conformidade com as normas técnicas e regulamentos específicos, utilizando-se uma metodologia que inclui análises térmicas. Dessa forma, espera-se verificar a viabilidade do material base desses painéis de revestimento em relação ao seu comportamento térmico e reação ao fogo, e identificar possíveis limitações e oportunidades para a sua aplicação na construção civil.

Espera-se assim, que a pesquisa contribua para o desenvolvimento de materiais alternativos e sustentáveis com potencial para aprimorar a eficiência energética dos edifícios e proporcionar um ambiente mais saudável, confortável e seguro para seus usuários.

1.3 Estrutura da tese

O presente trabalho encontra-se dividido em 5 capítulos que pretendem apresentar uma abordagem completa e consistente do tema estudado.

No capítulo 1, é apresentada uma introdução do tema da pesquisa, incluindo a motivação para a realização deste estudo, os objetivos específicos e a organização geral da tese.

No capítulo 2, denominado de revisão bibliográfica, é realizada uma análise da literatura científica disponível sobre o uso do solo na construção civil, as fibras naturais e os seus comportamentos em situação de incêndio, assim como, de outros materiais já comercializados. O objetivo desse capítulo é fornecer o estado atual no desenvolvimento e investigação deste tipo de produtos na construção.

No capítulo 3, é descrito a caracterização dos materiais utilizados, o procedimento da preparação das misturas e dos ensaios experimentais de condutividade térmica e resistência ao fogo.

No capítulo 4, são apresentados os resultados experimentais obtidos para os diferentes materiais estudados, incluindo análises dos resultados e comparações com outros materiais existentes no mercado.

No capítulo 5, são apresentadas as conclusões finais do estudo, incluindo uma síntese dos resultados obtidos, suas implicações práticas e recomendações para pesquisas futuras.

Capítulo 2

Revisão bibliográfica

2.1 Construções em Terra

Não se sabe ao certo quando surgiram as primeiras construções com terra, mas estima-se que a utilização da terra como material de construção começou com o início das primeiras sociedades agrícolas, cerca de 12.000 a 7.000 a.C [17]. A sua utilização ocorreu em diversos períodos históricos ao redor de todo o mundo, sendo que muitas das construções com terra remanesceram e podem ser observadas nos dias atuais [17]. A cidade de Bam no Irã mostrada na Figura 2.1 conta com elementos com aproximadamente 2.500 anos, evidenciando a durabilidade dessas construções. Pode-se citar também a cidade de Xibã no Iémen, que porta edifícios com 11 andares construídos em terra há 100 anos atrás [18].

Na atualidade, Minke [19] estima que cerca de um terço da população mundial vive em construções em terra, aproximando-se da metade da população em países em desenvolvimento [19]. As particularidades de cada região, como o solo disponível, a cultura local, a disponibilidade de recursos e as condições climáticas foram e ainda são responsáveis pela execução e difusão de diferentes técnicas [20].

A terra é um material abundante na natureza, podendo ser encontrado praticamente em todos os lugares [16], o solo utilizado para as construções geralmente é encontrado logo abaixo da camada vegetal superficial que pode ser removida de forma manual [6],

com baixo gasto energético para sua aplicabilidade e transporte [6], [21]. Se utilizada sem o processo de queima ou cozimento, não provoca a poluição do ambiente [17]. Após a demolição, a terra pode ser totalmente reutilizada em outras construções ou voltar ao ambiente [6], [16], [19].



Figura 2.1: Cidade de Bam no sul do Irã [22].

Ao longo do tempo, a busca por estruturas mais resistentes e duráveis levou ao desenvolvimento de diversas técnicas e adição de diferentes materiais para melhorar as características e propriedades do solo [23]. A origem da adição de fibras naturais em elementos construtivos remonta aos egípcios, que utilizavam a palha para a produção de adobes mais resistentes e duráveis [24]. Outros exemplos ao longo da história incluem as estradas no Templo do Sol e no Templo da Lua construídas pelos incas reforçadas com misturas de lã e argila, os vestígios de têxteis e peles utilizados como reforço encontrado em partes da Grande Muralha da China e em algumas das estradas que conectavam o Império Romano [23]. Também é válido mencionar o desenvolvimento de técnicas construtivas, como a terra prensada ou compactada, conhecida como taipa em Portugal

e taipa de pilão no Brasil. Nesses métodos, geralmente são adicionadas fibras e outros agregados para melhorar as propriedades físicas e mecânicas das paredes. Outra técnica relevante é a terra empilhada, que envolve a sobreposição de aglomerados de terra e palha em camadas para formar a parede [16], [17].

A adição de materiais como a cal hidratada ou hidráulica pode ser uma forma eficiente de estabilizar o solo, melhorando suas propriedades físicas e mecânicas, através da aglutinação das suas partículas e modificação das suas características [6], [25]–[27]. Quando adicionada nas proporções corretas, provoca o aumento da resistência e rigidez dos solos, sendo esse efeito analisado e comprovado por vários autores [28]–[30], assim como a redução na condutividade e difusividade térmica [31]. Solos estabilizados, apesar de possuírem uma maior energia incorporada, também podem ser reutilizados em outras construções [6].

Os testes realizados por Antunes [32] em amostras de solo e areia com e sem adição de lã de ovelha mostraram o impacto da adição de 10 % de cal hidráulica. A Tabela 2.1 ilustra esse impacto nas misturas compostas por 30 % de solo e 70 % de areia [32]. É possível observar que essa adição causou o aumento da resistência a flexão (f_b), compressão (f_c) teor de humidade em equilíbrio (w_{eq}) e uma redução da massa volúmica (ρ) e do módulo de elasticidade dinâmico (E_d). No entanto, de acordo com Fabbri et al. [33], edifícios construídos com terra estabilizada são mais vulneráveis ao fogo, uma vez que altas temperaturas podem causar perda de cimentação intergranular, resultando em danos mais rápidos [33].

Tabela 2.1: Efeitos da adição de cal hidráulica em amostras de solo e areia. Adaptado de [32].

Adições	ρ (kg/m ³)	f_b (MPa)	f_c (MPa)	E_d (GPa)	w_{eq} (%)
0 % de cal e lã	1811	0,2	0,29	3,21	0,5
10 % de cal e 0 % lã	1767	0,34	0,71	3,07	0,66
0 % de cal e 1,5 % de lã	1665	0,37	0,51	2,89	0,56
10 % de cal e 1,5 % de lã	1654	0,38	0,64	2,51	1,06
0 % de cal e 4,5 % de lã	1462	0,45	0,52	2,07	1,07
10 % de cal e 4,5 % de lã	1432	0,58	0,81	2,12	1,57

Williams et al. [21] também aponta que os materiais utilizados para a construção em terra no Reino Unido geralmente são adquiridos por um valor baixo ou nulo, sendo os custos de produção e construção responsáveis por encarecer o processo devido ao trabalho e tempo empregado, perdendo competitividade quando comparados com processos e materiais convencionais de alta energia incorporada [21]. À vista disto, Torgal & Jalali [6] comentam que em países em desenvolvimento o mesmo não ocorre devido a disponibilidade de mão de obra por um baixo custo, tornando o processo de produção e construção menos oneroso [6] e beneficiando a economia local [15].

Os solos são constituídos por fracções de partículas de diferentes tamanhos, nomeadamente pedregulho, areia, silte ou argila. As argilas agem como um aglomerante para as fracções grossas do solo e são constituídas principalmente por partículas lamelares microscópicas e submicroscópicas, com tamanho de até 0,002 mm, de essencialmente argilominerais mas também podendo conter sais solúveis, matéria orgânica, mica, partículas de quartzo, pirita, mica, calcita, dolomita e outros minerais [19], [34], [35].

Grande parte das propriedades das argilas são regidas pelos argilominerais presentes [34]. A composição mineralógica da argila é determinada pela presença de diferentes tipos de argilominerais, como as caolitas, montmorilonitas e ilitas, sendo esses responsáveis pela estrutura da argila, sua capacidade de troca de íons, plasticidade, coesão, capacidade de retenção de água, entre outras características [34], [36], [37].

2.2 Fibras naturais

As fibras naturais são todas aquelas extraídas da natureza e podem ser utilizadas sem necessidade de grandes processos químicos e físicos. Podem ser classificadas conforme a sua origem, sendo divididas em fibras vegetais, animais ou minerais [38]. Na Figura 2.2 é possível observar a classificação das fibras naturais conforme sua origem.

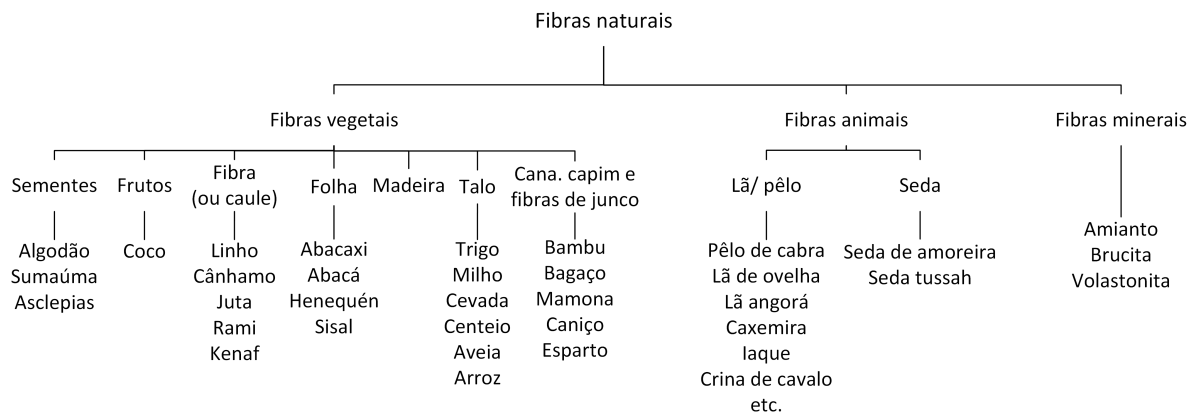


Figura 2.2: Classificação das fibras naturais conforme origem. Adaptado de [39].

As fibras vegetais possuem feixes alongados, de seção transversal arredondada e que em sua maioria apresentam celulose, hemicelulose e lignina como principais componentes. Apresentam vantagens quando comparadas com as fibras tradicionais, como as fibras de carbono e de vidro, entre elas: o caráter ecológico (sendo biodegradáveis e recicláveis), a abundância na natureza, o baixo custo (devido ao gasto reduzido de energia para produção), vantagens sociais (gerando empregos e fomentando economias em declínio) e propriedades como a baixa densidade (como as fibras de cânhamo e coco com densidade de $1,47 \text{ g/cm}^3$ e $1,15 - 1,46 \text{ g/cm}^3$, respectivamente). Como desvantagem pode-se mencionar: baixa resistência a tração, não uniformidade, elevada absorção de humidade (levando ao inchaço da fibra e perda de propriedades físicas e mecânicas), baixa resistência a micro-organismos e suscetibilidade ao apodrecimento [39].

As fibras animais são formadas por proteínas complexas e podem provir da secreção glandular de insetos, como a seda obtida dos casulos feitos pela larva do bicho-da-seda, ou de bolbos pilosos de animais, como a lã da ovelha e a crina do cavalo [38]. Apresentando vantagens e desvantagens semelhantes as fibras vegetais em relação as fibras tradicionais.

As fibras minerais são obtidas de rochas com estruturas fibrosas, como o amianto, sendo constituídas essencialmente por silicato [38].

Na atualidade o uso e estudo das fibras naturais têm ganhado destaque na

construção civil devido ao seu carácter sustentável, propriedades específicas (relação propriedade/densidade), disponibilidade nas imediações, fácil manuseio e baixo impacto na saúde humana durante sua preparação e utilização [39], [40].

2.3 Lã de Ovelha

Estima-se que a domesticação da ovelha, motivada inicialmente pela obtenção de alimento como a carne, o leite e sangue, tenha ocorrido há 11 mil anos no Sudoeste Asiático. Como resultado dessa domesticação, características resultantes das mutações que normalmente seriam eliminados na natureza foram mantidas devido a uma seleção artificial, associada a condições sócios-culturais e naturais. Dentre elas, a redução do pelo cabreiro e aumento da lã [41], [42].

Em dezembro de 2019, a União Europeia (28 países), contava com 85.214,20 mil cabeças de ovelhas. Na liderança o Reino Unido com 22.756,00 mil cabeças, seguido da Espanha com 15.478,62 mil cabeças e da Romênia com 10.358,70 mil cabeças. Portugal ocupava a oitava posição, com 2.219,78 [43]. Estima-se que cada ovelha produza cerca de 2,3 a 3,6 kg de lã bruta anualmente que deve ser tosquiada do animal [44].

A tosquia, retirada de lã, além de auxiliar no conforto térmico dos ovinos em altas temperaturas [45], evita a perda da mobilidade e representa uma medida salubre, eliminando resíduos grudados na lã e evitando insetos [46]. Mas a lã retirada é comumente considerada um resíduo na atividade de criação de ovinos, o descarte ou reciclagem deve ser apropriado devido à alta carga bacteriana, sendo muitas vezes queimada ou enterrada, causando um impacto negativo no ambiente [47].

A utilização da lã de ovelha na indústria da construção civil vai de encontro com um dos princípios da economia circular, que busca utilizar o descarte de uma atividade como matéria prima de outro processo. Aproveitando assim, um material natural sustentável, reduzindo o consumo de energia no setor da construção civil [47].

Fibras orgânicas apresentam maior absorção quando comparadas com fibras artificiais, o mesmo ocorre com a lã. Ela possui alta higroscopicidade, ou seja, capacidade de absorver

água do ar, em condições normais da atmosfera, absorve cerca de 16 a 18 % do seu peso, podendo chegar a valores em torno de 35 % em condições específicas [38]. Essa absorção está ligada à sua formação química, contento como exemplo, grupo de amidos que atraem a água [47], [48].

Além de possuir alta higroscopicidade, a lã também apresenta uma boa capacidade de difusão de vapor de água. Esses dois fatores são benéficos para o conforto ambiental, pois ajudam a regular a umidade do ambiente. Como resultado, é possível alcançar economia de até 80% de energia em residências e edifícios, devido à redução da necessidade de sistemas de resfriamento e aquecimento artificial [13].

Em ambientes quentes e secos, a lã liberta a água armazenada e absorve o calor, já em ambientes frios e úmidos, ela absorve a água em excesso da atmosfera, provocando uma redução da humidade relativa do ar e mantendo a temperatura do ambiente acima do ponto de condensação [13], [47]. Korjenic et al. [13] constatou em seus estudos que a boa absorção e dessorção da lã de ovelha torna-a mais resistente ao crescimento de mofo em relação a lã mineral, além de acumular menor humidade no lado frio do isolamento [13].

A lã de ovelha possui propriedades que a tornam um material com propício comportamento à propagação do fogo, obtendo a classificação E da EN 13501-1, podendo resistir ao ataque de uma chama pequena, por apenas um pequeno período de tempo [48], [49].

As características que tornam a lã um material com esta reação ao fogo são: elevada temperatura de ignição (750-800 °C), higroscopicidade que garante um alto teor de humidade, alto índice de oxigênio limitante (LOI) (25-26%) e alto teor de nitrogênio (16 %). Esse último contribui diretamente para a carbonização da lã, já que o nitrogênio não suporta a combustão, tornando a lã um material de queima lenta [48], [49].

Estudos realizados em lãs provenientes de três espécies diferentes mostraram que a perda de 5% de massa por decomposição ocorre a temperaturas de 255 a 262 °C, 30% a temperaturas de 355 a 372 °C, 50% a temperaturas de 465 a 520 °C, 70% a temperaturas de 585 a 588°C e 90% a temperaturas de 626 a 633 °C [50].

2.4 Soluções construtivas no mercado a base de argila e/ou fibras naturais

Atualmente, a adição de fibras se mostra atraente principalmente em locais onde os materiais podem ser obtidos localmente, sem grande desprendimento de energia e com custo economicamente eficiente [51]. Essa adição almeja aumentar a ligação nas misturas, reduzir a contração e densidade dos elementos, assim como, aumentar suas propriedades térmicas e acústicas [19].

O uso de solo não cozido aparece em novos materiais de construção, como painéis, placas, tintas e argamassas, podendo incluir ou não a adição de fibras. A Figura 2.3 apresenta a comparação da CO_2e emitida na produção e processamento de diferentes tipos de reboco, mostrando o impacto menor e evidenciando a sustentabilidade dos rebocos de argila em relação aos de gesso, cimento e cal [52].

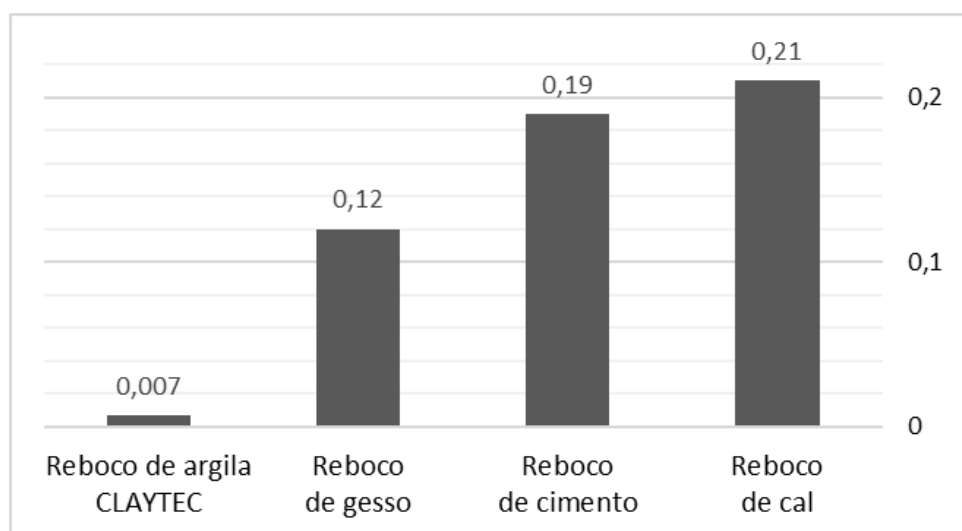


Figura 2.3: CO_2e em kg emitida para a produção e processamento de diferentes rebocos. Adaptado de [52].

2.4.1 Painéis e placas de argila

As placas e painéis de argila tem conquistado destaque no mercado construtivo, como aponta Schroeder [53] sobre o cenário alemão e surgem como uma alternativa aos painéis e placas de materiais convencionais (cimento, cal ou gesso) [53].

Esses painéis são compostos essencialmente de terra, argila, areia, aditivos de ligação, agregados e materiais fibrosos. Sua execução e utilização depende essencialmente da sua espessura e densidade, podendo ser utilizados como revestimento de paredes e forros, elementos com ou sem função estrutural em espaços internos ou externos, contribuindo para o conforto térmico dos ambientes [53].

A empresa alemã Claytec se destaca no mercado europeu por oferecer diferentes soluções à base de argila, entre elas, as placas e painéis de argila com fibras, como o Clay Dry Plasterboard (ver A da Figura 2.4) e o Clayboard Heavy (LEMIX) (ver B da Figura 2.4) que trazem conforto térmico, acústico e ajudam a regular a humidade do ar e absorver odores [52].

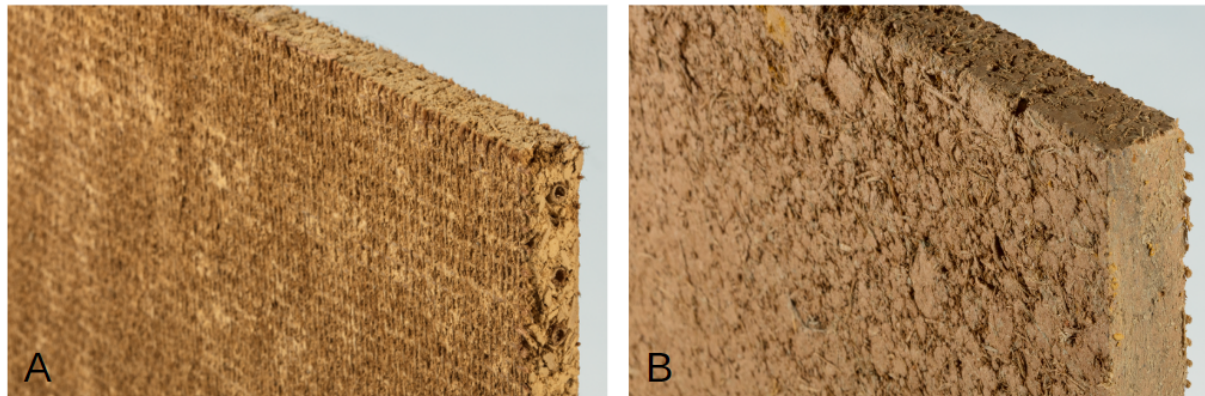


Figura 2.4: A) Clay Dry Plasterboard. B) Clayboard Heavy (LEMIX) [52].

A Tabela 2.2 apresenta a comparação entre a placa Clayboard Heavy (LEMIX), da empresa Claytec, e a placa de gesso da empresa Gyptec. É possível ver que a placa de gesso tem uma maior resistência à tração, uma condutividade térmica menor e está disponível em dimensões maiores. No entanto, é importante considerar o conforto térmico (devido a sua higroscopicidade) e acústico no ambiente e a sustentabilidade das placas e

painéis de argila, que justificam sua utilização [52].

Tabela 2.2: Comparação entre placa de argila e placa de gesso.

Característica	Clayboard Heavy (LEMIX) [52]	Placa de gesso [54]
Espessura (mm)	16	15
Comprimento (mm)	1250	2000 - 3000
Largura (mm)	625	1200
Massa volúmica (kg/m ³)	1450	607
Condutividade térmica (W/mK)	0,353	0,105
Resistência a flexão (N/mm ²)	0,8	1,6

2.4.2 Argamassas de argila

Argamassas de argila para reboco são uma opção viável para revestimento de paredes e tetos internos, pois podem ser aplicadas utilizando ferramentas e técnicas similares às convencionais [52], [55]. Além disso, essas argamassas são biodegradáveis e reutilizáveis, oferecendo conforto ao ambiente graças às propriedades higrotérmicas da argila. Essas propriedades permitem que a argila absorva até 72 g/m³ da humidade presente no ambiente após 12 horas, ajudando a controlar as variações de humidade e prevenindo doenças relacionadas com as más condições de ar. Como resultado, a utilização dessas argamassas também pode reduzir os gastos energéticos [52], [56].

O Clay Undercoat Plaster With Straw da empresa Claytec é uma alternativa inovadora no mercado de rebocos (ver Figura 2.5). Com uma composição que inclui solo argiloso com partículas até 5 mm, areia com tamanho entre 0 e 2 mm, agregados maiores de tamanho inferior a 8 mm e fibras de palha de cevada com até 30 mm de comprimento, este reboco oferece diversas vantagens. Além de ser classificado como não inflamável, possui uma classificação WS III de permeabilidade à água segundo a norma EN 1062-3 [57], indicando uma capacidade moderada de absorver vapor de água. A condutividade térmica do Clay Undercoat Plaster With Straw é de 0,91 W/mK [52].



Figura 2.5: Clay Undercoat Plaster With Straw [52].

2.4.3 Tintas

Tintas baseadas em argila para paredes e tetos internos também estão disponíveis no mercado, como a CLAYFIX Clay Paint da empresa alemã Claytec e a Earthborn Claypaint da empresa britânica Earthborn. Ambas oferecem uma ampla escolha de cores, sendo 146 opções na primeira e 72 na segunda. Suas composições incluem diferentes tipos de argila, talco, giz, goma acácia, saponinas, fibras de celulose e metilcelulose [52], [58]. A Earthborn Claypaint, por exemplo, apresenta uma transmissão de vapor de umidade (quantidade de vapor de água que pode passar por um metro quadrado do material em um dia) de 1115 g/m^2 por dia e uma permeabilidade ao vapor de água de $0,02 \text{ m}$. [58].

2.4.4 Fibras vegetais para isolamento térmico

As características térmicas, a alta capacidade de absorção acústica, a capacidade de retenção de umidade e o aspecto ecológico das fibras vegetais tornam sua utilização atrativa para o isolamento térmico de edifícios, competindo cada vez mais com os materiais convencionais [13]. Esses materiais podem ser encontrados no mercado na forma de rolos, painéis, granulados e pulverizados. A Tabela 2.3 apresenta uma comparação entre as propriedades térmicas de diferentes materiais comumente utilizados



Figura 2.6: CLAYFIX Clay Paint [52].

como isolantes, e é possível observar que os materiais vegetais possuem uma condutividade térmica semelhante à dos materiais convencionais, como lã de rocha, lã de vidro e poliestireno expandido, além de emitirem menos gases de efeito estufa. No entanto, a resistência ao fogo é a principal desvantagem desses materiais.

Tabela 2.3: Propriedades de diferentes materiais utilizados como isolantes térmicos.

Material	Densidade (kg/m ³)	Condutividade térmica (W/mK)	Calor específico (kJ/kgK)	Reação ao fogo	Resistência à difusão de vapor de água (μ)	Potencial de aquecimento global (kg CO ₂ eq por kg)	Referências
Cânhamo	30 - 50	0,038 - 0,060	1,6 - 1,7	E	1 - 2	0,14	[59]-[62]
Linho	20 - 100	0,038 - 0,075	1,4 - 3,6	E	1 - 2	N.A	[59], [63]
Lã de ovelha	10 - 25	0,039 - 0,063	1,6 - 1,7	E	2,6 - 6,5	1,92	[59], [61], [64]-[66]
Cortiça	120 - 240	0,037 - 0,050	1,5 - 1,7	E	1 - 30	0,8 - 1,44	[59], [67], [68]
Kenaf	30 - 180	0,040 - 0,065	1,6 - 1,7	E	1,2 - 2,3	0,6	[59], [69]
Lã de rocha	25 - 155	0,033 - 0,039	0,8 - 1,0	A1	1 - 1,3	1,23 - 2,31	[59], [70]-[72]
Lã de vidro	12 - 50	0,034 - 0,039	0,84 - 1,0	A1	1 - 2	9,63	[59], [65], [73], [74]
Poliestireno expandido	10 - 35	0,031 - 0,038	1,5	E	30 - 70	6,31 - 7,03	[59], [65], [75]-[77]

2.5 Propriedades térmicas

O estudo das propriedades térmicas e o comportamento ao fogo dos materiais são de extrema importância no planejamento de edifícios, alguns estudos que expõe as propriedades de diferentes materiais com adição de fibras naturais são mencionados a seguir.

A adição de fibras de palmeira no gesso foi investigada por Rachedi e Kriker [78]. O estudo revelou que um aumento na percentagem de fibras resultou em uma redução na

condutividade e difusividade térmica, bem como em um aumento no calor específico, como mostrado na Tabela 2.4 que apresenta os resultados para fibras com comprimento de 4 cm [78]. Florea e Manea [40] também analisaram misturas de gesso com cerca de 17,5% de fibras de cânhamo e 14% de lã de ovelha (por massa de material seco). Como resultado, a mistura com fibras de cânhamo apresentou uma condutividade térmica de 0,051 W/mK e a mistura com lã de ovelha apresentou uma condutividade térmica de 0,046 W/mK [40].

Tabela 2.4: Análise da adição de fibras de palmeira em elementos de gesso. Adaptado de [78].

Percentagem de fibra (% em massa)	Densidade volumétrica (kg/m ³)	Condutividade térmica (W/mK)	Calor específico (J/kgK)	Difusividade térmica (mm ² /s)
0%	1240,13	0,671	1471,00	0,61
0,5%	880,49	0,456	1956,43	0,40
1%	818,49	0,423	2015,27	0,39
1,5%	781,28	0,403	2059,40	0,37
2%	756,48	0,396	2088,82	0,33

Em argamassas cimentícias, os estudos realizados por Cardinale et al. [79] mostraram que a adição de uma pequena quantidade de lã de ovelha, cortadas com 1 cm de comprimento, resultou em uma diminuição significativa na condutividade térmica das amostras. Mas essa mesma adição, também é responsável pela diminuição das características mecânicas, como a flexão e compressão. A adição de 5% de lã (por massa de material seco) gerou uma redução de 88,2% na resistência a compressão e 81,8% na flexão. Sendo a proporção de 2% de lã (por massa de material seco) a que apresentou os melhores resultados mecânicos [79].

Para os elementos em argila, Mounir et al. [64] realizaram análises em amostras com adições de diferentes percentagens de lã de ovelha, a Tabela 2.5 ilustra esses resultados. As amostras de 5% e 3% de lã de ovelha (em volume) apresentaram uma condutividade térmica, efusividade térmica e difusividade térmica superior quando comparadas com a amostra sem adição de fibra. Porém, a capacidade térmica foi mais elevada na amostra sem adição de fibra, podendo ser a densidade um dos fatores responsáveis por isso [64].

Tabela 2.5: Análise dos elementos em argila com adição de lã de ovelha. Adaptado de [64].

Adição de lã de ovelha (%)	Densidade aparente (kg/m ³)	Condutividade térmica (W/mK)	Capacidade térmica (J/m ³ K)	Efusividade térmica (J/Km ² s ^{0.5})	Difusividade térmica (m ² /s)
5	1779,5	0,19	630 615	746,0	3,01 . 10 ⁻⁷
3	1823,5	0,24	569 221	808,7	4,22 . 10 ⁻⁷
0	2029	0,51	1 013 329	862,3	5,07 . 10 ⁻⁷

Thomsom et al. [56] analisaram dois rebocos de argila (um de base e outro de revestimento) feitos a partir de misturas prontas no mercado e também misturas de argila, silte e areia adição de fibras e núcleo de cânhamo e pedra-pomes. Como resultado as argamassas com adição dos elementos de cânhamo apresentaram elevada capacidade de absorção e disabsorção de vapor de água em relação as sem adição (aumento de 54 %) assim como a diminuição da condutividade térmica (redução de 89 %), em contrapartida, a resistência a flexão e compressão foram reduzidas em relação a argamassa sem adição de cânhamo (redução de 45 % e 52 %, respectivamente) conforme observa-se na Tabela 2.6 [56].

Tabela 2.6: Análise térmica e mecânica de amostras à base de argila. Adaptado de [56].

Amostra	Densidade (kg/m ³)	Condutividade térmica (W/mK)	Resistência à flexão (N/mm ²)	Resistência à compressão (N/mm ²)
Reboco de base	1867	1,1	0,97	2,60
Reboco de acabamento	1699	0,9	1,19	2,86
Pedra-pomes	831	0,1	0,77	1,79
Cânhamo	1074	0,1	0,66	1,38

Kallakas et al. [80] comparou a eficiência ao fogo de placas de argila da Claytec e da Lehmbaustoffe Schleusner com placas de gesso cartonado para proteção de elementos de madeira. Os painéis de argila mantiveram sua estrutura sólida e não apresentaram deformação ou retração consideráveis, além disso, eles proporcionaram uma proteção ao fogo superior em relação às placas de gesso cartonado e não houve ignição. Também foram estudadas placas de fibra de cânhamo e placas de partículas de madeira. A Tabela 2.7 apresenta a comparação dos resultados térmicos obtidos. B14 e B22 referem-se a painéis com areia, argila, palha de cânhamo e uma malha de fibra de vidro dos dois lados. G22

é feito com argila, aproximadamente 30 % de cavacos de cânhamo e um aglomerante parcialmente inorgânico. Por fim, Y14 é composto de terra, argila, perlite, hastes de junco, cânhamo, malha de juta, fibras de celulose e menos de 1 % de amido [80].

Tabela 2.7: Performance ao fogo de painéis de fibras de cânhamo, argila e madeira. Adaptado de [80].

Tipo de painel	Tempo de ignição (s)	Massa antes do ensaio (g)	Perda de massa aos 100 °C (%)	Tempo base de proteção (min)	Início da carbonização da madeira (min)
Cânhamo F	25	92,5	43,2	22,3	23,5
Cânhamo FK	13,5	94,9	51,8	28,1	30,1
Cânhamo FW	5	44,1	38,5	14,6	16,0
Cânhamo S	24,5	98,0	40,1	21,2	22,8
Madeira P	35,5	103,3	33,3	16,6	17,8
Argila B14	Não	98,3	6,3	8,5	10
Argila B22	Não	131,2	8,7	22,5	25,9
Argila G22	Não	170,1	15,2	37,5	> 40
Argila Y14	Não	89,1	n/o	10,1	11,8

Logo, pode-se afirmar que a adição de fibras naturais gera diversas consequências nos elementos, alguns positivos e outros negativos, que vão depender do tipo e quantidade de fibras adicionadas.

2.6 Resistência e reação ao fogo

As construções devem ser projetadas para garantir a segurança estrutural e das pessoas presentes em caso de incêndio. Isso inclui a capacidade de suportar cargas adicionais causadas pelo fogo e pela expansão térmica, bem como a reação ao fogo dos materiais usados na construção. Essa combinação de características é fundamental para garantir a segurança e a integridade das estruturas em situações de incêndio [81].

Em relação ao comportamento de materiais construtivos em incêndios, a norma EN 13501-1 classifica estes materiais com base na sua inflamabilidade, contribuição para o fogo, produção de fumos e na liberação de gotículas ou partículas incandescentes [82].

Já os elementos construtivos são avaliados por critérios específicos, tais como a estanqueidade, que se refere à capacidade de impedir a transmissão de chamas e gases quentes gerados pelo incêndio para a face não exposta, o isolamento térmico, que identifica a quantidade de calor transmitida por radiação e condução da face exposta ao

incêndio para a face não exposta, e a estabilidade, que se refere à capacidade de um elemento ou sistema construtivo de manter sua função estrutural ou de vedação sem colapso durante o período de exposição ao fogo. Sendo todos esses critérios fundamentais para garantir a segurança das pessoas e construções próximas [83].

Assim, a ação térmica se mostra uma exigência legal determinada pelo país ou região onde a construção está localizada e conforme seu tamanho, uso e ocupação. Sendo comumente representada por curvas de incêndio que retratam a variação da temperatura dos gases nas proximidades dos membros do elemento em função do tempo. As curvas de incêndio são empregadas para classificar ou verificar a resistência ao fogo de um material e podem ser curvas nominais ou paramétricas [81], [84].

2.6.1 Curvas Nominais

As curvas nominais como o nome sugere, não representam um fogo verdadeiro, logo não indicam o tempo verdadeiro que a estrutura irá resistir ao incêndio, mas servem como patamar de comparação para verificar a severidade do fogo que a estrutura consegue suportar. As curvas nominais consideram que a temperatura é uniforme e aumenta indefinitivamente ao longo tempo sem possuir uma fase de arrefecimento [84]. A EN 1991-1-2:2002 define três modelos:

- Curva padrão ISO 834;
- Curva de incêndio para elementos estruturais exteriores;
- Curva de incêndio para hidrocarbonetos.

Curva padrão ISO 834

A curva padrão ISO 834 representa um modelo de incêndio totalmente desenvolvido em um compartimento em função do tempo, foi e ainda é uma dos mais utilizados para avaliar estruturas e elementos de separação. A temperatura do gás no compartimento (θ_g) em função do tempo (t) [min] pode ser observado na equação (2.1) [81], [84].

$$\theta_g = 20 + 354 \cdot \log_{10}(8t + 1) \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (2.1)$$

Curva de incêndio para elementos estruturais exteriores

A curva de incêndio para elementos estruturais exteriores é destinada para as faces externas da parede externa expostas ao fogo por aberturas na fachada (exemplo janelas e portas) diretamente no respectivo compartimento, ao compartimento situado abaixo ou ao lado. É representada pela equação (2.2) [81].

$$\theta_g = 20 + 660 \cdot (1 - 0,687 \cdot e^{-0,32t} - e^{-3,8t}) \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (2.2)$$

Curva de incêndio para hidrocarbonetos

A curva de incêndio para hidrocarbonetos representa aqueles que ocorrem com hidrocarbonetos, sendo expressa pela equação (2.3) [81].

$$\theta_g = 20 + 1080 \cdot (1 - 0,325 \cdot e^{-0,167t} - 0,675 \cdot e^{-2,5t}) \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (2.3)$$

Na figura 2.7 é possível observar a evolução das curvas de incêndio nominais:

2.6.2 Curvas Paramétricas

As curvas paramétricas fornecem a evolução da temperatura do gás em um compartimento em função do tempo, tamanho do compartimento, tipo de compartimento, material combustível disponível e suprimento de ar disponível para combustão. Elas são válidas para compartimentos incêndio de até 500 m² de área em planta, sem aberturas no telhado e altura máxima do compartimento de [81], [84]. A curva dos gases de incêndio na fase de aquecimento é definida pela equação (2.4).

$$\theta_g = 20 + 1325 \cdot (1 - 0,324 \cdot e^{-0,2t^*} - 0,204 \cdot e^{-1,7t^*} - 0,427 \cdot e^{-19t^*}) \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (2.4)$$

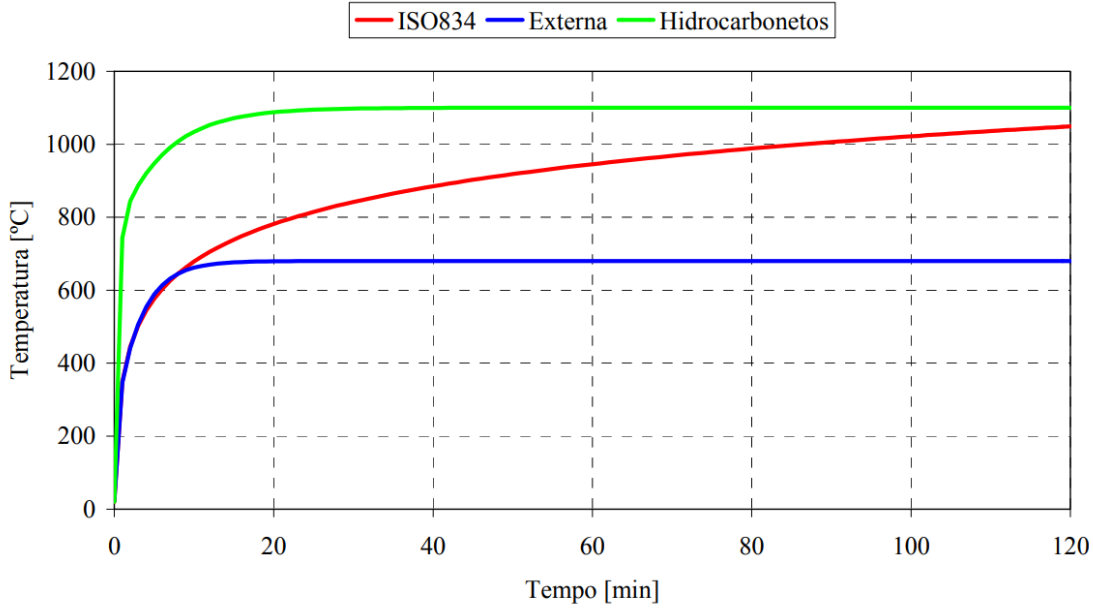


Figura 2.7: Curvas de incêndio nominais [85].

E para a fase de arrefecimento pela equação (2.5):

$$\theta_g = 20 + 1080 \cdot (1 - 0,325 \cdot e^{-0,167t} - 0,675 \cdot e^{-2,5t}) \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (2.5)$$

Onde:

θ_g representa a temperatura do gás no compartimento;

t^* representa tempos fictícios em horas sendo $t^* = t \cdot \Gamma$;

$$t_{max}^* = (0,2 \cdot 10^{-3} \cdot q_{t,d}/O) \cdot \Gamma$$

$$\Gamma = [O/b]^2 / (0,04/1160)^2;$$

$$b = \sqrt{\rho c \lambda};$$

ρ = densidade do envolvente do compartimento;

c = calor específico do envolvente do compartimento;

λ = condutividade térmica do envolvente do compartimento;

$O = A_v \sqrt{h_{eq}} / A_t$, é o fator de abertura;

A_v = área total das aberturas verticais nas paredes;

h_{eq} = média ponderada da altura das janelas nas paredes;

A_v = área total do compartimento (chão, teto e paredes incluindo aberturas);

$q_{t,d}$ = valor de calculo da densidade de carga de incêndio

2.6.3 Curva de Incêndio Natural

Cada incêndio representa uma situação única que depende de diferentes fatores como quantidade, tipo e distribuição dos materiais combustíveis no interior do recinto; ventilação e aberturas do ambiente; geometria da distribuição dos materiais combustíveis, forma do compartimento e características térmicas dos materiais constituintes do compartimento [86].

Um incêndio natural apresenta essencialmente quatro fases diferentes, a fase de ignição, a fase inicial, a fase de plena combustão e a fase de arrefecimento como pode ser observado na Figura 2.8.

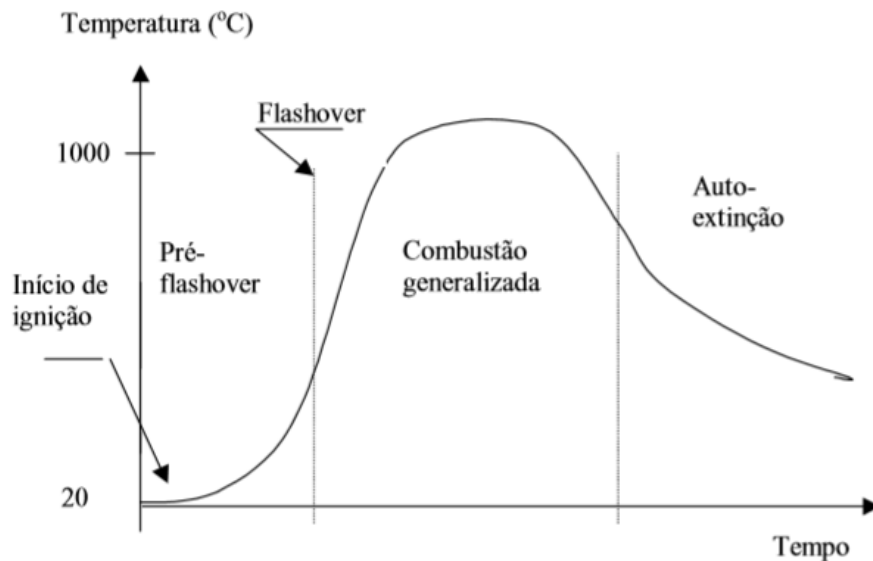


Figura 2.8: Fases de desenvolvimento de um incêndio [86].

A fase de ignição representa o início do incêndio, pode ocorrer por um longo período de tempo apresentando baixa geração de calor mas com liberação de gases prejudiciais a saúde humana, ou rapidamente com grande geração de calor e presença de chamas [87], [88].

Após a ignição uma nuvem de fumaça começa a se formar acima do combustível em chamas, e devido a convecção, o ar quente de menor densidade sobe permitindo a entrada de ar rico em oxigênio pelas aberturas do ambiente. Com a disponibilidade de oxigênio e o calor irradiado por essa nuvem de fumaça os materiais combustíveis presentes no ambiente iniciam a sua queima até atingirem uma faixa crítica chamada de *flashover* (773–873 K), ocorrendo uma inflamação generalizada dos materiais [87].

Na fase de plena combustão ocorre a participação de todos os materiais do ambiente que queimam completamente atingindo a temperatura máxima do incêndio (>900 K), produzindo grandes volumes de gases quentes e grandes chamas. Devido a baixa ventilação, o oxigênio se torna o fator limitante da combustão [87]–[89].

Por fim, a fase de arrefecimento é caracterizada pela diminuição da temperatura devido à queima total dos materiais combustíveis. A extinção do oxigênio ou falta de fornecimento de energia térmica para o ambiente interrompem o ciclo da combustão. [87], [89], [90].

2.7 Transferência de calor

Transferência de calor se refere a energia térmica em transição devido a existência de um gradiente de temperatura em um meio ou entre meios sólidos, líquidos ou gasosos através de colisões moleculares que leva ao aumento da energia cinética gerando o transporte de calor. Essa transferência pode ocorrer através da condução, convecção e radiação [91].

As propriedades térmicas da terra dependem de diferentes fatores como o tamanho e composição das partículas, o teor e qualidade da água, a espessura, a densidade, a porosidade e o gradiente de temperatura [92]. As construções em terra apresentam excelente conforto térmico, devido a fatores como a inércia térmica [6], [71] e a capacidade térmica da terra que evitam grandes amplitudes térmicas ao longo do dia [19], [93].

Os elementos de terra são incombustíveis, a norma alemã DIN 4102 (Parte 1, 1977) afirma que mesmo com uma pequena quantidade de palha desde que sua densidade seja maior que 1700 kg/m^3 eles permanecem sem iniciar combustão [19].

2.7.1 Condução

A condução ocorre em gases, líquidos e sólidos devido ao movimento de translação aleatório, internos de rotação e de vibração das partículas. Nos fluidos, as colisões intermoleculares melhoram a transferência, enquanto nos sólidos, a translação dos elétrons livres é responsável por esse aumento [91]. Nos solos a condução está presente em todos os constituintes: no solo sólido, na água presente e nos poros, sendo o mecanismo predominante de transferência de calor [92].

O transporte de calor por condução térmica é descrita pela lei de Fourier (2.6), onde o fluxo térmico de calor (q'') [W/m^2] por unidade de área é proporcional ao gradiente de temperatura na direção do fluxo ($\partial T/\partial x$) e a condutividade térmica do material (λ) [$\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$] [91], [94].

$$q'' = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \quad (2.6)$$

O sinal negativo é inserido em concordância com a segunda lei da termodinâmica, onde a transferência de calor ocorre do corpo de maior temperatura para o de menor temperatura [94].

Em caso de incêndios, a condutividade térmica é uma propriedade importante a ser considerada em relação à segurança. Materiais com alta condutividade térmica podem transmitir calor com facilidade, o que significa que eles podem aquecer rapidamente e se tornar inflamáveis em temperaturas relativamente baixas.

2.7.2 Convecção

A convecção é a transferência de energia que ocorre quando um fluido escoar sobre uma superfície ou dentro de um canal que apresenta temperaturas diferentes a do fluido, a transferência pode ocorrer devido aos efeitos combinados da condução e do escoamento global ou macroscópico do fluido [91], [94].

A transferência de calor por convecção pode ser classificada em convecção forçada, quando o escoamento é causado por meios externos, como ventiladores ou o próprio ar

atmosférico; e em convecção natural, quando o escoamento ocorre devido a forças de empuxo originadas da diferença de densidade devido a variações de temperatura do fluido [91], [94].

Em um incêndio é a transferência de calor por convecção que será responsável pela propagação do fogo em virtude do transporte de vapores e fumaça [95].

A equação para a taxa de transferência de calor por convecção é dada pela lei do resfriamento de Newton (2.7), sendo o fluxo de calor (q_c) [W/m²] proporcional à diferença entre as temperaturas da superfície (T_s) [°C], do fluido (T_f) [°C] e ao coeficiente de transferência de calor por convecção (h_c) [W/m².K] [91].

$$q_c = h_c(T_s - T_f) \quad (2.7)$$

De acordo com o Eurocódigo 1, Parte 1-2 (2002) [81], para curva de incêndio padrão deve-se adotar o valor de 25 [W/m²K] para o coeficiente de transferência de calor por convecção (h_c) [90].

2.7.3 Radiação

Radiação térmica se refere a energia emitida por toda a matéria e transferida através de ondas eletromagnéticas e/ou fótons devido a mudança nas configurações eletrônicas dos seus átomos ou moléculas, não necessitando de uma meio natural para sua transferência [91]. O fluxo de calor por radiação pode ser obtido pela equação (2.8):

$$h_{net,r} = \Phi \varepsilon_f \varepsilon_m 5,67 \cdot 10^{-8} [(\theta_r + 273)^4 - (\theta_m + 273)^4] \quad (2.8)$$

Onde, Φ é o fator de forma, ε_m é uma propriedade radiante da superfície conhecida por emissividade do elemento, ε_f é a emissividade do compartimento de incêndio, normalmente considerada 1, θ_r é a temperatura de radiação na vizinhança do elemento, podendo ser considerado igual a temperatura de incêndio e θ_m é a temperatura na superfície do elemento. E $5,67 \cdot 10^{-8}$ é a constante de Boltzmann (σ) [85], [91], [95].

Em incêndios, as temperaturas ultrapassam facilmente 400 [°C], assim, a transferência

de calor por radiação é a mais significativa, já que a transferência de energia entre os elementos envolve uma potência de grau quatro da temperatura [85].

Logo, o conhecimento da resistência e reação ao fogo dos materiais e dos elementos construtivos é de extrema importância para garantir a segurança. A avaliação destes critérios, como a estanqueidade, o isolamento térmico e a estabilidade, é fundamental para prever e mitigar os riscos de incêndio e garantir a integridade das pessoas e das edificações.

Capítulo 3

Programa Experimental

Este capítulo detalha o programa experimental executado para investigar o comportamento das amostras à base de solo argiloso em relação ao fogo e a sua condutividade térmica.

Primeiramente, é apresentada a caracterização granulométrica e de massa volumétrica dos materiais disponíveis e utilizados.

Em seguida, foi definida uma matriz de composições à base de solo argiloso a serem estudadas, incluindo a adição de lã de ovelha e estabilização com cal hidráulica em algumas das misturas. O solo argiloso além de ser um material abundante na natureza, apresenta propriedades aglomerantes. A lã de ovelha foi escolhida por conta de sua alta capacidade higroscópica, sendo um material comumente descartado em diversas regiões. A lã de ovelha pode ser utilizada como um agente de isolamento térmico, o que torna interessante o estudo de suas propriedades em misturas à base de argila. Por fim, a estabilização com cal hidráulica foi escolhida como um agente de melhoria das propriedades mecânicas das misturas. A adição de fibras e do estabilizador podem influenciar nas propriedades térmicas e de reação ao fogo das misturas, o que torna seu estudo importante para a compreensão do comportamento destes materiais em situações de incêndio.

Com a matriz de composições já definida é descrito o procedimento de preparação das misturas.

Por fim, é realizada a análise laboratorial, visando obter dados sobre as suas

propriedades térmicas e a resistência ao fogo de amostras de painéis. Essas propriedades são essenciais para avaliar o desempenho das misturas estudadas como material de isolamento térmico e de proteção ao fogo.

3.1 Caracterização dos Materiais

Para este estudo, os materiais utilizados foram solo argiloso, lã de ovelha, areia e cal hidráulica. A escolha desses materiais baseou-se em estudos anteriores realizados por Antunes [32] na Universidade do Minho, bem como em sua disponibilidade e facilidade de aquisição. O solo argiloso utilizado no estudo foi fornecido pela Universidade do Minho, o mesmo utilizado por Antunes [32]. Já a lã de ovelha, considerada um resíduo, foi fornecida pelo Instituto Politécnico de Bragança.

3.1.1 Solo Argiloso

O solo utilizado neste estudo foi fornecido pela Universidade do Minho e é originário da região do Alentejo. O conhecimento das propriedades físicas e mecânicas do solo são importantes, pois afetam as propriedades finais das composições. Para caracterizar o solo, foram realizados ensaios de análise granulométrica, determinação dos limites de consistência, densidade e massa volúmica aparente por Antunes [32]. A Figura 3.1 apresenta a curva granulométrica obtida e a Tabela 3.1 sumariza a análise da mesma. Conforme mostrado, o solo apresenta uma percentagem de argila de aproximadamente 34%.

Tabela 3.1: Percentagem das frações granulométricas do solo argiloso. Adaptado de Antunes [32].

Fração granulométrica	Valor (%)
Argila (< 0.002 mm)	34
Silte ($0.002 \leq 0.006$ mm)	30
Areia ($0.006 \leq 2$ mm)	18
Pedregulhos (≥ 2 mm)	18

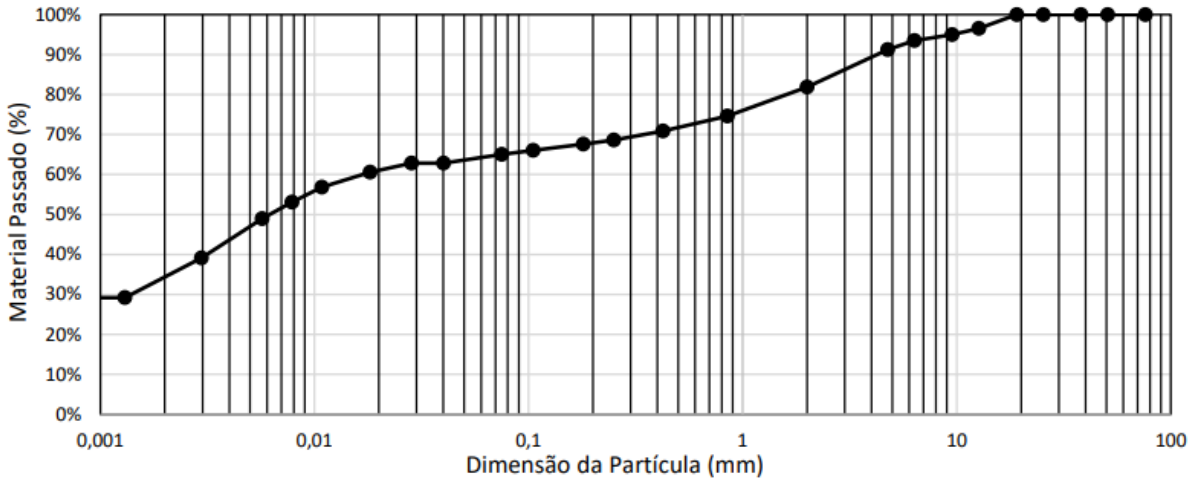


Figura 3.1: Curva granulométrica do solo argiloso [32].

Os limites de consistência do solo foram determinados por Antunes [32] seguindo a norma portuguesa NP 143 (IPQ, 1969) e os resultados obtidos podem ser observados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2: Resultados ensaios limites de consistência. Adaptado de Antunes [32].

Propriedade	Valor (%)
Limite de Plasticidade	21
Limite de Liquidez	42

Por fim, para determinar a massa volúmica do solo argiloso, foi utilizado o método da introdução da amostra pesada em uma proveta graduada, em duas fases, com agitação da proveta entre as fases e a retirada do valor do volume final. O resultado médio da massa volúmica aparente foi de 1068 kg/m^3 , com um coeficiente de variação de 1% [32].

Para a preparação das misturas o solo argiloso foi processado, começando pelo destorroamento e secagem, já que estava armazenado em uma área exposta à chuva e apresentava um teor de água elevado, tornando-o mais compacto. Para o destorroamento, foi necessário desagregar manualmente os torrões com o auxílio de um pilão de borracha. Em seguida, o solo foi seco em estufa (Figura 3.2) a $105 \text{ }^\circ\text{C}$ até atingir peso constante e peneirado com peneira número 4, com abertura nominal de 4,75 mm, conforme ASTM E11-17a [96]. A Figura 3.3 mostra a comparação entre o solo

antes e depois desse processo.



Figura 3.2: Estufa utilizado para secagem dos materiais e amostras utilizadas.



Figura 3.3: Solo não processado à esquerda e solo processado à direita.

3.1.2 Lã de ovelha

A lã de ovelha utilizada (Figura 3.4) foi disponibilizada pelo Instituto Politécnico de Bragança. A região de Trás-os-Montes, onde se localiza Bragança, ao norte de Portugal, é conhecida pela produção de lã de ovelha. No entanto, devido à falta de uso, grande parte dessa lã acaba sendo descartada como resíduo e enviada para aterros sanitários. Por isso, seu uso como material de construção sustentável pode ser uma forma de valorizar esse recurso natural e reduzir o impacto ambiental do seu descarte inadequado.



Figura 3.4: Lã de ovelha utilizada.

A lã utilizada neste estudo foi lavada antes do seu uso pois a lã não lavada apresenta forte odor, gordura e resíduos, o que pode prejudicar a sua trabalhabilidade e qualidade. A lavagem da lã resulta em uma lã com aspecto mais claro e menos gorduroso, melhorando a sua trabalhabilidade e facilitando tanto o processo de separação quanto o processo de corte das fibras. Para a realização da lavagem, iniciou-se retirando todos os resíduos orgânicos, como restos de plantas e galhos, em seguida, a lã foi lavada com água em temperatura ambiente e utilizando um detergente neutro, deixando ela com um aspecto branco e sem resíduos.

A massa volúmica aparente da lã utilizada neste estudo foi determinada por Antunes [32]. O valor médio encontrado foi de $22,32 \text{ kg/m}^3$, com um coeficiente de variação de

2%. Além disso, o teor de umidade da lã também foi avaliado por Antunes [32]. Para isso, amostras pesadas foram expostas a duas diferentes condições de temperatura em estufas: 100 °C e 40 °C. A perda de massa de água foi medida após 24 horas, com base no novo peso e, com base nesses resultados, foi possível determinar que o teor de umidade considerando secagem à 100 °C foi de 16%, enquanto para a de 40 °C foi de 7% [32].

Para realizar as misturas, foi necessário cortar a lã. A fim de agilizar e padronizar o processo de corte, foi confeccionado um molde de papel cartão, conforme Figura 3.5 que permitiu fixar a lã de forma a mantê-la reta durante o corte e garantir o tamanho desejado de 2 e 4 cm com precisão. Dessa forma, foi possível realizar o corte de maneira prática, rápida e rigorosa.



Figura 3.5: Molde de papel cartão para corte da lã de ovelha

3.1.3 Areia

A areia utilizada no processo das misturas foi fornecida pelo Instituto Politécnico de Bragança e é comercializada e distribuída pela empresa espanhola Áridos Villagodio, S.L. Essa areia é conhecida como meia areia (0/4). Antes de ser utilizada, a areia passou por um processo de secagem em uma estufa ventilada a aproximadamente 105 °C. Foi realizada uma análise granulométrica da areia, cuja curva granulométrica pode ser observada na Figura 3.6.

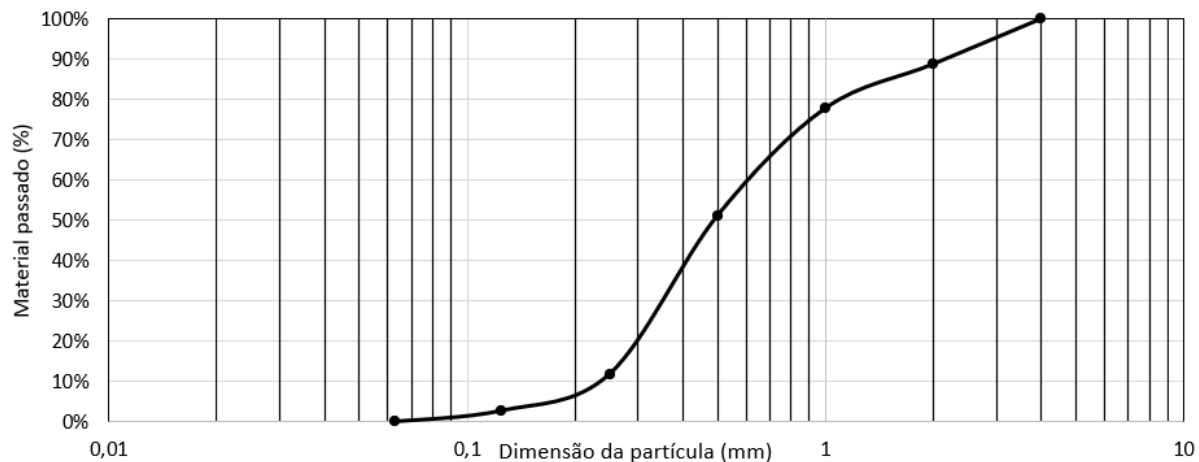


Figura 3.6: Curva granulométrica da areia utilizada.

A massa volúmica das partículas da areia utilizada foi fornecida pela empresa distribuidora e é de aproximadamente 2.670 kg/m^3 .

3.1.4 Cal hidráulica

Para a realização da mistura, foi adicionada a cal hidráulica HL 5 da marca Secil. Essa cal é constituída por silicatos e aluminatos de cálcio, com um baixo teor em hidróxido de cálcio. Ela é obtida por meio da cozedura de calcário margoso e, posteriormente, moagem.

De acordo com a declaração de desempenho do fabricante (Apêndice A), essa cal apresenta uma resistência mínima à compressão, aos 28 dias, compreendida entre 5 MPa e 15 MPa.

3.2 Matriz de misturas

Definido os materiais a serem utilizados foi necessário criar uma matriz de misturas para conduzir os ensaios planejados. Para garantir a identificação adequada da composição de cada mistura, foi adotada uma nomenclatura padronizada. Essa nomenclatura consiste em siglas que representam cada material utilizado na mistura, seguidas da quantidade em percentagem (%) para os agregados (solo, areia), percentagem (%) em relação aos

agregados para o ligante (cal hidráulica) e em gramas por quilogramas de agregado (g/kg) para as fibras. Em síntese, o solo e a areia representam a base, enquanto o ligante e a fibra são adicionados a essa base. As siglas utilizadas foram "S" para solo, "A" para areia, "L" para ligante, "F" para fibras. O comprimento das fibras foi indicado com "_comprimento das fibras" em centímetros (cm). Um exemplo final da nomenclatura pode ser observada na Figura 3.7. Essa padronização permitiu uma identificação clara da composição de cada mistura e facilitou a interpretação dos resultados obtidos nos ensaios.

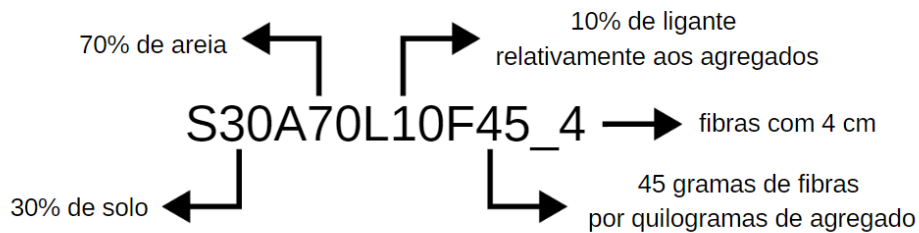


Figura 3.7: Nomenclatura adotada com % em massa.

A composição escolhida como base para as misturas foi de 30% de solo e 70% de areia e 40% de solo e 60% de areia, resultando em uma percentagem de argila de 11% e 15%, respectivamente. A escolha dessas composições foi devido a fatores relacionados com o processo de mistura, uma vez que este processo de mistura era muito difícil com os equipamentos disponíveis no laboratório nas misturas com maior percentagem de solo, além disso, a mistura S40A60L10F45_4, nos estudos de Antunes [32], foi a que apresentou os requisitos mínimos especificados na norma alemã DIN 18948:2018-12 [97]. A quantidade de água necessária para diferentes relações de solo-areia foi determinada por meio do ensaio de espalhamento realizado por Antunes [32], conforme a norma EN 1015-3. Vale ressaltar que o ensaio de espalhamento foi realizado somente para as misturas sem fibras naturais, já que a presença dessas fibras impedia o espalhamento adequado da argamassa. A quantidade de água para as misturas com fibras foi calculada a partir da quantidade de água para a mistura sem fibras com a mesma proporção solo-areia, acrescida da água necessária para molhar as fibras. A Tabela 3.3 apresenta os resultados do ensaio para

a mistura S30A70, S30A70L10, S40A60 e S40A60L10 onde é possível observar que as misturas que incluem 10% de cal hidráulica em sua composição apresentaram uma maior necessidade de água em comparação com a mistura que não contém cal hidráulica, assim como as misturas com maior percentagem de argila[32].

Tabela 3.3: Valores do ensaio de espalhamento. Adaptado de Antunes [32].

Mistura	Espalhamento (mm)	Razão água/(solo+areia)
S30A70	150	0,18
S30A70L10	150	0,24
S40A60	155	0,22
S40A60L10	150	0,30

Abaixo, na Tabela 3.4, são apresentadas as diferentes composições escolhidas para o estudo, sendo utilizada diferentes percentagens de fibra para avaliar sua influência.

Tabela 3.4: Matriz de composições (em peso).

Mistura	Solo (%)	Areia (%)	Fibra (g/kg)	Comprimento fibras (cm)	Ligante (%)	Razão água/(solo+areia)
S30A70	30	70	-	-	-	0,18
S30A70F15_4	30	70	15	4	-	0,22
S30A70F30_4	30	70	30	4	-	0,26
S30A70F45_4	30	70	45	4	-	0,27
S30A70L10	30	70	-	-	10	0,24
S30A70L10F45_4	30	70	45	4	10	0,37
S40A60	40	60	-	-	-	0,22
S40A60F15_4	40	60	15	4	-	0,26
S40A60F45_4	40	60	45	4	-	0,35
S40A60L10	40	60	-	-	10	0,30
S40A60L10F15_2	40	60	15	2	10	0,34
S40A60L10F15_4	40	60	15	4	10	0,34
S40A60L10F45_4	40	60	45	4	10	0,43

3.3 Procedimentos de mistura

Foi estabelecida uma metodologia de mistura com base na abordagem de Antunes [32] para a preparação das misturas, utilizando a matriz previamente definida. As misturas foram executadas no Laboratório de Materiais de Construção do Instituto Politécnico

de Bragança, sendo a limitação dos equipamentos o fator determinante na escolha do procedimento utilizado.

A preparação das misturas foi realizada em quatro etapas: preparação das fibras, mistura, moldagem e secagem/cura dos provetes. Na primeira fase, as fibras, que já haviam sido cortadas em pedaços de 2 e 4 cm, foram imersas em água por um período de 10 minutos. Após esse intervalo, as fibras foram retiradas do recipiente e a água excedente foi removida por meio de espremedura manual, limitando-se o peso das fibras molhadas ao triplo do seu peso original, a fim de evitar a adição excessiva de água à mistura. A relação água/(solo+areia) final é apresentada na Tabela 3.4.

Após a preparação das fibras e com o solo e a areia secos, iniciou-se o processo de mistura, sendo utilizado a misturadora mostrada na Figura 3.8. Inicialmente, foi adicionado dois terços da água ao solo e misturados durante um minuto, enquanto a lã foi adicionada gradualmente. Em seguida, foi misturada por mais 15 segundos. Posteriormente, foi adicionada a areia e o restante da água gradualmente durante 30 segundos. Finalmente, a mistura foi misturada por mais 1 minuto e 15 segundos. Todo o processo ocorreu com a misturadora no modo lento (140 rpm), com capacidade de 5 litros, e esse procedimento foi adotado porque se mostrou mais eficiente para garantir uma mistura homogênea, conforme Figura 3.9 A, e reduzir a ocorrência de interrupções durante o processo de mistura.

Essas interrupções ocorriam frequentemente devido à tendência das fibras se aglomerarem (Figura 3.9 B), o que travava a pá da misturadora. Assim, em diversas situações, o processo de mistura foi interrompido, sendo necessário desaglomerar manualmente as fibras para prosseguir a mistura e garantir sua homogeneidade.

Após a etapa de mistura, deu-se início à fase de moldagem. Foram utilizados moldes de PVC com dimensões de abertura de 100 mm x 100 mm (para o ensaio de reação ao fogo) e moldes metálicos com dimensões de abertura de 150 mm x 150 mm (para o ensaio das propriedades térmicas). Previamente, eles foram revestidos com óleo de desmoldagem para facilitar a remoção do material. Como a altura dos moldes disponíveis era maior do que a desejada para as amostras, uma régua foi usada para marcar a altura pretendida

de 2 cm. A mistura foi colocada em duas camadas, cada uma com trinta batidas usando um pilão. Foram moldados quatro provetes para cada composição nos moldes de PVC e um provete para cada composição no molde metálico.



Figura 3.8: Misturadora utilizada.

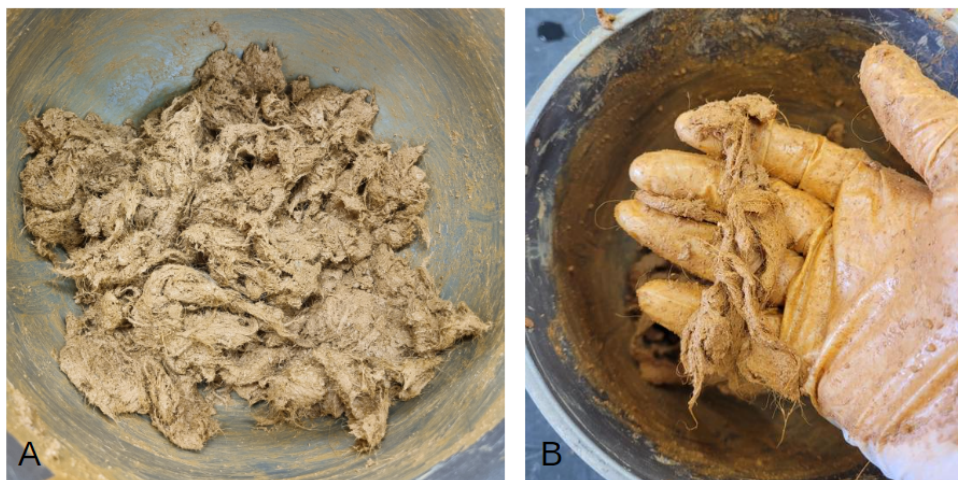


Figura 3.9: a) Mistura final com aspecto homogêneo. b) Aglomeração das fibras durante a mistura.

Após a moldagem, os moldes de PVC foram transferidos para uma câmara úmida com temperatura média de 20 °C e umidade de 100%, onde as amostras sem ligante permaneceram por cinco dias e as com ligante permaneceram por dez dias. Em seguida, as amostras foram removidas dos moldes e deixadas para secar em temperatura ambiente de laboratório por mais cinco dias. A retração das amostras permitiu a remoção dos moldes por gravidade. Posteriormente, as amostras foram mantidas em temperatura ambiente do laboratório por pelo menos 28 dias. Já as amostras em moldes metálicos foram mantidas protegidas do vento no ambiente do laboratório pelo mesmo período de tempo. A Figura 3.10 ilustra o aspecto final da amostra de cada composição da família S30A70 após os 28 dias.

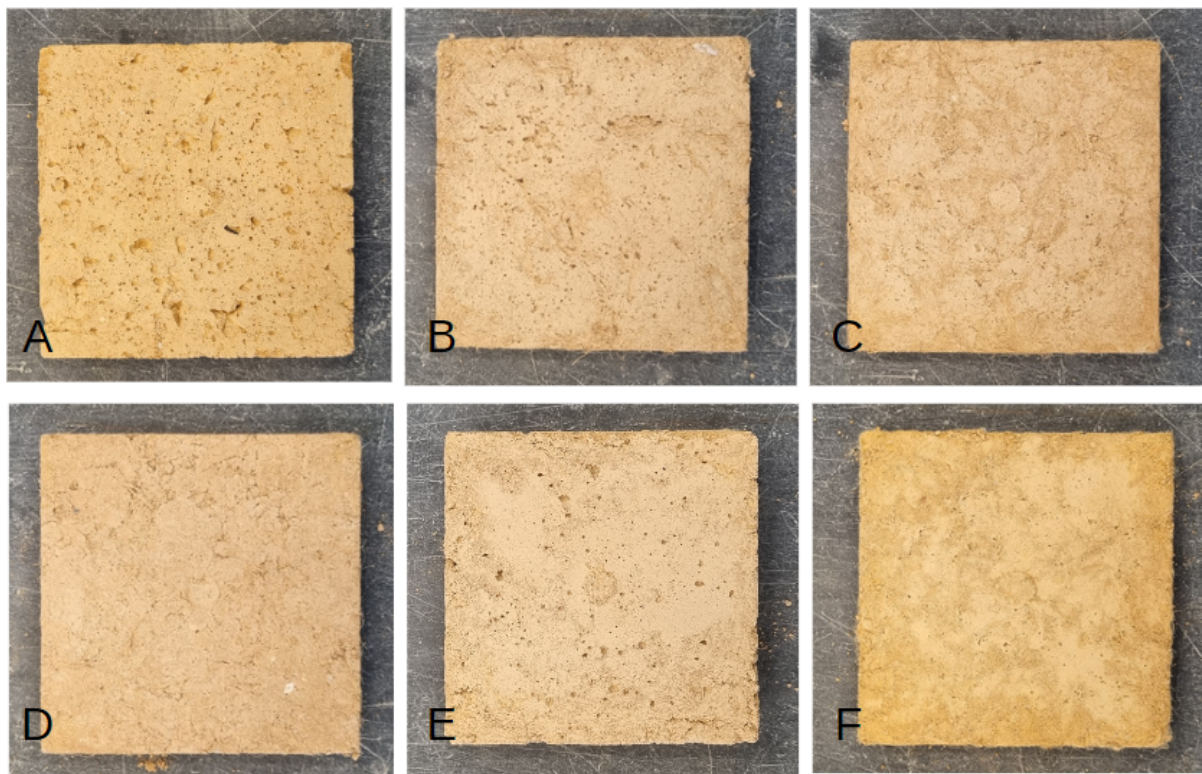


Figura 3.10: Aspecto final das amostras, onde: A) S30A70. B) S30A70F15_4. C) S30A70F30_4. D) S30A70F45_4. E) S30A70L10. F) S30A70L10F45_4.

Após análise visual das amostras, foi possível observar que as amostras contendo cal hidráulica apresentaram uma tonalidade mais clara em comparação com as amostras sem adição de cal hidráulica. Já em relação à superfície, as amostras com adição de lã de

ovelha apresentaram um toque mais aveludado e uma menor presença de espaços vazios, o que pode ser explicado pela capacidade de preenchimento das fibras de lã.

3.4 Procedimento de ensaio

3.4.1 Placa quente protegida

Para a realização dos testes de condutividade térmica, utilizou-se o placa quente protegida λ -Meter EP500e, que segue as normas internacionais ISO 8302 [98], DIN EN 1946-2 [99], DIN EN 12667 [100] e ASTM C177 [101]. Esse equipamento mede a espessura da amostra (d), a diferença de temperatura (ΔT) sobre a amostra e o fluxo de calor (\dot{Q}) que é equivalente à potência elétrica do aquecimento de medição ($P = U \cdot I$). Em síntese, uma diferença de temperatura é aplicada entre a placa quente e as placas de guarda, criando um gradiente de temperatura através da amostra. A potência fornecida à placa quente é controlada de forma a manter uma diferença de temperatura constante ao longo do teste. Sensores de temperatura em diferentes pontos do sistema medem as temperaturas nas placas quente e de guarda, bem como na amostra. A condutividade térmica é calculada com base na área de medição (A) e a condução térmica unidimensional, como indicado na Equação 3.1 [102].

$$\lambda = \frac{\dot{Q} \cdot d}{\Delta T \cdot A} = \frac{U \cdot I \cdot d}{\Delta T \cdot A} \quad (3.1)$$

Os módulos Peltier de alto desempenho refrigerados a ar são os responsáveis por levar a temperatura das placas do sensor a qualquer temperatura entre -15 °C e 65 °C, desse modo é possível medir a condutividade térmica dentro da faixa de temperatura de -10 °C e 50 °C a uma diferença de temperatura das placas do sensor de 5 a 15 K [102].

A Figura 3.11 ilustra a parte frontal do equipamento de teste utilizado. A amostra é colocada entre o sensor superior (Upper sensor plate) e o inferior (Lower sensor plate). De acordo com o fabricante, a dimensão preferencial da amostra é de 500 x 500 mm², mas o equipamento também pode ser utilizado para dimensões menores, como 250 x 250

mm², 200 x 200 mm² e 150 x 150 mm². Além disso, o equipamento é capaz de medir amostras com até 200 mm de espessura. Qualquer sólidos pode ser ensaiado desde que possua condutividade térmica (λ) entre 0,003 e 2 W/mK O equipamento é integrado a um computador que recebe os dados para a execução das medições e recolhe os resultados [102].

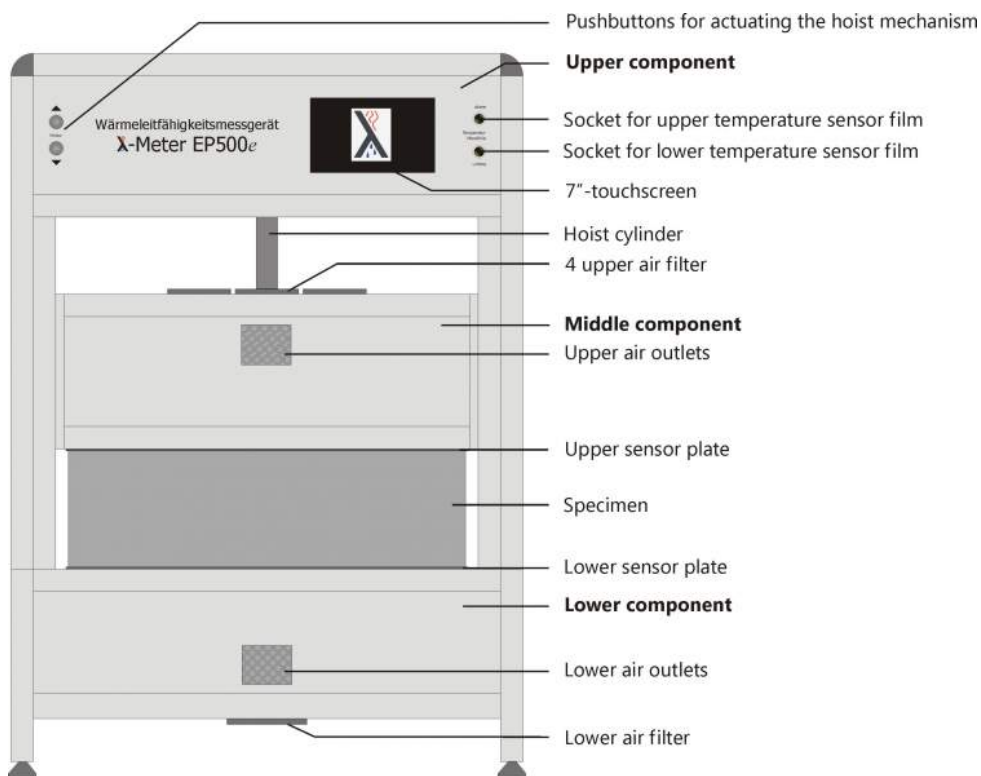


Figura 3.11: Placa quente protegida λ -Meter EP500e [102].

Procedimento

O procedimento e execução do teste seguiu o manual de instruções do fabricante do equipamento. Para iniciar o processo, foi necessário definir a coordenada vertical zero do equipamento com o suporte da amostra fora dele. Em seguida, a amostra seca foi colocada no centro do equipamento, juntamente com um suporte ligeiramente mais espesso que a amostra (Figura 3.12), existem várias espessuras de suporte que podem ser combinadas para atingir esse objetivo, isso é importante para garantir a aplicação

correta da pressão entre as partes superior e inferior da amostra. Então, a placa sensora superior foi abaixada gradualmente até que a pressão especificada de 1000 Pa fosse alcançada, essa pressão promove um bom contato térmico entre os conjuntos de superfície quente e fria e a amostra, como a ASTM C177 [101] estabelece. Durante esse processo, o equipamento mede a espessura da amostra, em acordo com a norma DIN EN 823 [103].



Figura 3.12: Amostra com suporte no λ -Meter EP500e.

Em seguida, foram definidos os parâmetros na interface do *software* computacional (Figura 3.13), incluindo a dimensão e massa da amostra, número de temperaturas de teste, temperatura de cada teste, diferença de temperatura entre as placas sensoras e o critério de parada, que é atingido quando a variação da condutividade térmica (λ) for menor que um determinado percentual após um período de tempo definido. As amostras utilizadas tinham dimensões de 150 mm x 150 mm. O teste foi realizado em três

temperaturas distintas, com uma diferença de 15 K entre as placas sensoras. A ISO 8302 [98], DIN EN 1946-2 [99], DIN EN 12667 [100] e a ASTM C177 [101], não especificam a temperatura de teste para medições de condutividade térmica, logo foram escolhidas temperaturas para fornecer uma compreensão das propriedades em diferentes condições térmicas. A temperatura intermediária de 25 °C foi selecionada por ser próxima à temperatura ambiente, proporcionando uma referência significativa para comparação. A temperatura de 50 °C foi escolhida como o valor máximo permitido pelo equipamento, permitindo uma análise do comportamento em condições de calor mais intenso. E a temperatura de 10 °C foi selecionada como uma opção mais baixa para avaliar o desempenho em temperaturas mais frias. O critério de parada do teste foi estabelecido como uma variação percentual da condutividade térmica (λ) menor que 1% durante um período de 360 minutos. Ao atingir uma variação abaixo de 1%, considerou-se que a condutividade térmica havia atingido um estado estável e o teste foi encerrado. Com esses parâmetros devidamente inseridos, o teste foi iniciado.

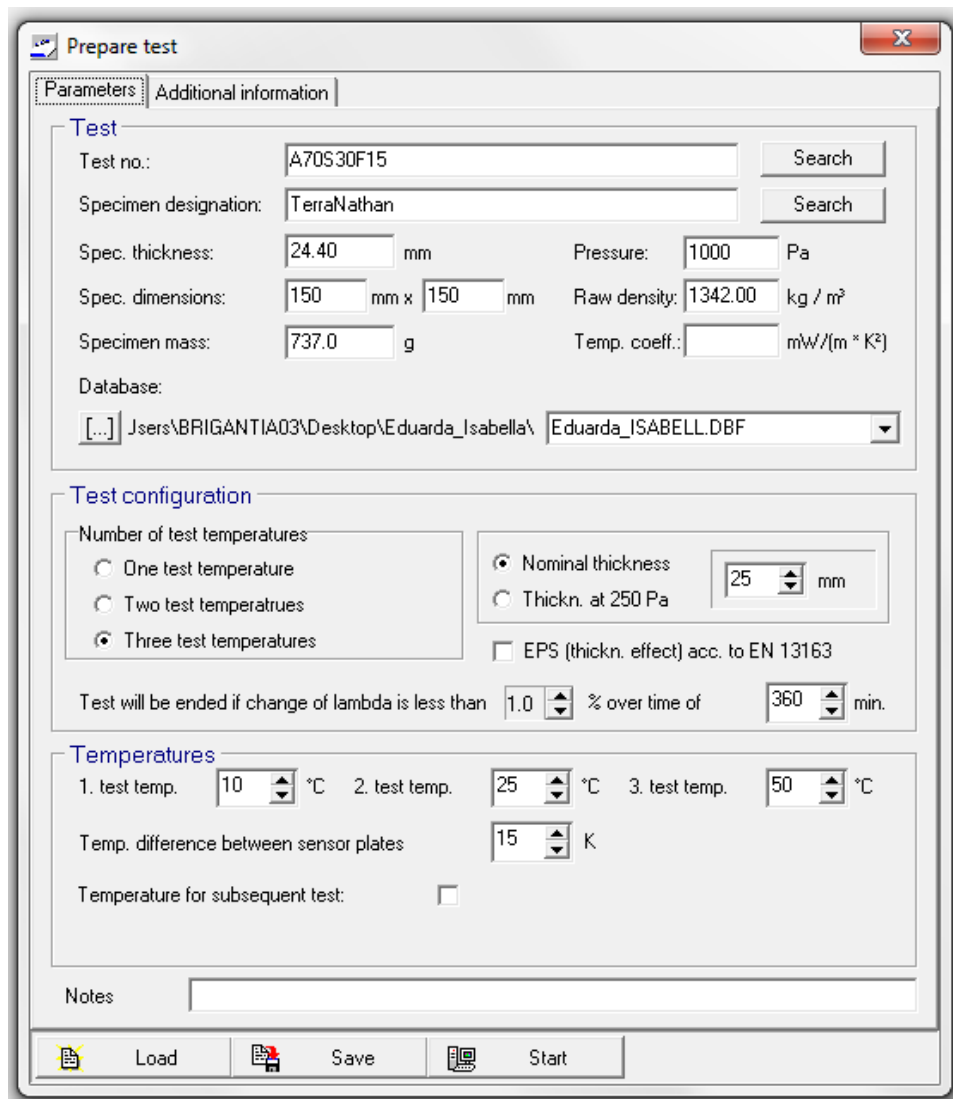


Figura 3.13: Interface para preparação do teste no *software* computacional do λ -Meter EP500e.

Execução do ensaio

Os testes foram realizados nas amostras com dimensões de 150 mm x 150 mm, sendo testada uma amostra de cada composição. As amostras foram previamente secas em estufa a 40 °C até atingirem peso constante. A espessura foi medida pelo equipamento, e os dados das amostras testadas estão apresentados na Tabela 3.5.

Tabela 3.5: Amostras testadas na placa quente protegida

Amostra	Massa (g)	Espessura (cm)	Massa volúmica (kg/m³)
S30A70	892,0	2,21	1794
S30A70L10	890,3	2,27	1743
S30A70F15_4	733,5	2,21	1475
S30A70F30_4	673,0	2,12	1411
S30A70F45_4	710,8	2,29	1380
S30A70L10F45_4	737,7	2,4	1366
S40A60	750,0	2,01	1658
S40A60F15_4	776,5	2,28	1514
S40A60F45_4	690,3	2,15	1427
S40A60L10	750,4	2,05	1627
S40A60L10F15_4	721,0	2,22	1443
S40A60L10F15_2	759,6	2,31	1461
S40A60L10F45_4	667,0	2,32	1278

O teste de condutividade térmica foi conduzido nas três temperaturas descritas anteriormente: 10 °C, 25 °C e 50 °C. O teste de cada amostras para as três temperaturas levou cerca de 23 horas para ser concluído, até que o critério de parada para cada temperatura fosse atingido.

3.4.2 Calorímetro de perda de massa

O calorímetro de perda de massa funciona por meio da exposição da amostra, na direção horizontal, a um fluxo de calor radiativo controlado, gerado por um aquecedor elétrico cônico [104]. O padrão internacional ISO 13927 descreve um método de ensaio para determinar a taxa de liberação de calor utilizando um aquecedor radiante cônico e um detector de termopilha [105].

Durante a exposição, é possível observar visualmente o comportamento de queima

e reação da amostra, bem como quantificar a massa total perdida (TML), através da pesagem da amostra antes e depois do teste, e a taxa média de perda de massa (MMPR), expressa em gramas por segundo, entre dois tempos, conforme Equação 3.2, onde m_2 é a massa final da amostra após o teste, m_1 é a massa inicial da amostra e t é o tempo total do teste.

$$MMPR = \frac{m_2 - m_1}{t} \quad (3.2)$$

A taxa de liberação de calor por unidade de área, HRR [kW/m²], é uma função que relaciona a quantidade de calor liberada por unidade de área em função do tempo decorrido, e é obtida por meio da comparação e conversão da saída em mV da termopilha (TP_1) com a saída inicial da termopilha (TP_0), definida como a média da saída da termopilha durante os 60 segundos de dados de referência, e dividindo pela área da superfície exposta da amostra (A), conforme a Equação 3.3 [104].

$$HRR_i = m \times \frac{TP_i + TP_0}{A} \quad (3.3)$$

Já a taxa de liberação total de calor, THR [MJ/m²] e THR de pico [MJ/m²], são determinados pela acumulação dos valores de HRR ao longo do tempo, conforme a Equação 3.4, onde i é número da iteração, sendo $THR_0 = 0$. O THR de pico corresponde ao valor máximo do THR [104].

$$THR_i = THR_{i-1} + \frac{HRR_i + HRR_{i-1}}{2} \quad (3.4)$$

Além disso, o calorímetro de perda de massa pode ser utilizado para monitorar e medir a velocidade de reações químicas que liberam calor (exotérmicas) ou que absorvem calor (endotérmicas), permitindo a obtenção de informações sobre as propriedades termodinâmicas e reativas dos materiais.

O calorímetro de perda de massa utilizado para realizar as medições foi o disponibilizado pelo Instituto Politécnico de Bragança, foi construído de acordo com as

especificações da norma ISO 13927 [105] e está conectado a um computador que conta com o *software* MLCCalc, utilizado para realizar as calibrações, os testes e analisar e gerir os resultados. A Figura 3.14 apresenta os componentes essenciais do calorímetro utilizado. A termopilha permite a quantificação do HRR. A temperatura do aquecedor é controlada pelo controlador de temperatura, que utiliza as leituras dos termopares de aquecimento para manter a temperatura desejada. O ignitor é responsável por provocar a ignição da amostra. A célula de carga é utilizada para controlar e medir a perda de massa durante o teste. A amostra é mantida no porta-amostras, que a posiciona adequadamente para o teste. Os obturadores são utilizados para proteger a amostra de exposições indesejadas ao fluxo de calor, sendo abertos ou fechados conforme necessário por meio do controlador dos obturadores. A unidade de controle engloba o controlador da célula de carga e da temperatura.

Procedimento

Antes de se iniciar os ensaios no calorímetro é necessário seguir uma rotina de calibrações para garantir a confiabilidade dos resultados obtidos nos testes.

Primeiramente procede-se a calibração da célula de carga, responsável por quantificar a taxa de perda de massa. A norma ISO 5660-1 [106] define que esta deve ter uma precisão de 0,1 g e estar devidamente calibrada.

Após a etapa anterior, é necessário realizar a calibração do fluxo de calor. De acordo com a norma ISO 5660-1 [106], recomenda-se a realização de ensaios com valores de 25 kW/m², 35 kW/m² e 50 kW/m². Optou-se por utilizar o fluxo de calor de 50 kW/m², uma vez que esse representa um cenário mais agressivo. A calibração é realizada por meio do posicionamento de um medidor de fluxo de calor a uma distância de 25 mm da base do cone. A temperatura é ajustada por meio do painel eletrônico de controle até que o fluxo de calor pretendido seja identificado pelo medidor.

Por fim, é realizada a calibração da termopilha, a fim de garantir uma medição precisa da taxa de liberação de calor. Esse processo é realizado para diferentes valores de liberação de calor, baseados no calor líquido de combustão do metano em diferentes taxas de fluxo.

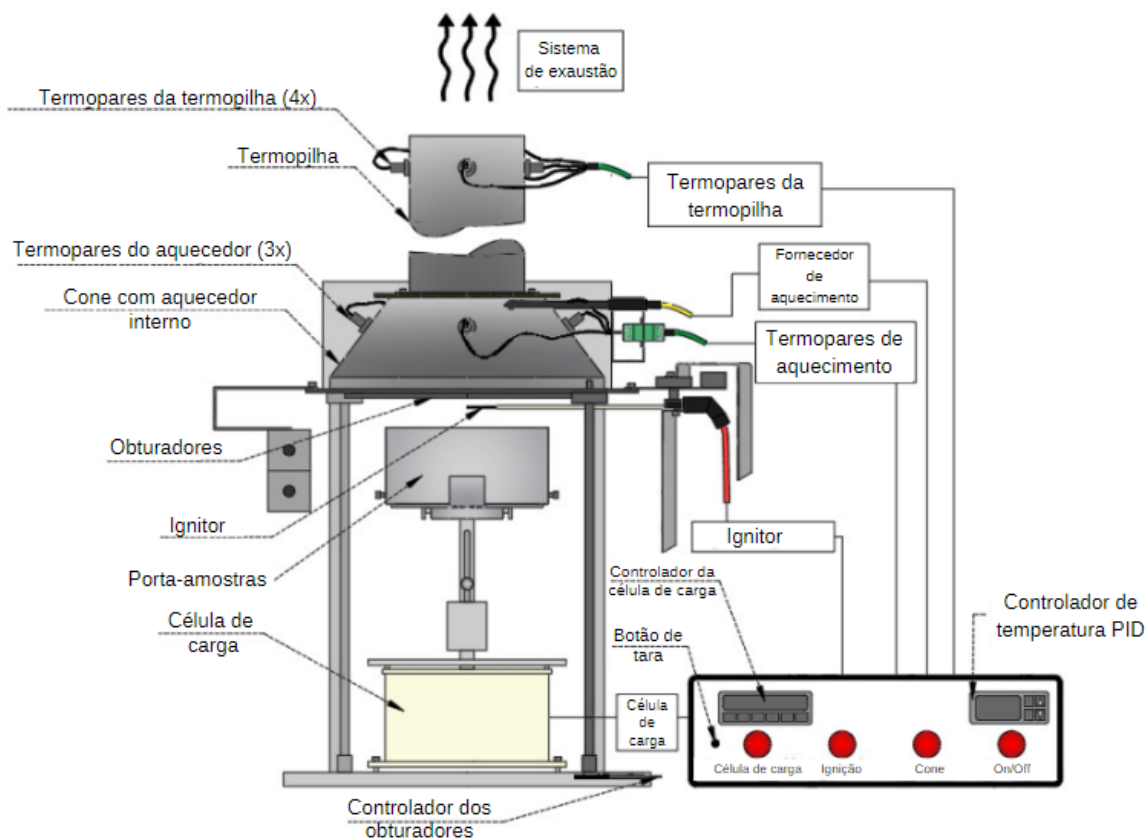


Figura 3.14: Componentes do calorímetro de perda de massa com termopar e unidade de controle. Adaptado de [104].

Para cada um desses valores de liberação de calor, é obtida uma leitura em mV, que é comparada com um valor de linha de base.

Execução do ensaio

Após realizar todas as calibrações necessárias, é realizada a preparação da amostra. De acordo com a norma ISO 5660-1 [106], os provetes devem ter dimensão quadrada de $100 \pm 0,2$ mm, sendo que apenas um quadrado de $95 \pm 0,2$ mm na superfície é exposto, enquanto as outras faces são envolvidas em papel alumínio com o lado brilhante voltado para a superfície da amostra. Todas as amostras foram previamente secas em estufa a 60 °C, até atingir peso constante e são pesadas antes e depois da colocação do papel alumínio.

Após a preparação com papel alumínio, as amostras são colocadas no porta-amostras, que possui uma camada de lã cerâmica no fundo para possibilitar um ajuste correto, conforme Figura 3.15. O porta-amostras é posicionado abaixo da base do cone a uma distância de 25 mm. Em seguida, na interface do *software* MLCCalc, são inseridos os dados da amostra e definidos os parâmetros do teste, foi definido um fluxo de calor de 50 kW/m^2 e um intervalo de tempo de 1 segundo entre cada iteração. O teste é iniciado e, no começo, o ignitor é acionado para verificar a ocorrência de ignição. Cada teste foi conduzido por 60 minutos. Esse tempo foi adotado pois representou uma variação menor que 0,5% na massa ao longo de 10 minutos em ensaios preliminares.



Figura 3.15: Amostra posicionada no porta-amostras.

Capítulo 4

Resultados

4.1 Resultados na placa quente protegida

Os ensaios realizados na placa quente protegida λ -Meter EP500e proporcionaram a obtenção de informações importantes sobre a condutividade térmica (λ) de cada amostra a diferentes temperaturas. Esses resultados permitiram compreender a influência de diferentes variáveis, como a quantidade e comprimento da fibra de lã, a presença de cal hidráulica e as proporções distintas de solo e areia, sobre essas propriedades.

Na Tabela 4.1, é apresentado uma síntese dos resultados obtidos, os quais serão discutidos detalhadamente nesta seção. Essa tabela reúne as informações essenciais, oferecendo uma visão geral dos dados obtidos durante os ensaios. Além disso, a Figura 4.1 ilustra de forma clara o comportamento do aumento da condutividade térmica (λ) das amostras em relação ao aumento da temperatura durante o teste. Esse fenômeno pode ser atribuído ao aumento da agitação térmica das partículas ou moléculas constituintes do material. À medida que a temperatura aumenta, a energia cinética das partículas ou moléculas aumenta, resultando em uma transferência de calor mais eficiente. Esse aumento na agitação térmica promove uma maior taxa de colisões entre as partículas, o que, por sua vez, resulta em uma condutividade térmica mais elevada.

Tabela 4.1: Condutividade térmica (λ) das amostras ensaiadas (redução do λ entre parenteses)

Amostra	Massa volúmica (kg/m ³)	λ a 10 °C (W/mk)	λ a 25 °C (W/mk)	λ a 50 °C (W/mk)
S30A70	1794	0,270 (-)	0,294 (-)	0,356 (-)
S30A70L10	1743	0,222 (17,6%)	0,241 (18,0%)	0,272 (23,6%)
S30A70F15_4	1475	0,224 (16,9%)	0,244 (17,0%)	0,274 (23,1%)
S30A70F30_4	1411	0,229 (15,3%)	0,249 (15,5%)	0,293 (17,7%)
S30A70F45_4	1380	0,232 (14,0%)	0,255 (13,2%)	0,299 (15,8%)
S30A70L10F45_4	1366	0,197 (27,1%)	0,216 (26,7%)	0,238 (33,1%)
S40A60	1658	0,243 (10,0%)	0,270 (8,2%)	0,313 (12,0%)
S40A60F15_4	1514	0,238 (12,0%)	0,260 (11,8%)	0,2974 (16,4%)
S40A60F45_4	1427	0,226 (16,2%)	0,245 (16,9%)	0,282 (20,8%)
S40A60L10	1627	0,232 (13,9%)	0,256 (12,9%)	0,294 (17,3%)
S40A60L10F15_4	1443	0,229 (15,1%)	0,251 (14,8%)	0,283 (20,4%)
S40A60L10F15_2	1461	0,199 (26,4%)	0,214 (27,3%)	0,239 (32,7%)
S40A60L10F45_4	1278	0,195 (27,9%)	0,212 (28,0%)	0,243 (31,7%)

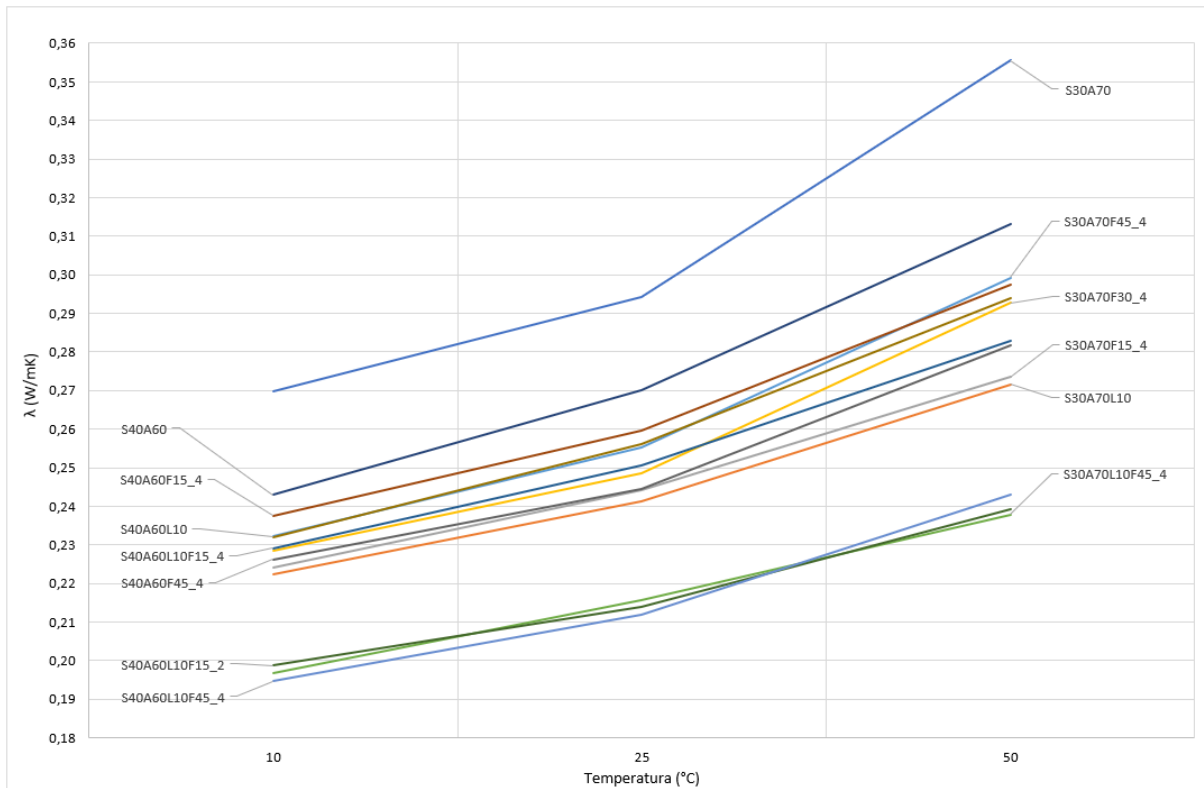


Figura 4.1: Condutividade térmica (λ) das amostras nas diferentes temperaturas de teste

Na Figura 4.2, podemos observar uma comparação dos resultados de condutividade térmica na família S30A70 para as três temperaturas ensaiadas conforme a adição de fibras de lã de ovelha, onde fica evidente uma redução na condutividade térmica nas amostras que contêm adição de fibra em relação às amostras sem adição, isso pode ser justificado pela menor condutividade térmica da lã de ovelha e a criação de uma estrutura mais complexa devido a sua adição que dificultam a transferência de calor. Esse comportamento é observado tanto nas amostras com cal hidráulica quanto nas amostras sem adição.

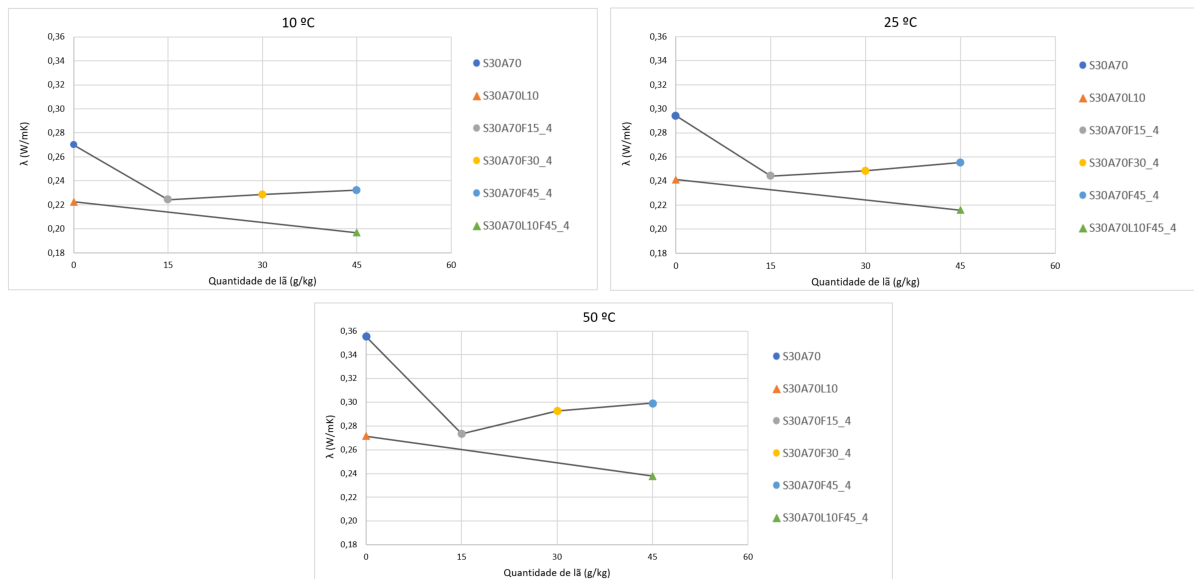


Figura 4.2: Condutividade térmica (λ) das amostras S30A70 conforme quantidade de lã

É importante destacar também o comportamento crescente na condutividade térmica das amostras S30A70F15_4, S30A70F30_4 e S30A70F45_4, indicando um aumento ligeiro na condutividade térmica à medida que a quantidade de fibras aumenta. Esse comportamento contrasta com o que normalmente é observado na literatura, e pode ser atribuído à natureza heterogênea das amostras estudadas. Afinal, a heterogeneidade estrutural causada pela aglomeração das fibras de lã pode ter resultado na presença de interfaces, porosidade, inclusões ou descontinuidades, afetando a transferência de calor. Além disso, é importante mencionar que as pequenas variações na espessura das amostras também podem ter contribuído para esse efeito.

Uma análise mais detalhada da variação da condutividade térmica (λ) em função da adição de fibras também foi realizada para as amostras da família S40A60. A Figura 4.3 ilustra o comportamento observado. Verificou-se que a incorporação de lã de ovelha também resultou em uma diminuição da condutividade térmica, causado pelo aumento da lã. Além disso, foi observado um comportamento decrescente da condutividade térmica com o aumento da quantidade de lã nas amostras S40A60F15_4 e S40A60F45_4, indo de acordo com a literatura.

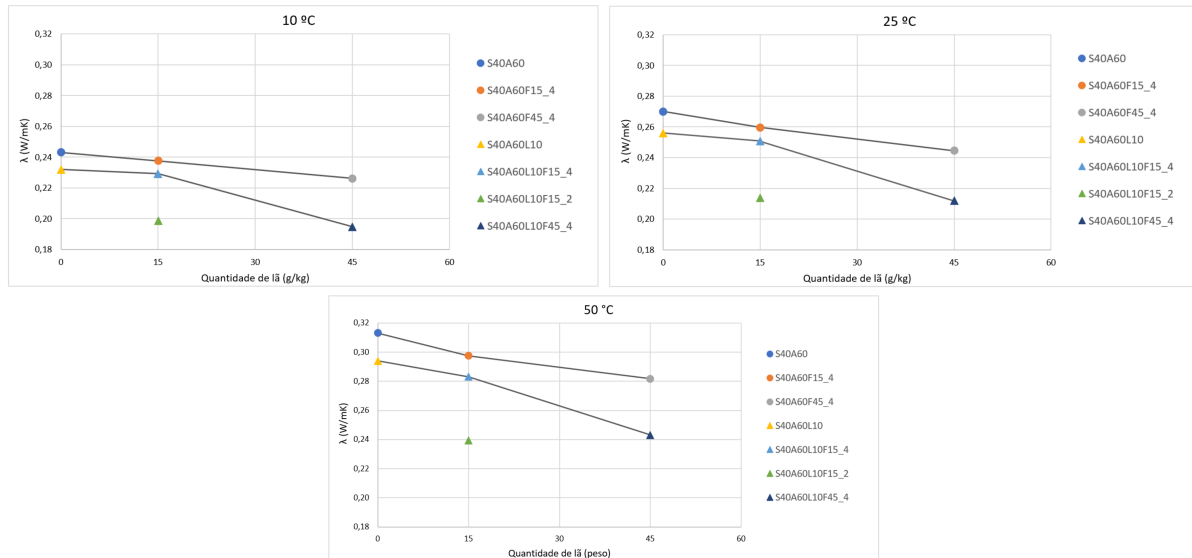


Figura 4.3: Condutividade térmica (λ) das amostras S40A60 conforme quantidade de lã

Como observado de relance na Figura 4.2 e 4.3, a presença da cal hidráulica resultou em grandes diminuições na condutividade térmica para as três temperaturas ensaiadas. Esse comportamento pode ser melhor observado na Figura 4.4.

Com base nos resultados obtidos, pode-se concluir que a adição de cal hidráulica em todas as amostras resultou em uma redução da condutividade térmica (λ), o que está em concordância com o afirmado por Liuzzi [31]. Essa redução pode ser atribuída à formação de compostos cimentantes que melhoram as propriedades físicas do solo, à formação de uma estrutura mais porosa e também à menor condutividade térmica da cal hidráulica. É interessante observar que as maiores reduções foram observados nos testes realizados

a 50 °C, indicando que a cal apresentou um desempenho significativo na redução da condutividade térmica em temperaturas mais elevadas. A redução gerada pela adição de cal hidráulica pode ser observado na Tabela 4.2, chegando a 23,63% para a amostra S30A70L10 em relação a amostra S30A70.

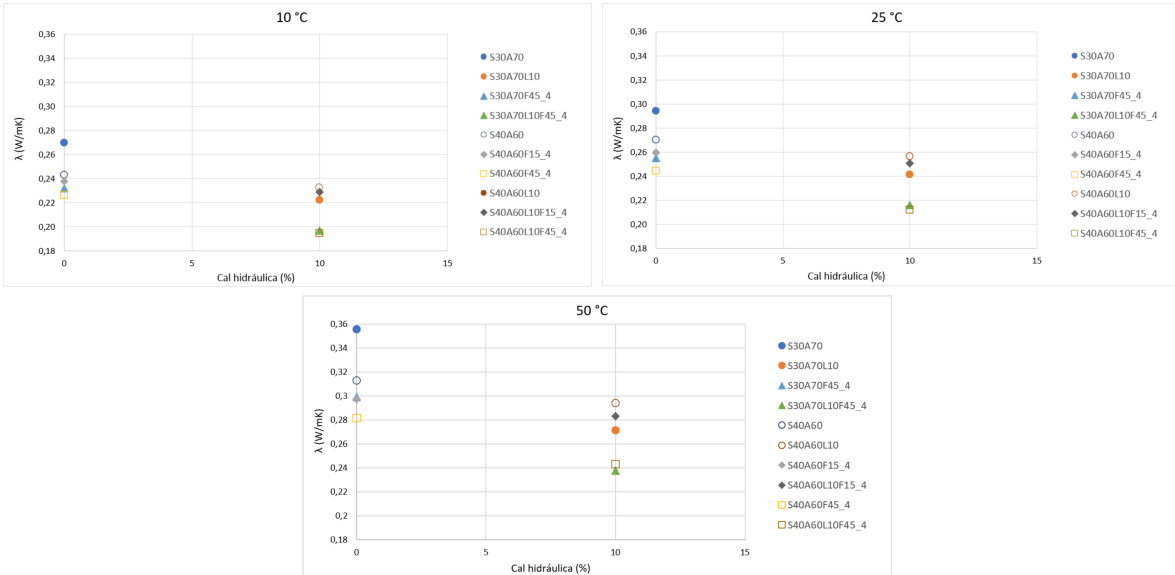


Figura 4.4: Influência da adição de cal hidráulica na condutividade térmica (λ)

Tabela 4.2: Redução na condutividade térmica (λ) conforme a presença de cal (redução entre parenteses)

Amostra	λ a 10 °C (W/mK)	λ a 25 °C (W/mK)	λ a 50 °C (W/mK)
S30A70	0,270 (-)	0,294 (-)	0,356 (-)
S30A70L10	0,222 (17,59%)	0,241 (18,02%)	0,272 (23,63%)
S30A70F45_4	0,232 (-)	0,255 (-)	0,299 (-)
S30A70L10F45_4	0,197 (15,23%)	0,216 (15,46%)	0,238 (20,54%)
S40A60	0,243 (-)	0,270 (-)	0,313 (-)
S40A60L10	0,232 (4,36%)	0,256 (5,07%)	0,294 (6,07%)
S40A60F15_4	0,229 (-)	0,251 (-)	0,283 (-)
S40A60L10F15_4	0,229 (3,58%)	0,251 (3,43%)	0,283 (4,84%)
S40A60F45_4	0,226 (-)	0,245 (-)	0,282 (-)
S40A60L10F45_4	0,195 (13,96%)	0,212 (13,34%)	0,243 (13,72%)

Outro fator analisado em relação à adição de lã foi o comprimento das fibras. Ao comparar a amostra S40A60L10F15_4 com a amostra S40A60L10F15_2, é possível observar a influência desse fator (Figura 4.5). Verifica-se uma diminuição na condutividade térmica (λ) à medida que o comprimento da fibra é reduzido. Fiore [107], ao analisar a adição de fibras de lã em argamassas cimentícias, também investigou o efeito do comprimento das fibras e concluiu que as fibras interagem entre si, formando uma rede semelhante a um tapete, que apresenta propriedades térmicas inferiores a uma camada compacta composta por fibras mais curtas [107]. Portanto, as fibras de 2 cm podem ter contribuído para a formação de uma camada mais compacta, melhorando as propriedades térmicas da mistura.

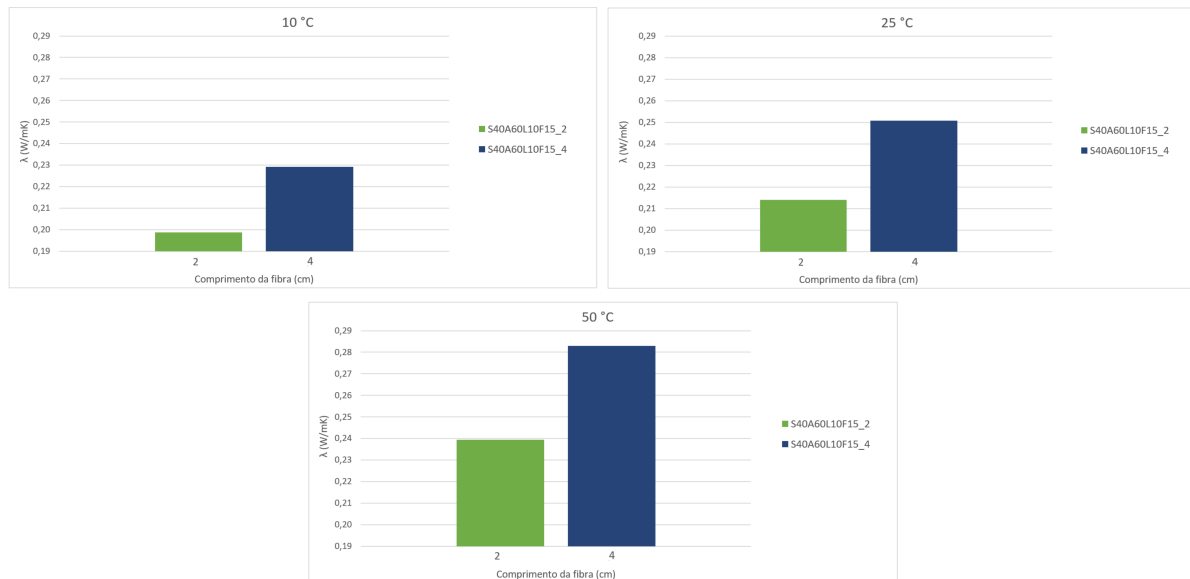


Figura 4.5: Influência do tamanho da fibra na condutividade térmica (λ)

Ao analisar a relação entre a condutividade térmica e a densidade de cada amostra, é possível observar, na Figura 4.6, uma tendência geral de aumento da condutividade térmica (λ) à medida que a densidade aumenta. No entanto, é importante destacar que essa relação não é uma regra absoluta que se aplica a todas as amostras, uma vez que cada uma delas possui composições diferentes que influenciam diretamente na condutividade térmica.

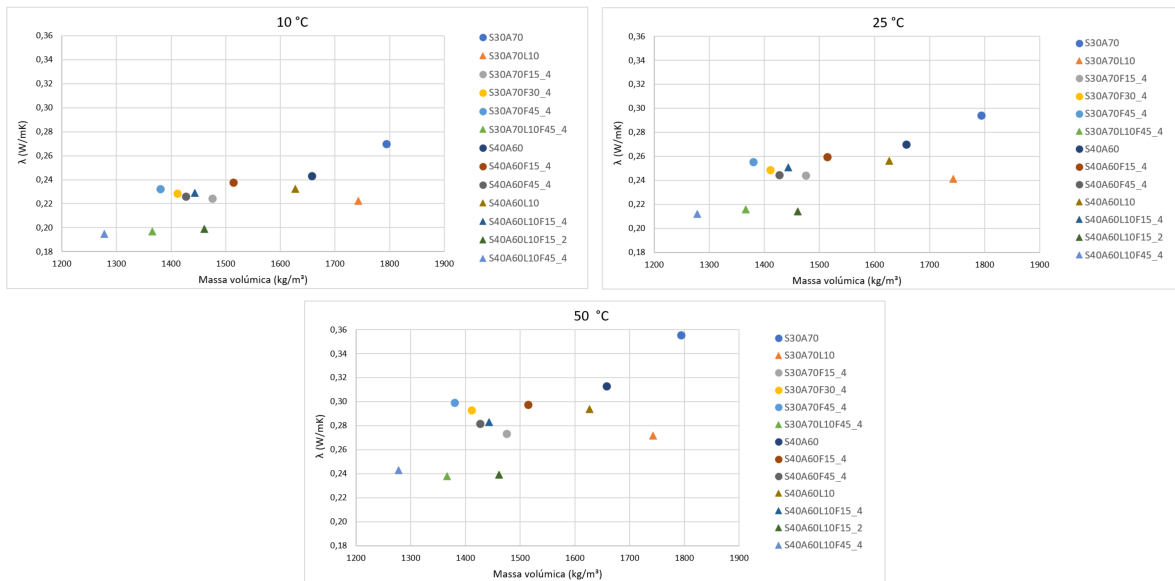


Figura 4.6: Influência da massa volúmica na condutividade térmica (λ)

Para entendermos melhor a influência de cada componente, foi realizado uma análise de correlação de Spearman (Figura 4.7). A correlação de Spearman é uma medida estatística que avalia a relação entre duas variáveis ordinais. Ela varia de -1 a 1, onde -1 indica uma correlação negativa perfeita, 1 indica uma correlação positiva perfeita e 0 indica ausência de correlação.



Figura 4.7: Correlação de Spearman entre os componentes e a condutividade térmica

A análise de correlação de Spearman avaliou a relação entre os componentes e a condutividade térmica. Observou-se que, de maneira geral, um aumento na quantidade de solo resultou em um aumento na condutividade térmica, embora essa correlação tenha sido muito baixa (correlação de apenas 0,08). Por outro lado, a adição de fibras mostrou ter um efeito oposto, reduzindo a condutividade térmica. Essa redução foi mais significativa à medida que a temperatura de teste aumentava, com uma correlação de -0,54 para a temperatura de 10 °C e -0,42 para a temperatura de 50 °C.

Além disso, verificou-se que a presença de cal hidráulica teve uma influência mais pronunciada na condutividade térmica das amostras do que a adição de lã. A correlação entre a presença de cal hidráulica e a condutividade térmica foi de -0,66 para a temperatura de 50 °C, indicando uma relação negativa significativa, ou seja, conforme a quantidade de fibra e ligante aumenta, a condutividade térmica diminui.

Por fim, na Tabela 4.3 é apresentada uma comparação da condutividade térmica (temperatura ambiente) entre alguns materiais de revestimentos, incluindo a placa de gesso (18 mm) da empresa Gyptec [54], a placa de argila (Clayboard Heavy (LEMIX)) da empresa Claytec [52], a placa de fibras de madeira (Wood fibre board FiberTherm) da empresa BetonWood [108], bem como outros materiais comumente utilizados em isolamentos térmicos, juntamente com a S40A60L10F45_4.

Tabela 4.3: Comparação da condutividade térmica (λ) da amostra S40A60L10F45_4 com outros materiais

Material	Massa volúmica (kg/m³)	Condutividade térmica (W/mk)	Referência
S40A60L10F45_4	1278	0,212	-
Clayboard Heavy (LEMIX)	1450	0,353	[52]
Placa de gesso	722	0,115	[54]
Placa de fibras de madeira	160	0,038	[108]
Lã de rocha	20-200	0,035 - 0,045	[9]
EPS	15-30	0,035 - 0,040	[9]
XPS	25-45	0,030 - 0,040	[9]
Espuma rígida de poliuretano	30-100	0,024 - 0,030	[9]
Placa de cortiça	100 - 220	0,045 - 0,060	[9]

Através dessa tabela, observa-se que a amostra S40A60L10F45_4 apresentou valores

de condutividade térmica inferiores à placa Clayboard Heavy (LEMIX) comercializada pela empresa Claytex, além de ter uma densidade menor. Em comparação com os outros materiais de revestimento, a amostra S40A60L10F45_4 possui uma densidade maior e uma condutividade térmica mais elevada, não sendo competitiva com esses materiais em termos desses fatores.

4.2 Resultados no calorímetro de perda de massa

Os ensaios realizados no calorímetro de perda de massa foram importantes para avaliar massa total perdida (TML), a taxa média de perda de massa (MMPR) e a taxa de liberação de calor por unidade de área (HRR). Além disso, a análise visual da flamabilidade, do tempo de fumaça e da integridade das amostras permitiu uma avaliação mais completa dos resultados.

É importante destacar que nem todas as amostras da família S30A70 puderam ser ensaiadas. Na Tabela 4.4, estão listadas as amostras que foram ensaiadas, juntamente com uma síntese dos resultados obtidos referentes à perda de massa.

Tabela 4.4: Resultados da perda de massa de amostras de diferentes composições

Amostra	Massa volúmica (kg/m ³)	Espessura (cm)	Massa inicial (g)	Massa final (g)	TML (g)	TML (%)	MMPR (g/s)
S30A70 (A)	1738	1,98	344,22	332,59	11,62	3,38	-0,0032
S30A70 (B)	1781	2,10	373,96	363,14	10,82	2,89	-0,0030
S30A70 (C)	1745	2,15	375,08	362,05	13,03	3,47	-0,0034
S30A70L10 (A)	1685	2,07	348,84	339,73	9,12	2,61	-0,0025
S30A70L10 (B)	1679	2,08	349,14	336,11	13,02	3,73	-0,0036
S30A70L10 (C)	1685	2,10	353,85	340,88	12,97	3,67	-0,0036
S30A70F15_4 (A)	1688	2,25	379,87	364,22	15,65	4,12	-0,0043
S30A70F15_4 (B)	1680	2,10	352,87	336,51	16,36	4,64	-0,0045
S30A70F30_4 (A)	1463	1,95	285,39	263,02	22,37	7,84	-0,0060

É possível observar que a perda de massa variou de acordo com a adição de diferentes materiais nas amostras. A mistura S30A70, sem adição de cal ou fibra, apresentou uma perda de massa em torno de 3,38% a 3,47%, enquanto as amostras com adição de cal

hidráulica (S30A70L10) tiveram uma perda de massa em torno de 2,61% a 3,67%. As amostras com adição de fibras (S30A70F15_4 e S30A70F30_4) apresentaram perda de massa variando de 4,12% a 7,84%. Esse resultado pode ser explicado pela decomposição das fibras de lã de ovelha durante o ensaio, podendo ser melhor visualizado na Figura 4.8, que apresenta a comparação da perda de massa ao longo do tempo para a média dos resultados de cada mistura ensaiada.

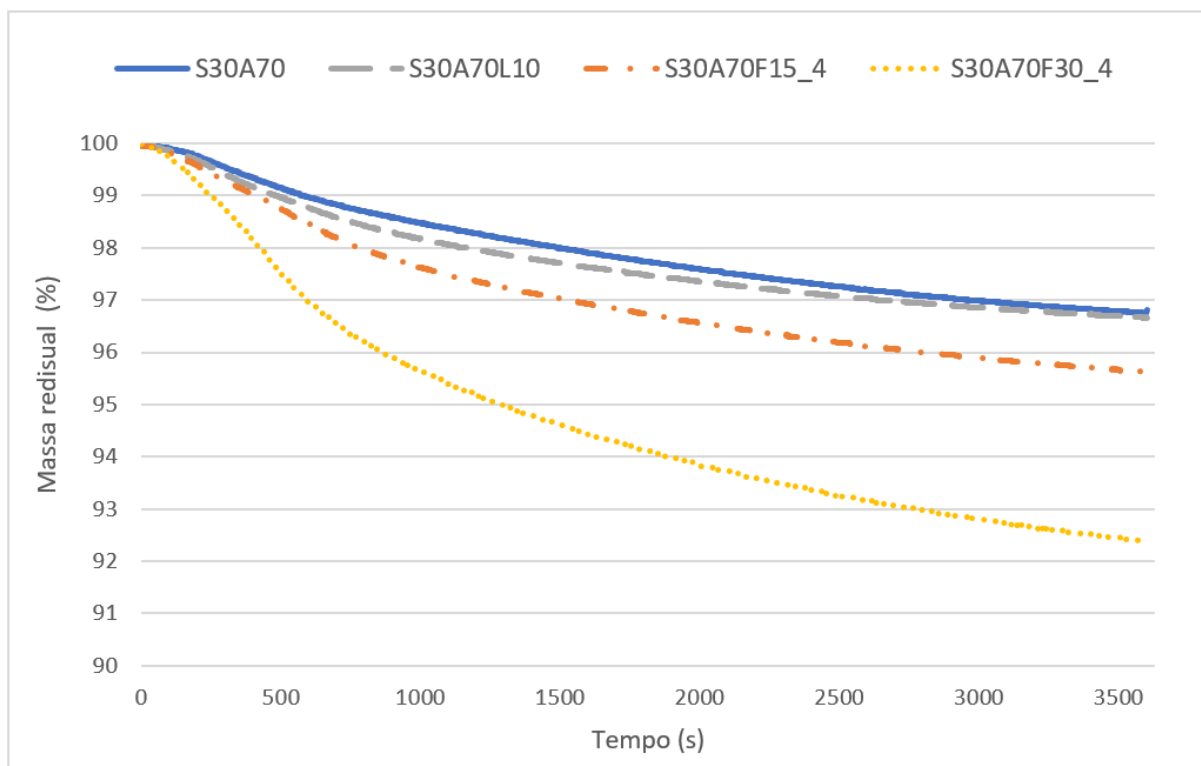


Figura 4.8: Comparação da perda de massa em função do tempo.

Observou-se uma perda de massa significativamente maior nos primeiros minutos nas amostras que continham fibras de lã de ovelha, conforme demonstrado na Figura 4.8. Sendo possível observar que a lã correspondeu a uma percentagem significativa da massa total perdida nas amostras analisadas. Por exemplo, na amostra S30A70F15_4 (A), a lã representou 32,97% da massa total perdida, enquanto na amostra S30A70F15_4 (B) correspondeu a 29,52%, e na amostra S30A70F30_44 (A), a 35,18%.

É importante ressaltar que a perda de massa restante nas amostras pode ser atribuída

a diferentes processos, como decomposição térmica, reações químicas e evaporação de água. Esses fenômenos podem ocorrer de forma simultânea ou individualmente. Para ter uma noção maior de como ocorreu a evolução da perda de massa em cada amostras, os gráficos da perda de massa para cada amostra são apresentados no Apêndice B.

Em relação à Taxa de Liberação de Calor (HRR) das amostras testadas no calorímetro de cone, é possível observar na Figura 4.9, que elas apresentaram um comportamento inicial semelhante, com HRR negativo, o que indica uma reação endotérmica. Nesse caso, a energia é absorvida pela amostra durante o processo de combustão, o que resulta em uma taxa negativa, significando que menos calor está sendo liberado do que o necessário para gerar a ignição do material. Parte dessa absorção de energia pode estar relacionada com a liberação da água retida remanescente, que está fortemente estruturada ou ligada à mistura. Conforme o tempo passou, o HRR se tornou positivo para todas as amostras, com exceção da S30A70L10 (C). A Taxa de Liberação de Calor (HRR) em função de tempo para cada amostra é apresentada no Apêndice C.

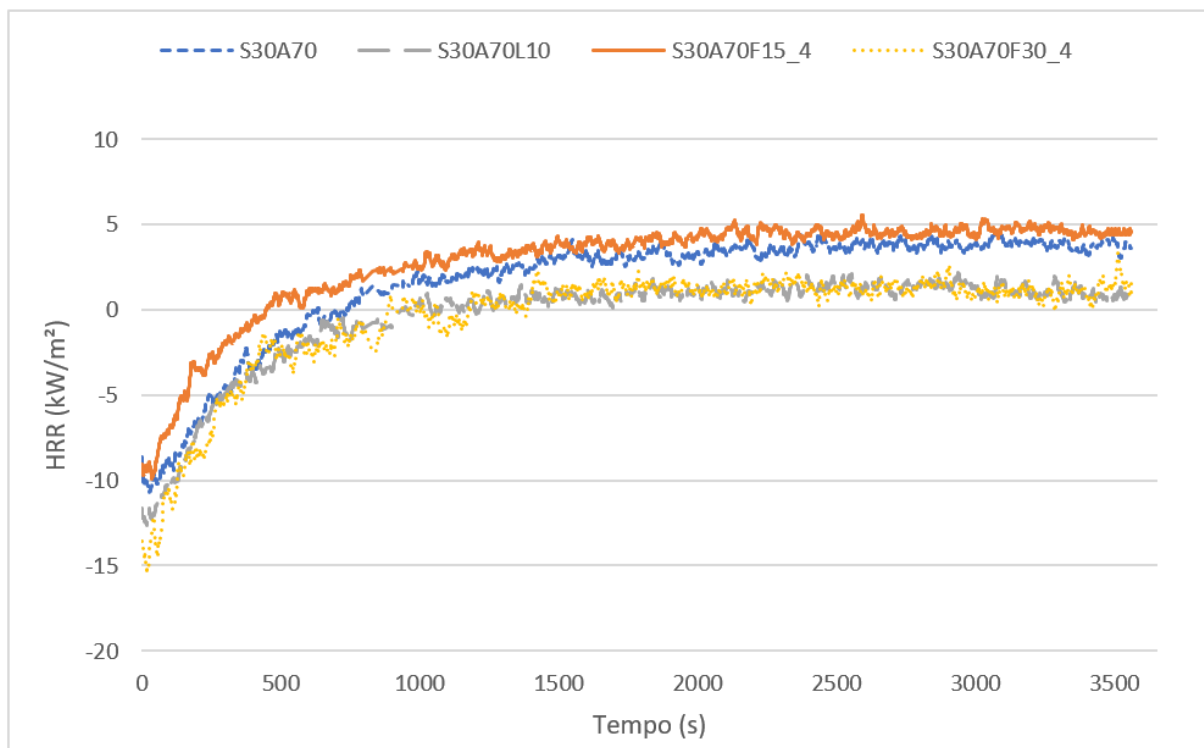


Figura 4.9: Média do HRR em função do tempo.

A taxa de liberação total de calor (THR) pode ser calculada usando a Equação 3.4, levando em consideração apenas os valores positivos do HRR. Os resultados obtidos foram registrados na Tabela 4.5. É importante ressaltar que o valor máximo observado foi de 14,70 MJ/m² na amostra S30A70 (C), indicando uma maior capacidade de liberação de calor dessa amostra em particular. Por outro lado, a amostra S30A70L10 (C) não apresentou liberação de calor positiva durante o ensaio, resultando em um valor nulo de THR. Essas observações destacam a variação na liberação de calor entre as diferentes amostras testadas.

Tabela 4.5: Taxa de liberação total de calor (THR) [MJ/m²] para as amostras ensaiadas

Amostra	THR (MJ/m²)
S30A70 (A)	5,18
S30A70 (B)	6,00
S30A70 (C)	14,70
S30A70L10 (A)	10,50
S30A70L10 (B)	2,88
S30A70L10 (C)	0
S30A70F15_4 (A)	12,67
S30A70F15_4 (B)	9,14
S30A70F30_4 (A)	2,83

Durante o ensaio, nenhuma das amostras apresentou ignição ou presença de chamas. Esse comportamento é relevante, uma vez que a lã de ovelha é um material inflamável, no entanto, dentro da matriz de solo argiloso elas foram protegidas.

As amostras apresentaram fumo no início do teste (Figura 4.10), com duração final entre os minutos 13 e 16, essa observação foi registrada visualmente. Além disso, as amostras que não continham fibras de lã de ovelha não apresentaram odor durante o ensaio. Por outro lado, as amostras que continham fibras de lã de ovelha emitiram odor forte semelhante ao cheiro de cabelo queimado.

As amostras mantiveram sua integridade após o ensaio, sem apresentar sinais de destacamento ou fissuras aparentes. A Figura 4.11 mostra a face exposta ao fluxo de calor de uma amostra de cada composição após o ensaio.

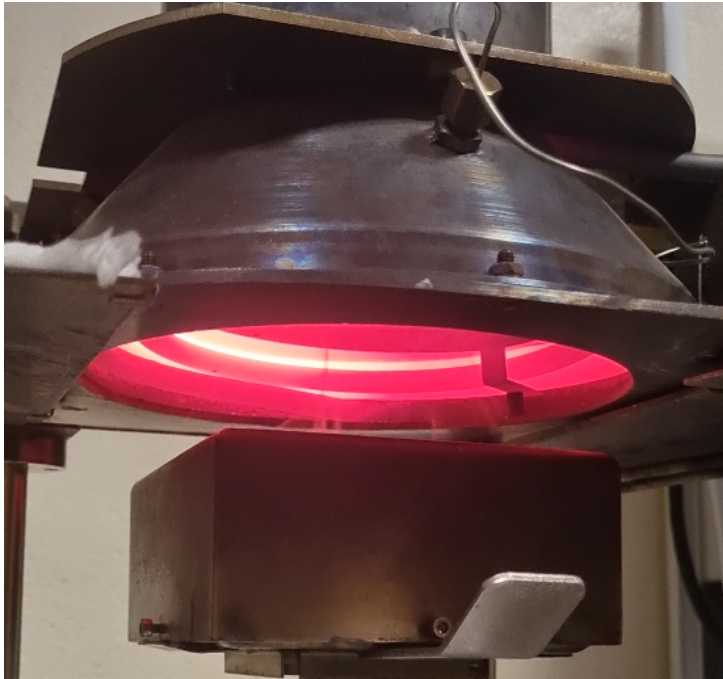


Figura 4.10: Fumo observado no início do teste.

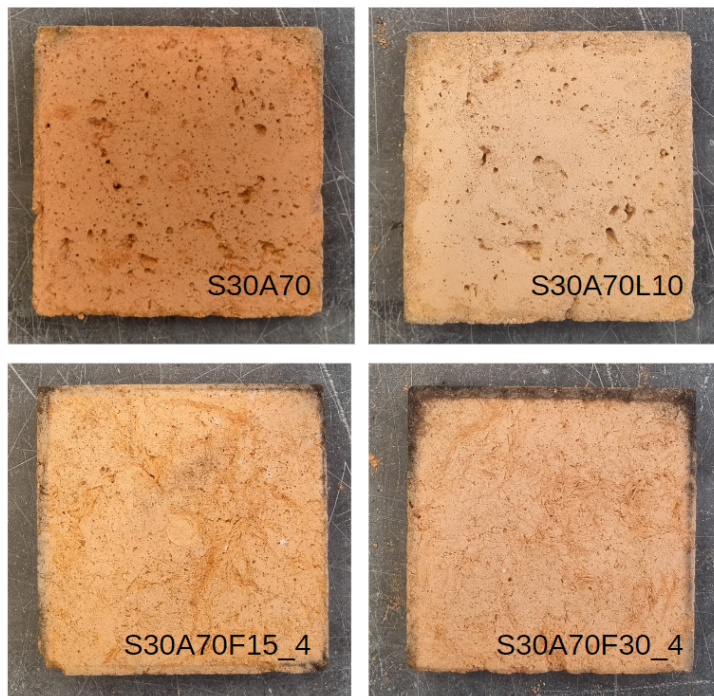


Figura 4.11: Amostras após ensaio no calorímetro.

Por fim, na Tabela 4.6, é apresentada uma comparação dos resultados obtidos com os resultados obtidos por Miao et al. [109] para materiais usualmente utilizados na indústria da construção e isolamento térmico, considerando o mesmo fluxo de calor de 50 kW/m² e um período de 300 segundos. Para a análise do MMPR médio e do MMPR de pico, foram considerados apenas os primeiros 300 segundos de ensaio para as amostras à base de solo, a fim de obter uma comparação mais precisa.

Tabela 4.6: Comparação dos resultados obtidos com os de outros materiais. Adaptado de [109]

Material	Tempo de ignição (s)	HRR médio (kW/m ²)	HRR de pico (kW/m ²)	MMPR médio (g/s)	MMPR de pico (g/s)
S30A70	-	1,6	4,67	-0,006	-0,097
S30A70L10	-	-0,37	2,16	-0,007	-0,120
S30A70F15_4	-	2,76	5,57	-0,008	-0,116
S30A70F30_4	-	-0,44	3,36	-0,012	-0,097
Lã de rocha	-	9,21	15,62	-0,047	-1,015
EPS	37	71,76	278,22	-0,017	-0,041
XPS	33	231,06	478,15	-0,045	-4,063
Poliestireno adesivo (grânulos)	17	15,91	29,56	-0,062	-0,147
Espuma rígida de poliuretano	4	101,92	165,82	-0,056	-0,138

Através dessa comparação, é possível observar que todas as amostras de solo argiloso com adição de lã de ovelha apresentaram um MMPR médio inferior aos materiais analisados por Miao et al. [109]. Além disso, o HRR médio e o HRR de pico para as amostras de solo argiloso com adição de lã de ovelha também se mostraram inferiores, devido ao fenômeno endotérmico apresentado por essas amostras.

Capítulo 5

Conclusão e trabalhos futuros

A presente pesquisa teve como objetivo investigar o comportamento térmico e a resposta ao fogo de materiais de misturas à base de solo argiloso e fibras de lã de ovelha com diferentes composições. Os resultados obtidos revelaram informações importantes sobre a condutividade térmica, perda de massa e taxa de liberação de calor dessas misturas.

Ao analisar a condutividade térmica das amostras, observou-se que a adição de fibras de lã de ovelha resultou em uma redução significativa da condutividade térmica, oferecendo potencial para melhorar o desempenho térmico das construções e elementos à base de solo argiloso. Essa redução foi mais pronunciada com o aumento da quantidade de fibras, sendo que fibras mais curtas apresentaram melhores propriedades térmicas nas misturas.

Além disso, a presença de cal hidráulica nas amostras contribuiu para uma redução significativa da condutividade térmica, especialmente em temperaturas mais elevadas. Isso sugere que a cal desempenha um papel relevante na redução da condutividade térmica das misturas.

Com base nos estudos conduzidos por Antunes [32], destaca-se que a mistura S40A60L10F45_4 atendeu aos requisitos mínimos especificados na norma alemã DIN 18948:2018-12. Essa mesma amostra apresentou, junto com a S30A70L10F45_4 e a S40A60L10F15_2, as menores condutividades térmicas. Logo conclui-se que a adição de fibras junto com a adição de cal hidráulica são os responsáveis por essa redução. Já na

amostra S40A60L10F45_2, o comprimento da fibra também foi o responsável por essa redução.

Em relação à perda de massa durante a exposição ao calor, as amostras com adição de fibras de lã de ovelha apresentaram uma perda de massa mais significativa, especialmente nos primeiros minutos do ensaio. Isso pode ser atribuído à decomposição das fibras durante a exposição ao calor, onde a lã representou 32,97% da massa total perdida na amostra S30A70F15_4 (A), 29,52% na amostra S30A70F15_4 (B) e 35,18% na amostra S30A70F30_4 (A).

A taxa de liberação de calor das amostras variou ao longo do tempo, apresentando um comportamento inicial endotérmico, seguido por uma liberação de calor positiva. Isso indica a capacidade das misturas de absorver calor e retardar o aumento da temperatura.

Esses resultados demonstram o potencial das misturas de argila e fibras de lã de ovelha para promover um desempenho térmico melhorado e uma resposta favorável ao fogo. A redução da condutividade térmica e a menor perda de massa observadas nessas misturas podem contribuir para a eficiência energética dos edifícios e para mitigar os riscos relacionados ao fogo.

Recomenda-se dar continuidade à pesquisa nessa área, explorando outras propriedades dos materiais, realizando estudos de viabilidade econômica e avaliando sua aplicabilidade em diferentes tipos de construções, como os painéis de revestimento. Além disso, é relevante realizar estudos das propriedades acústicas, higrotérmicas e de resistência ao fogo (isolamento e estanquidade) que são de extrema relevância para uma avaliação abrangente do desempenho destas misturas.

É importante expandir o estudo da condutividade térmica em mais amostras, a fim de obter uma compreensão mais abrangente do comportamento e da influência das fibras de lã de ovelha. Essa abordagem permitirá investigar diferentes proporções de fibras, comprimentos e técnicas de mistura, visando minimizar a tendência de aglomeração das fibras e alcançar uma distribuição mais homogênea.

Para complementar a análise do desempenho das misturas, é recomendado conduzir estudos das propriedades acústicas, considerando a capacidade de isolamento sonoro desses

materiais. Além disso, é importante avaliar as propriedades higrotérmicas, que envolvem a resposta do material à umidade e a capacidade de regular a temperatura e a umidade relativa no ambiente.

Por fim, é recomendado continuar os testes em um calorímetro de cone, visando quantificar a quantidade de fumaça emitida durante a exposição ao fogo. Essa análise contribuirá para uma melhor compreensão do comportamento das misturas em situações de incêndio e auxiliará no desenvolvimento de soluções mais seguras e eficientes.

Bibliografia

- [1] P. R. Jacobi e G. R. Besen, “Gestão de resíduos sólidos em São Paulo: desafios da sustentabilidade. Estudos Avançados,” *Estudos Avançados*, vol. 25(71), pp. 135–158, abr. de 2011. DOI: 10.1590/S0103-40142011000100010.
- [2] R. Pachauri e L. Meyer, *Climate Change 2014: Synthesis Report*. Intergovernmental Panel on Climate Change, 2015, ISBN: 9789291691432.
- [3] M. R. Hannah Ritchie e P. Rosado, “CO and Greenhouse Gas Emissions,” *Our World in Data*, 2020. URL: <https://ourworldindata.org/co2-and-other-greenhouse-gas-emissions>.
- [4] S. Solomon, Intergovernmental Panel on Climate Change e Intergovernmental Panel on Climate Change. Working Group I., *Climate Change 2007 - The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Fourth Assessment Report of the IPCC* (Assessment report (Intergovernmental Panel on Climate Change).: Working Group). Cambridge University Press, 2007, ISBN: 9780521705967.
- [5] Parlamento Europeu e Conselho da União Europeia, “Diretiva (UE) 2018/844 do Parlamento Europeu e do Conselho,” mai. de 2018.
- [6] F. Pacheco-Torgal e S. Jalali, “Earth construction: Lessons from the past for future eco-efficient construction,” *Construction and Building Materials*, vol. 29, pp. 512–519, abr. de 2012. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2011.10.054.

- [7] B. Berge, *The Ecology of Building Materials*. Taylor & Francis, 2009, ISBN: 9781136434624.
- [8] C. Thormark, “Energy and resources, material choice and recycling potential in low energy buildings,” em *Host publication title missing*, Netherlands: IOS Press, 2007, pp. 759–766, ISBN: ISBN 978-1-58603-785-7.
- [9] M. Pfundstein, R. Gellert, M. Spitzner e A. Rudolphi, *Insulating Materials: Principles, Materials, Applications*. Walter de Gruyter, 2012, ISBN: 9783034614757.
- [10] Y. Wang, I. Burgess, F. Wald e M. Gillie, *Performance-Based Fire Engineering of Structures*. CRC Press, 2012, ISBN: 9780203868713.
- [11] L. Barroso, L. Ferreira e R. C. A. de Lima, “Proteção passiva contra incêndios em edificações,” *Revista de Ciência e Inovação*, vol. 5, mar. de 2020. DOI: 10.26669/2448-4091250.
- [12] Associação Portuguesa de Segurança, *Segurança Contra Incêndio*, ago. de 2021. URL: <https://apsei.org.pt/areas-de-atuacao/seguranca-contraincendio/> (acedido em 29/08/2022).
- [13] A. Korjenic, S. Klaric, A. Hadžic e S. Korjenic, “Sheep wool as a construction material for energy efficiency improvement,” *Energies*, vol. 8, 6 2015, ISSN: 19961073. DOI: 10.3390/en8065765.
- [14] R. Eires, “Materiais não convencionais para uma construção sustentável utilizando cânhamo, pasta de papel e cortiça,” 2006. URL: <https://hdl.handle.net/1822/7053>.
- [15] R. Mateus, J. Fernandes, L. Bragança et al., *Contributos da arquitetura vernácula portuguesa para a sustentabilidade do ambiente construído*. 2015, ISBN: 978-989-20-5615-9. URL: <https://hdl.handle.net/1822/35978>.

- [16] S. R. Duarte, “"Construir com a terra. Uma proposta de intervenção no Bairro do Barruncho, Odivelas",” nov. de 2013. URL: <http://hdl.handle.net/10400.5/6943>.
- [17] F. P. Torgal, R. M. Eires e S. Jalali, *Construção em Terra*. 2009, ISBN: 9789728692407.
- [18] H. Niroumand, M. Zain e M. Jamil, “Assessing of Critical Parametrns on Earth Architecture and Earth Buildings as a Vernacular and Sustainable Architecture in Various Countries,” *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, vol. 89, pp. 248–260, out. de 2013, ISSN: 18770428. DOI: 10.1016/j.sbspro.2013.08.843.
- [19] G. Minke, *Building with Earth: Design and Technology of a Sustainable Architecture*. De Gruyter, 2009, ISBN: 9783764389925.
- [20] M. Correia, *Conservation in Earthen Heritage: Assessment and Significance of Failure, Criteria, Conservation Theory, and Strategies*. fev. de 2016, ISBN: ISBN-13: 978-1-4438-8605-5.
- [21] C. Williams, S. Goodhew, R. Griffiths e L. Watson, “The feasibility of earth block masonry for building sustainable walling in the United Kingdom,” *Journal of Building Appraisal*, vol. 6, pp. 99–108, 2 set. de 2010, ISSN: 17428262. DOI: 10.1057/jba.2010.15.
- [22] H. Guillaud, *Bam and its Cultural Landscape (Iran (Islamic Republic of))*. URL: whc.unesco.org/en/documents/133138 (acedido em 08/08/2022), © CRA-terre.
- [23] J. M. G. Satomayor, “Avaliação do comportamento carga-recalque de uma areia reforçada com fibras de coco submetidos a ensaios de placa em verdadeira grandeza.” Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2014.
- [24] A. Ashori e A. Nourbakhsh, “Bio-based composites from waste agricultural residues,” *Waste Management*, vol. 30, n.º 4, pp. 680–684, 2010, ISSN: 0956-053X. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2009.08.003>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X09003171>.

- [25] N. Cristelo e S. Jalali, “Estabilização química de solo residuais graníticos,” *Geotecnia*, 101 jul. de 2004, ISSN: 0379-9522. DOI: https://doi.org/10.14195/2184-8394_101_2.
- [26] A. L. C. de Azevêdo, “Estabilização de solos com adição de cal. Um estudo a respeito da reversibilidade das reações que acontecem no solo após a adição de cal,” nov. de 2010.
- [27] R. A. V. C. Pachamama, “Argamassas de Terra Para Reboco: Efeitos de adições estabilizantes e contribuições para a normalização brasileira,” Universidade Federal de Minas Gerais, 2020.
- [28] N. C. Consoli, L. da Silva Lopes, P. D. Marques, L. F. Prietto e R. C. Cruz, “Variables controlling stiffness and strength of lime-stabilized soils,” *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, vol. 137, n.º 6, pp. 628–632, 2011.
- [29] F. Bell, “Lime stabilization of clay minerals and soils,” *Engineering Geology*, vol. 42, n.º 4, pp. 223–237, 1996, ISSN: 0013-7952. DOI: [https://doi.org/10.1016/0013-7952\(96\)00028-2](https://doi.org/10.1016/0013-7952(96)00028-2). URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0013795296000282>.
- [30] S. Burroughs, “Soil Property Criteria for Rammed Earth Stabilization,” DOI: 10.1061/ASCE0899-1561200820:3264. URL: <http://www.ascelibrary.org>.
- [31] S. Liuzzi, M. R. Hall, P. Stefanizzi e S. P. Casey, “Hygrothermal behaviour and relative humidity buffering of unfired and hydrated lime-stabilised clay composites in a Mediterranean climate,” *Building and Environment*, vol. 61, pp. 82–92, mar. de 2013, ISSN: 03601323. DOI: 10.1016/j.buildenv.2012.12.006.
- [32] H. H. V. Antunes, “Desenvolvimento e caracterização de painéis de revestimento à base de argila e fibras naturais,” 2022. URL: <https://hdl.handle.net/1822/83217>.

- [33] A. Fabbri, J. C. Morel e D. Gallipoli, “Assessing the performance of earth building materials: A review of recent developments,” *RILEM Technical Letters*, vol. 3, pp. 46–58, jul. de 2018, ISSN: 25180231. DOI: 10.21809/rilemtechlett.2018.71.
- [34] B. M. Das, *Fundamentos De Engenharia Geotécnica*. Cengage do Brasil, 2019, ISBN: 9788522128273.
- [35] P. d. S. Santos, *Ciência e Tecnologia das Argilas*. Editora Edgard Blücher, 1989, ISBN: 5604592004276.
- [36] H. P. Caputo, A. N. caputo e J. M. d. A. Rodrigues, *Mecânica dos Solos e suas Aplicações - Fundamentos*. Grupo GEN, 2015, ISBN: 9788521630050.
- [37] P. Murrieta, *Mecânica dos Solos*. Grupo GEN, 2018, ISBN: 9788595156074.
- [38] J. G. Cook, *Handbook of textile fibres*. 1984. DOI: 10.1533/9781855734852.
- [39] A. Mohanty, M. Misra e L. Drzal, *Natural Fibers, Biopolymers, and Biocomposites*. CRC Press, 2005, ISBN: 9780203508206.
- [40] I. Florea e D. L. Manea, “Analysis of Thermal Insulation Building Materials Based on Natural Fibers,” vol. 32, Elsevier B.V., 2019, pp. 230–235. DOI: 10.1016/j.promfg.2019.02.207.
- [41] P. Russo Almeida, “Diversidade genética e diferenciação das raças portuguesas de ovinos com base em marcadores de DNA – microssatélites: uma perspectiva de conservação,” mar. de 2008. DOI: 10.13140/RG.2.2.14234.57280.
- [42] M. L. Ryder, “Sheep,” I. L. Mason, ed., pp. 63–85, 1984.
- [43] Eurostat. “Sheep population - annual data.” (2022), URL: <https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-eurostat-news/-/ddn-20200923-1> (acedido em 26/06/2022).
- [44] K. W. Corscadden, J. N. Biggs e D. K. Stiles, “Sheep’s wool insulation: A sustainable alternative use for a renewable resource?” *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 86, pp. 9–15, mai. de 2014, ISSN: 09213449. DOI: 10.1016/j.resconrec.2014.01.004.

- [45] L. C. N. Mendes, B. H. Matsukuma, G. D. Oliveira et al., “Efeito da tosquia na temperatura corpórea e outros parâmetros clínicos em ovinos,” *Pesquisa Veterinária Brasileira*, vol. 33, 6 2013, ISSN: 0100736X. DOI: 10.1590/S0100-736X2013000600021.
- [46] A. Oliveira. “Razões para fazer tosquia em ovelhas.” (2018), URL: <https://www.cpt.com.br/cursos-ovinos/artigos/razoes-para-fazer-tosquia-em-ovelhas> (accedido em 26/06/2022).
- [47] M. C. Parlato e S. M. Porto, “Organized framework of main possible applications of sheep wool fibers in building components,” *Sustainability (Switzerland)*, vol. 12, 3 2020, ISSN: 20711050. DOI: 10.3390/su12030761.
- [48] O. Dénes, I. Florea e D. L. Manea, “Utilization of Sheep Wool as a Building Material,” *Procedia Manufacturing*, vol. 32, 2019, ISSN: 23519789. DOI: 10.1016/j.promfg.2019.02.208.
- [49] N. A. Johnson, E. J. Wood, P. E. Ingham, S. J. McNeil e I. D. McFarlane, “Wool as a technical fibre,” *Journal of the Textile Institute*, vol. 94, 3-4 2003, ISSN: 17542340. DOI: 10.1080/00405000308630626.
- [50] V. B. Gupta e D. R. Rao, “Thermal Characteristics of Wool Fibers,” *Journal of Macromolecular Science, Part B*, vol. 31, 2 1992, ISSN: 1525609X. DOI: 10.1080/00222349208215509.
- [51] B. Soundara e K. P. S. Kumar, “Effect of Fibers on Properties of Clay,” *Intl. Jnl. of Engg and Applied Sciences*, vol. 2 (5), pp. 123–128, mai. de 2015.
- [52] Claytec GmbH Co. KG, *Claytec - building with clay*, dez. de 2022. URL: <https://www.claytec.de/en> (accedido em 25/10/2022).
- [53] H. Schroeder, “Clay boards and panels—an innovative earth building product for drywall construction,” *Earthen Architecture: Past, Present and Future*, pp. 339–344, 2014.

- [54] Gyptec Ibérica – Gessos Técnicos SA, *Gyptec*, dez. de 2022. URL: <https://gyptec.eu> (acedido em 25/10/2022).
- [55] J. Liblik e A. Just, “Performance of Constructions with Clay Plaster and Timber at Elevated Temperatures,” *Energy Procedia*, vol. 96, pp. 717–728, set. de 2016. DOI: 10.1016/j.egypro.2016.09.133.
- [56] A. Thomson, D. Maskell, P. Walker, M. Lemke, A. Shea e M. Lawrence, “Improving the hygrothermal properties of clay plasters,” ago. de 2015.
- [57] European Committee for Standardization (CEN), *Paints and varnishes - Coating systems for exterior masonry and concrete - Part 3: Determination and classification of the water-vapor permeability*, European Standard, Brussels, Belgium, 2011.
- [58] Earthborn, *Earthborn paints*, dez. de 2022. URL: <https://earthbornpaints.co.uk> (acedido em 08/08/2022).
- [59] S. Schiavoni, F. D’Alessandro, F. Bianchi e F. Asdrubali, “Insulation materials for the building sector: A review and comparative analysis,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 62, pp. 988–1011, set. de 2016, ISSN: 18790690. DOI: 10.1016/j.rser.2016.05.045.
- [60] P. Nováková, “Use of technical hemp in the construction industry,” *MATEC Web of Conferences*, vol. 146, jan. de 2018, ISSN: 2261236X. DOI: 10.1051/mateconf/201814603011.
- [61] Black Mountain, *Black Mountain Natural Insulation*, fev. de 2023. URL: www.blackmountaininsulation.com (acedido em 22/10/2022).
- [62] Manifattura Maiano s.p.a., *Manifattura Maiano Isolanti Ecosostenibili*, fev. de 2023. URL: www.isolanti.maiano.it (acedido em 25/10/2022).

- [63] A. Korjenic, V. Petránek, J. Zach e J. Hroudová, “Development and performance evaluation of natural thermal-insulation materials composed of renewable resources,” *Energy and Buildings*, vol. 43, pp. 2518–2523, 9 set. de 2011, ISSN: 03787788. DOI: 10.1016/j.enbuild.2011.06.012.
- [64] S. Mounir, A. Khabbazi, A. Khaldoun, Y. Maaloufa e Y. E. Hamdouni, “Thermal inertia and thermal properties of the composite material clay-wool,” *Sustainable Cities and Society*, vol. 19, pp. 191–199, dez. de 2015, ISSN: 22106707. DOI: 10.1016/j.scs.2015.07.018.
- [65] A. Hegyi, C. Dico e H. Szilagyi, “Sheep wool thermal insulating mattresses behaviour in the water vapours presence,” *Procedia Manufacturing*, vol. 46, pp. 410–417, 2020, ISSN: 23519789. DOI: 10.1016/j.promfg.2020.03.060.
- [66] Soven, *Soven*, fev. de 2023. URL: www.soven.si (acedido em 01/11/2022).
- [67] CorkStore24, *CorkStore24*, fev. de 2023. URL: www.corkstore24.co.uk (acedido em 01/11/2022).
- [68] A. B. Cherki, A. Khabbazi, B. Remy e D. Baillis, “Granular cork content dependence of thermal diffusivity, thermal conductivity and heat capacity of the composite material / Granular cork bound with plaster,” vol. 42, Elsevier Ltd, 2013, pp. 83–92. DOI: 10.1016/j.egypro.2013.11.008.
- [69] J. Xu, R. Sugawara, R. Widyorini, G. Han e S. Kawai, “Manufacture and properties of low-density binderless particleboard from kenaf core,” *Journal of Wood Science*, vol. 50, pp. 62–67, 1 2004, ISSN: 14350211. DOI: 10.1007/s10086-003-0522-1.
- [70] Rockwool A/S, *Rockwool*, fev. de 2023. URL: www.rockwool.com (acedido em 15/11/2022).
- [71] D. Allinson e M. Hall, “Hygrothermal analysis of a stabilised rammed earth test building in the UK,” *Energy and Buildings*, vol. 42, pp. 845–852, 6 jun. de 2010, ISSN: 03787788. DOI: 10.1016/j.enbuild.2009.12.005.

- [72] Termolan - Isolamentos Termo-Acústicos S.A, *Termolan*, fev. de 2023. URL: www.termolan.pt (acedido em 15/11/2022).
- [73] Ursa, *Ursa Glasswool*, urlwww.ursa.com, fev. de 2023. (acedido em 15/11/2022).
- [74] Saint-Gobain Portugal S.A., *Saint-Gobain*, fev. de 2023. URL: www.construir.saint-gobain.pt (acedido em 15/11/2022).
- [75] L. Zhou, A. Chen, L. Gao e Z. Pei, “Effectiveness of vertical barriers in preventing lateral flame spread over exposed EPS insulation wall,” *Fire Safety Journal*, vol. 91, pp. 155–164, jul. de 2017, ISSN: 03797112. DOI: 10.1016/j.firesaf.2017.04.013.
- [76] Tecnovite, *Tecnovite*, fev. de 2023. URL: www.tecnovite.pt (acedido em 15/11/2022).
- [77] Secil – Companhia Geral de Cal e Cimento S.A, *Secil*, fev. de 2023. URL: www.secil.pt (acedido em 15/11/2022).
- [78] M. Rachedi e A. Kriker, “Thermal properties of plaster reinforced with date palm fibers,” *Civil and Environmental Engineering*, vol. 16, pp. 259–266, 2 dez. de 2020, ISSN: 21996512. DOI: 10.2478/cee-2020-0025.
- [79] T. Cardinale, G. Arleo, F. Bernardo, A. Feo e P. D. Fazio, “Thermal and mechanical characterization of panels made by cement mortar and sheep’s wool fibres,” vol. 140, Elsevier Ltd, 2017, pp. 159–169. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.11.132.
- [80] H. Kallakas, J. Liblik, P. F. Alao, T. Poltinae, A. Just e J. Kers, “Fire and Mechanical Properties of Hemp and Clay Boards for Timber Structures,” vol. 290, Institute of Physics Publishing, jun. de 2019. DOI: 10.1088/1755-1315/290/1/012019.
- [81] European Committee for Standardization (CEN), *Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-2: General actions - Actions on structures exposed to fire*, European Standard, Brussels, Belgium, 2002.

- [82] European Committee for Standardization (CEN), *Fire classification of construction products and building elements - Part 1: Classification using test data from reaction to fire tests*, 2017.
- [83] G. A. de Souza Costa Lopes, “Risco de Incêndio de Um Edifício Complexo,” 2008.
- [84] J.-M. Franssen e P. V. Real, *Fire Design of Steel Structures*. 2015, ISBN: 978-92-9147-128-7.
- [85] L. M. R. Mesquita, “Estudo Experimental e Numérico do Comportamento de Um Material Intumescente Na Proteção Passiva de Elementos Estruturais Submetidos a Incêndio,” 2015. URL: <https://hdl.handle.net/10216/79675>.
- [86] I. A. da Costa, “Estudo Paramétrico da Resistência ao Fogo de Vigas Mistas Aço-Concreto,” 2001.
- [87] G. N. de Souza Costa, “Análise térmica de lajes em madeira com e sem proteção,” jun. de 2017.
- [88] S. A. Chapple e R. D. Anandjiwala, “Flammability of Natural Fiber-reinforced Composites and Strategies for Fire Retardancy: A Review,” *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, vol. 23, pp. 871–893, 2010.
- [89] A. L. dos Reis Gerken, “Materiais de proteção térmica para sistemas construtivos de baixo custo estruturados em aço,” jun. de 2007.
- [90] I. N. Alves, “Caracterização da resistência ao fogo de elementos de madeira.”
- [91] F. P. Incropera, D. P. Dewitt, T. L. Bergman e A. S. Lavine, *Fundamentos de transferência de calor e de massa*. Editora LTC, nov. de 2008, p. 643.
- [92] O. Farouki, *Thermal Properties of Soils* (CRREL monograph). U.S. Army Corps of Engineers, Cold Regions Research e Engineering Laboratory, 1981.
- [93] M. L. Parra-Saldivar e W. Batty, “Thermal behaviour of adobe constructions,” *Building and Environment*, vol. 41, pp. 1892–1904, 12 dez. de 2006, ISSN: 03601323. DOI: 10.1016/j.buildenv.2005.07.021.

- [94] J. P. Holman, *Heat Transfer Tenth edition*. 2013, vol. 53.
- [95] T. B. de Oliveira, “Caracterização térmica de materiais de proteção ao fogo,” nov. de 2018.
- [96] American Society for Testing and Materials, *Standard Specification for Woven Wire Test Sieve Cloth and Test Sieves*, West Conshohocken, PA, 2017.
- [97] Deutsches Institut für Normung, *Lehmplatten - Anforderungen, Prüfung und Kennzeichnung*, Berlin, Germany, 2018.
- [98] International Organization for Standardization, *Thermal insulation - Determination of steady-state thermal resistance and related properties - Heat flow meter apparatus*, Geneva, Switzerland, 1991.
- [99] Deutsches Institut für Normung, *Thermal performance of building products and building components - Specific criteria for the assessment of laboratories measuring heat*, Berlin, Germany, 2013.
- [100] Deutsches Institut für Normung, *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*, Berlin, Germany, 2001.
- [101] ASTM International, *Standard Test Method for Steady-State Heat Flux Measurements and Thermal Transmission Properties by Means of the Guarded-Hot-Plate Apparatus*, West Conshohocken, PA: ASTM International, 2019. DOI: 10.1520/C0177-19. URL: <https://doi.org/10.1520/C0177-19>.
- [102] Lambda-MeßtechnikGmbH Dresden, *Manual de Instruções do Thermal Conductivity Test Tool -Meter EP500e*, 2022. URL: <https://www.lambda-messtechnik.de/en>.
- [103] Deutsches Institut für Normung e.V., *Thermal insulating products for building applications - Determination of thickness*, Berlin, Germany, 1995.

- [104] M. Alves, N. Lopes, L. Mesquita e P. Piloto, “Using The Massa Loss Calorimeter To Assess The Fire Reaction Behaviour of Wood and Wood-based Materials: Test Procedure and Data Analysis,”
- [105] *Plastics — Simple heat release test using a conical radiant heater and a thermopile detector*, International Organization for Standardization, 2007. URL: <https://www.iso.org/standard/43119.html>.
- [106] International Organization for Standardization, *Reaction-to-fire tests — Heat release, smoke production and mass loss rate — Part 1: Heat release rate (cone calorimeter method)*, 2015. URL: <https://www.iso.org/standard/60800.html>.
- [107] V. Fiore, G. D. Bella e A. Valenza, “Effect of Sheep Wool Fibers on Thermal Insulation and Mechanical Properties of Cement-Based Composites,” *Journal of Natural Fibers*, vol. 17, n.^o 10, pp. 1532–1543, 2020. DOI: 10.1080/15440478.2019.1584075. URL: <https://doi.org/10.1080/15440478.2019.1584075>.
- [108] BetonWood, *BetonWood*, mai. de 2023. URL: <https://www.betonwood.com> (acedido em 27/05/2023).
- [109] Z. Miao, L. Xingna, C. Zhen, W. Ji e S. Wenhua, “Experimental study of the heat flux effect on combustion characteristics of commonly exterior thermal insulation materials,” *Procedia Engineering*, vol. 84, pp. 578–585, 2014.

Apêndice A

Declaração de Desempenho Cal Hidráulica - HL 5

DECLARAÇÃO DE DESEMPENHO

DOP.14004

Versão: 3.0/PT

Data de Revisão: Maio / 2022

SECIL TEK

DÁ FORMA ÀS IDEIAS

Data de Impressão: Maio 25, 2022

1. CÓDIGO DE IDENTIFICAÇÃO ÚNICO DO PRODUTO TIPO:

Cal Hidráulica – HL 5

2. UTILIZAÇÕES PREVISTAS:

A Cal Hidráulica é utilizada na preparação ou na produção de materiais para a construção civil e na engenharia civil.

3. FABRICANTE:

Secil Martingança, S.A.

Apartado 2 EC Maceira

2406-909 Maceira LRA

Denominação Comercial: SECILTEK

4. SISTEMA DE AVALIAÇÃO E VERIFICAÇÃO DA REGULARIDADE DE DESEMPENHO DO PRODUTO:

Sistema 2+

5. NORMA HARMONIZADA:

EN 459-1:2010

O organismo notificado nº1328 (CERTIF – Associação para a Certificação) realizou a inspeção inicial da unidade fabril e do controlo da produção em fábrica e o acompanhamento, apreciação e aprovação contínuos do controlo da produção em fábrica, no âmbito do sistema 2+ e emitiu o certificado de conformidade do controlo da produção em fábrica nº1328-CPR-0148.

SECIL MARTINGANÇA, SA.

Apartado 2 - 2406 - 909 - Maceira - LRA - Portugal

Tel.: +351 244 770 220 | Fax: +351 244 777 997 | E-mail: comercial.seciltek@secil.pt



seciltek.com

DECLARAÇÃO DE DESEMPENHO

DOP.14004

Versão: 3.0/PT

Data de Revisão: Maio / 2022

SECIL TEK

DÁ FORMA ÀS IDEIAS

Data de Impressão: Maio 25, 2022

6. DESEMPENHO DECLARADO:

Características essenciais	Desempenho	Especificações técnicas harmonizadas
Resistência à Compressão	7 dias \geq 2MPa 28 dias \geq 5MPa e \leq 15MPa	EN 459-1:2010
Tempo de Presa	Inicial $>$ 1h Final \leq 15h	
Teor em ar	\leq 25%	
SO ₃	\leq 3%	
Cal disponível	\geq 4%	
Expansibilidade	\leq 2mm	
Finura	0.090mm \leq 15% 0.200mm \leq 5%	
Penetração	$>$ 10mm e $<$ 50 mm	
Teor em água livre	\leq 2%	
Durabilidade	-	

7. O desempenho do produto identificado acima está em conformidade com o conjunto de desempenhos declarados. A presente declaração de desempenho é emitida em conformidade com o regulamento (UE) nº 305/2011, sob exclusiva responsabilidade do fabricante identificado acima.

Assinado por e em nome do fabricante por:



Pedro Martins

(Direção Operacional)

Maceira, 25 de Maio de 2022

SECIL MARTINGANÇA, SA.

Apartado 2 - 2406 - 909 - Maceira - LRA - Portugal

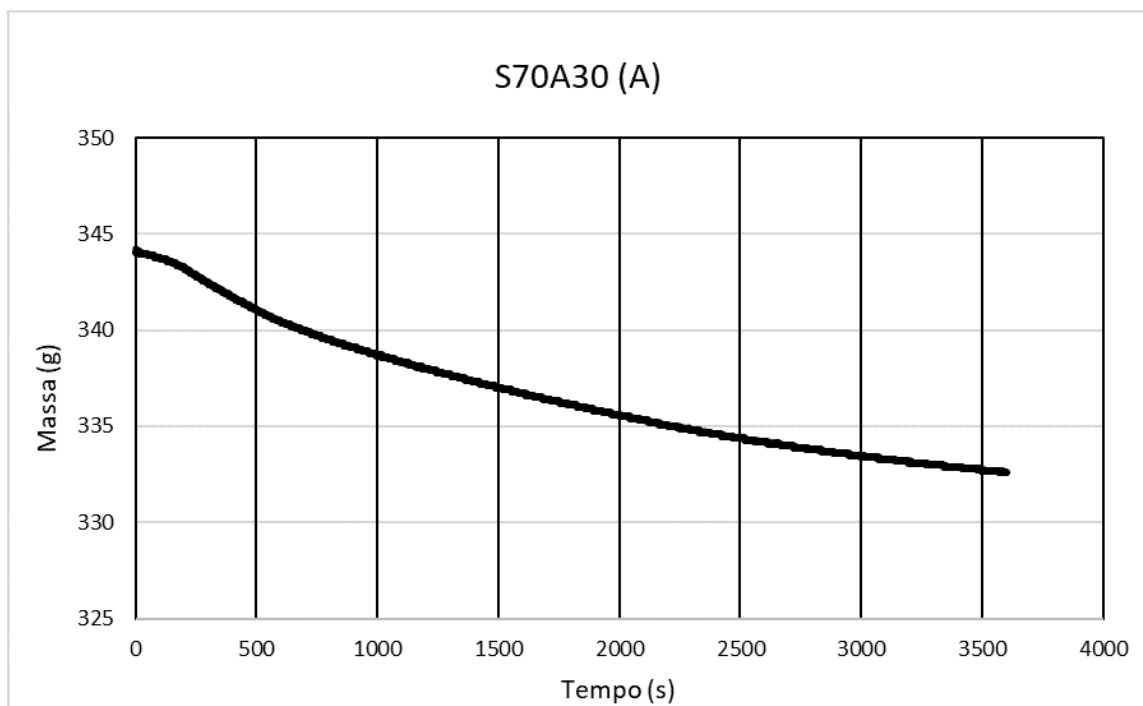
Tel.: +351 244 770 220 | Fax: +351 244 777 997 | E-mail: comercial.seciltek@secil.pt



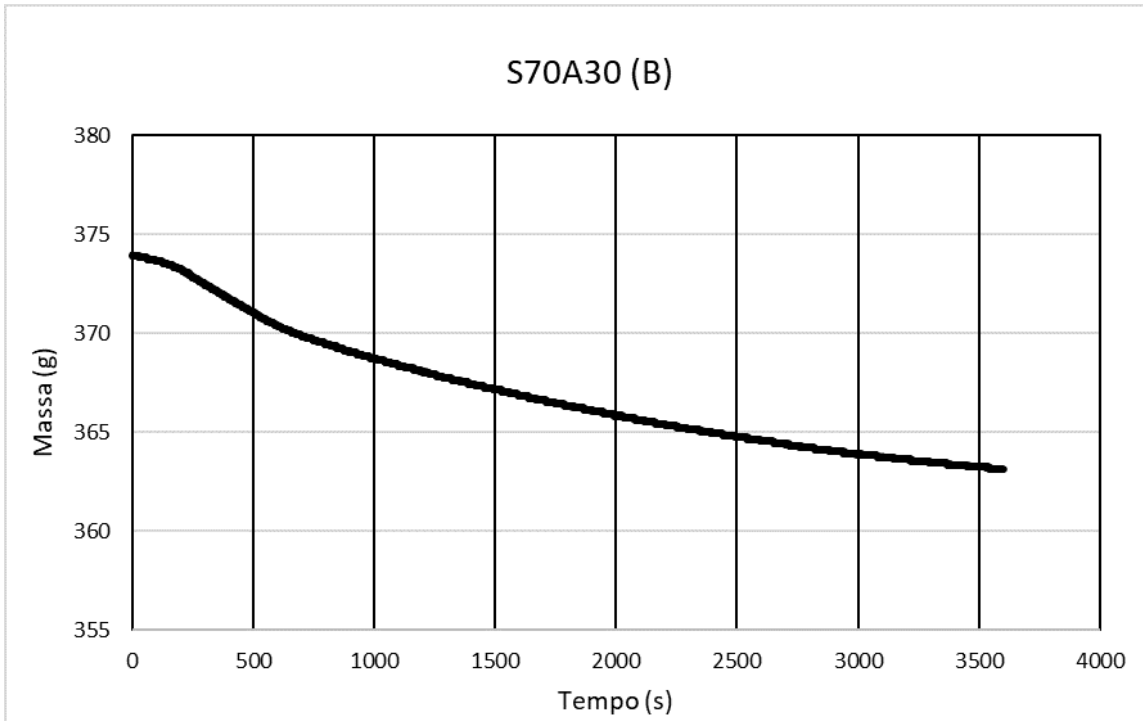
seciltek.com

Apêndice B

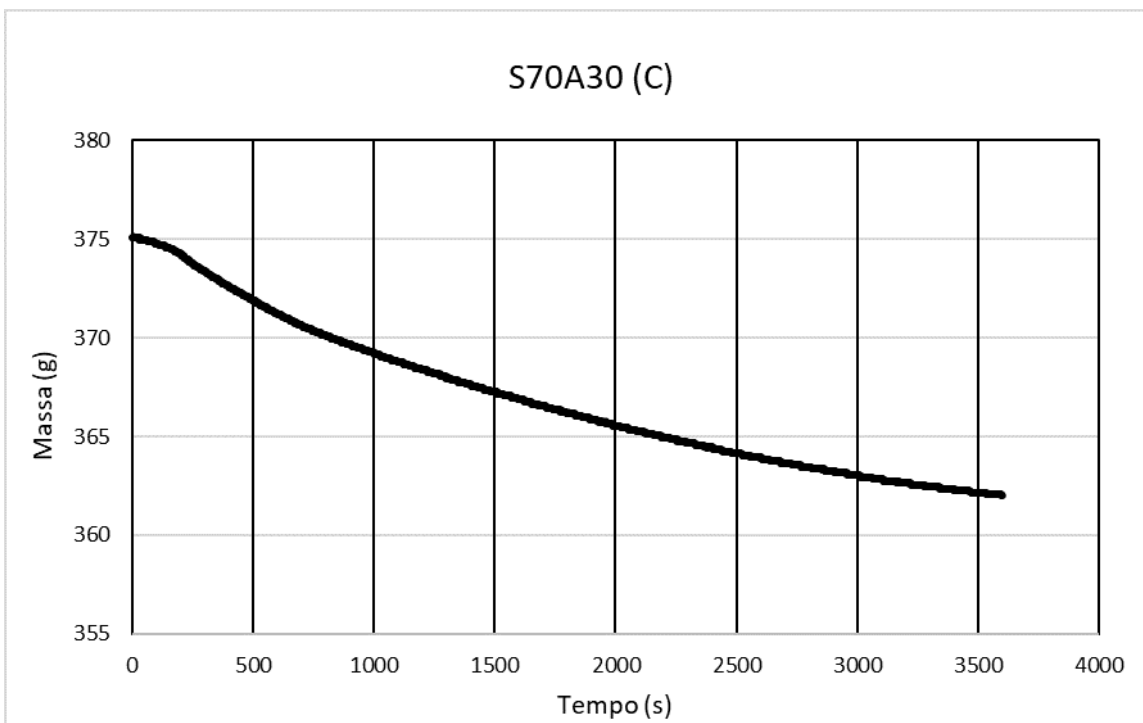
Perda de Massa



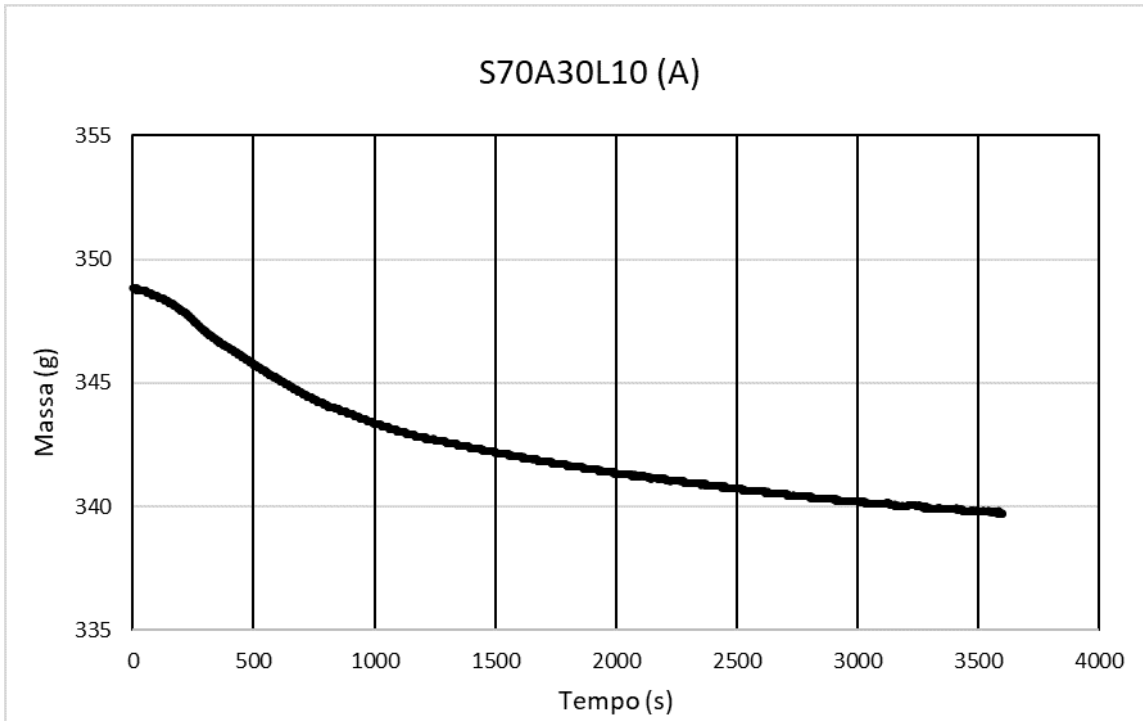
Perda de massa na amostra S70A30 (A) em função do tempo.



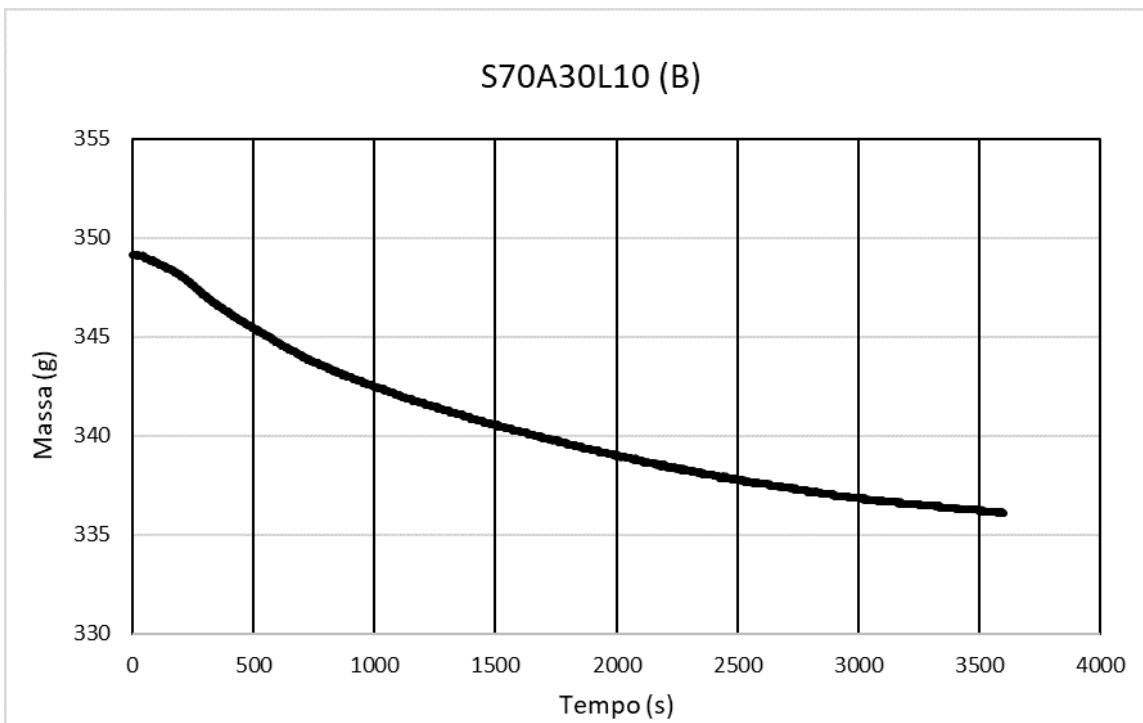
Perda de massa na amostra S70A30 (B) em função do tempo.



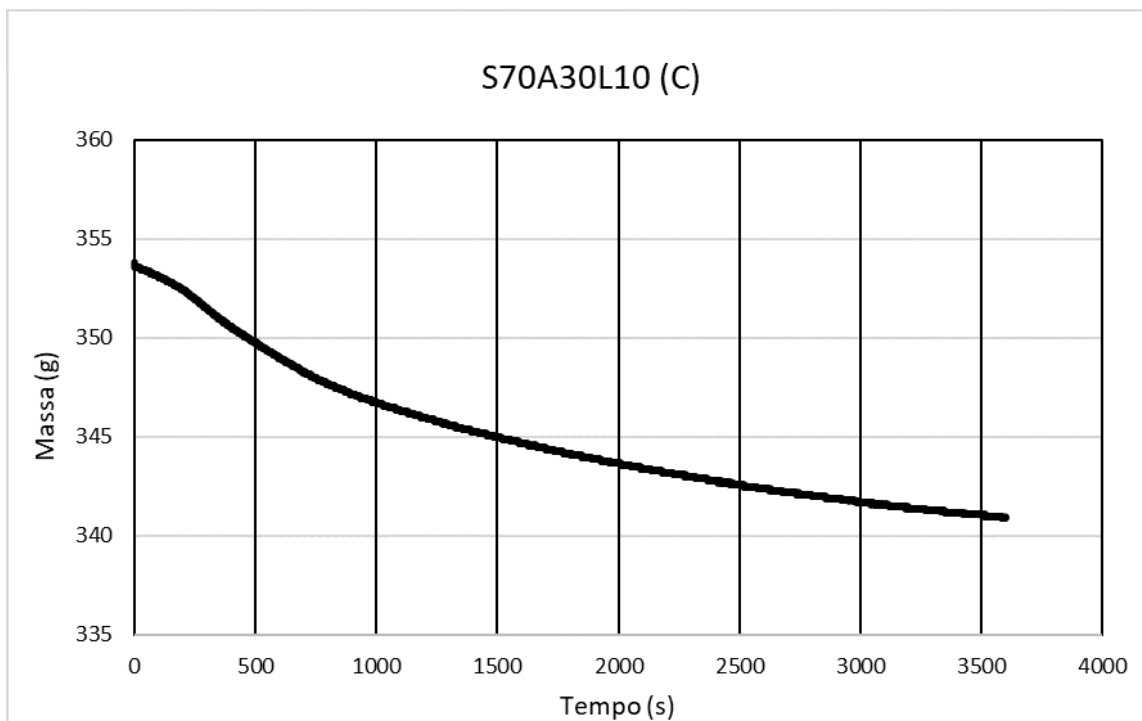
Perda de massa na amostra S70A30 (C) em função do tempo.



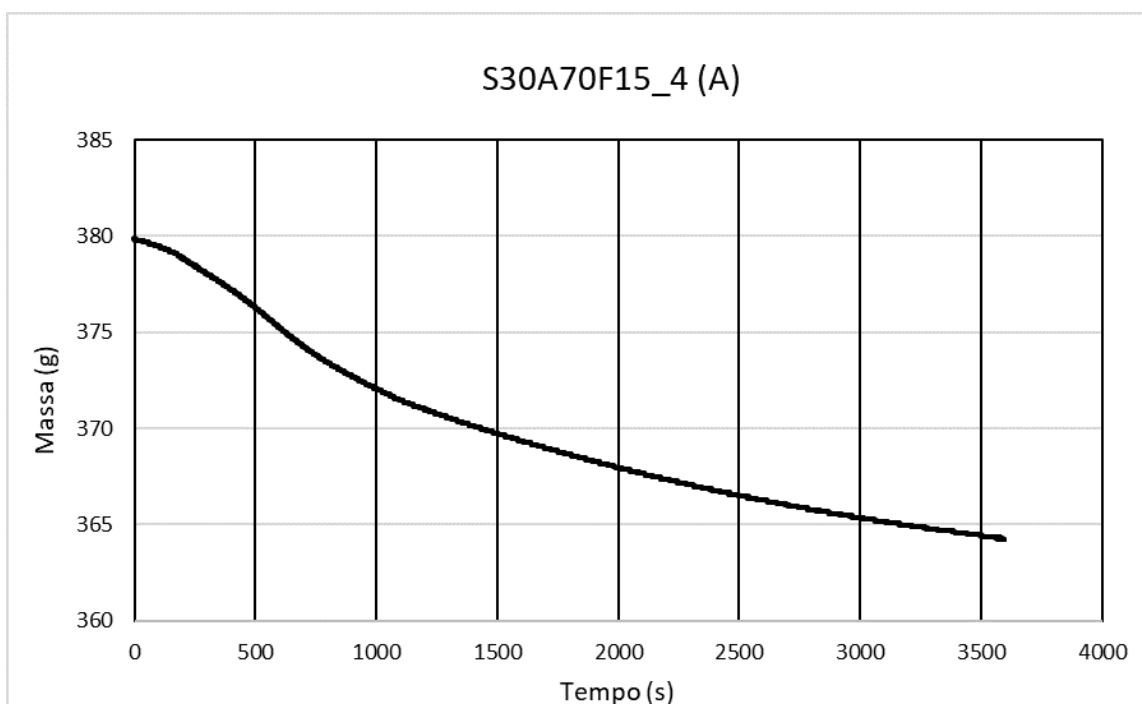
Perda de massa na amostra S70A30L10 (A) em função do tempo.



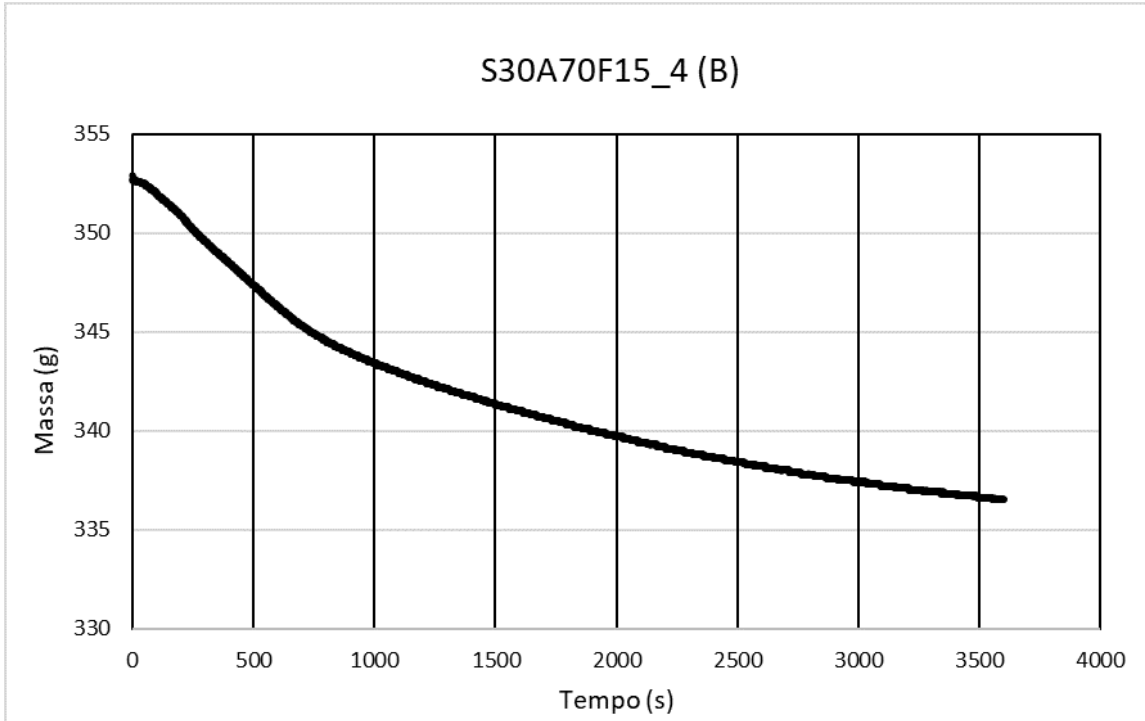
Perda de massa na amostra S70A30L10 (B) em função do tempo.



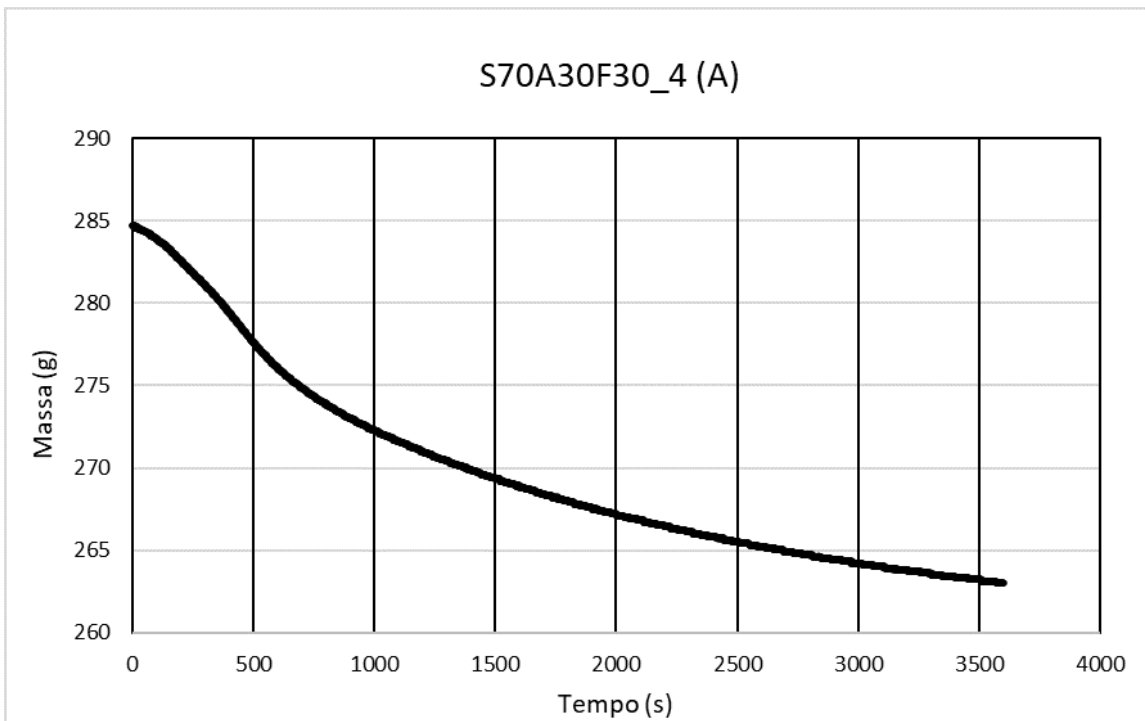
Perda de massa na amostra S70A30L10 (C) em função do tempo.



Perda de massa na amostra S70A30F15_4 (A) em função do tempo.



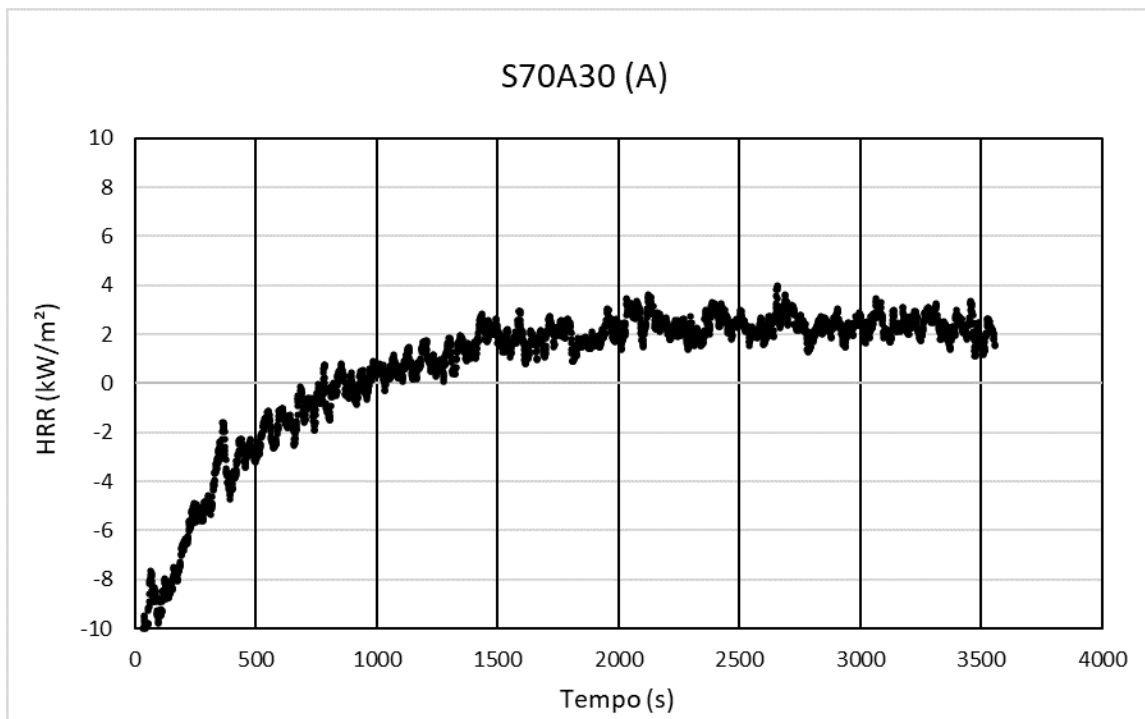
Perda de massa na amostra S70A30F15_4 (B) em função do tempo.



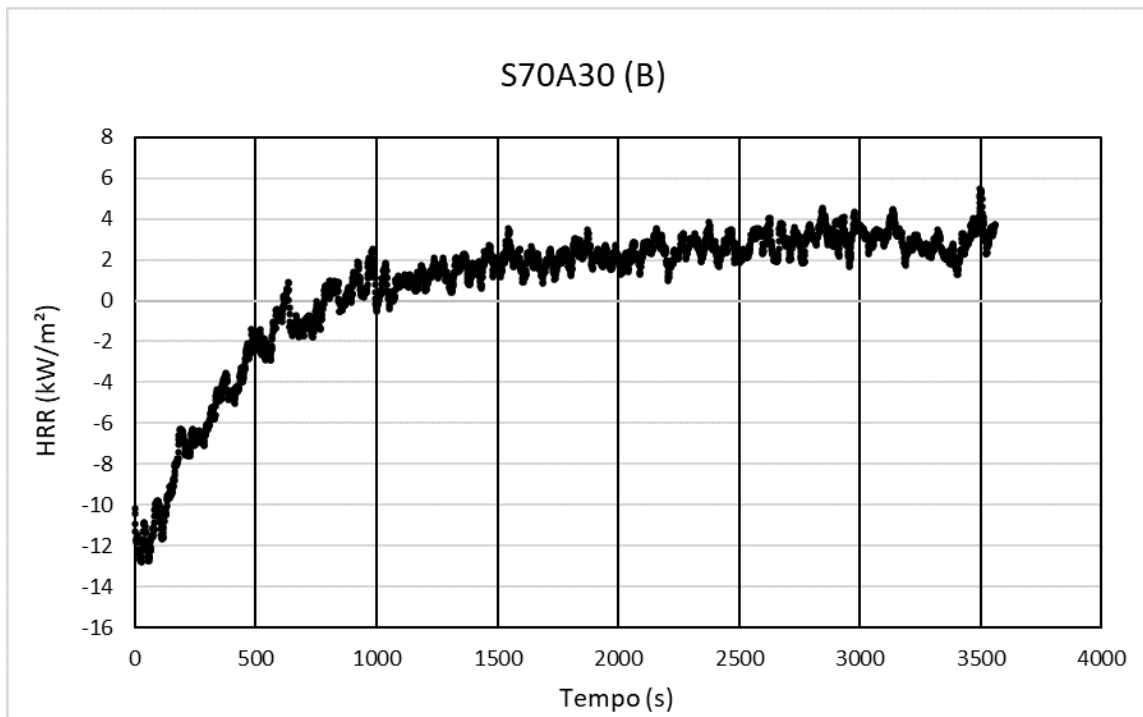
Perda de massa na amostra S70A30F30_4 (A) em função do tempo.

Apêndice C

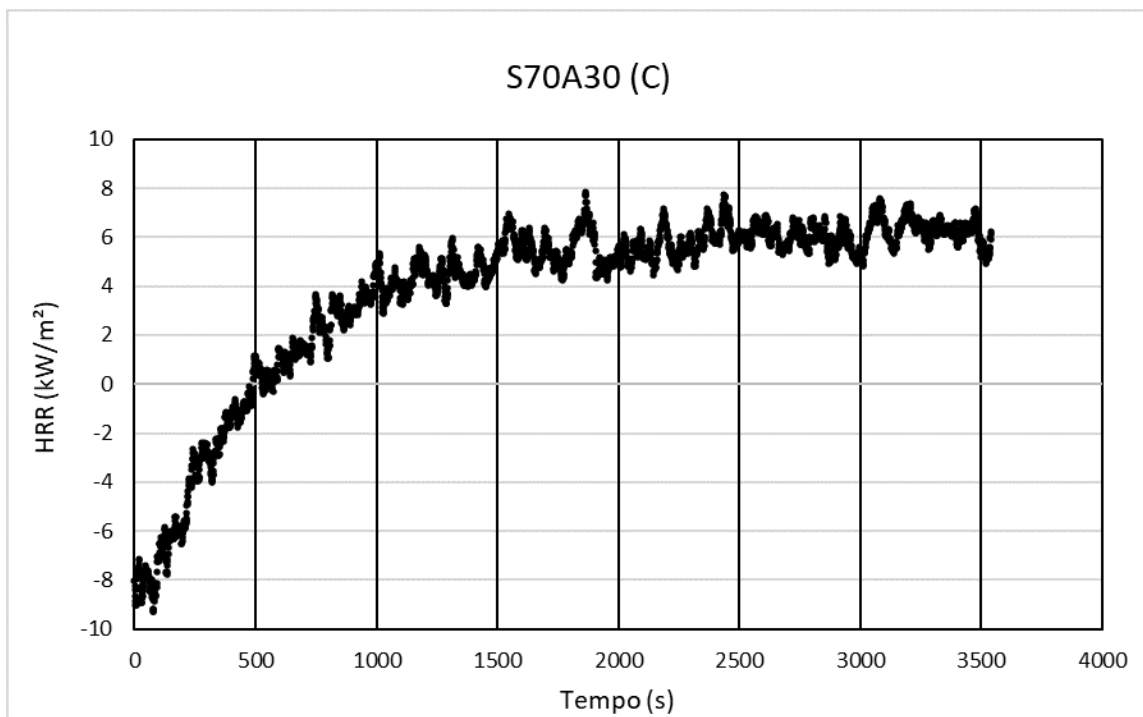
Taxa de Liberação de Calor (HRR)



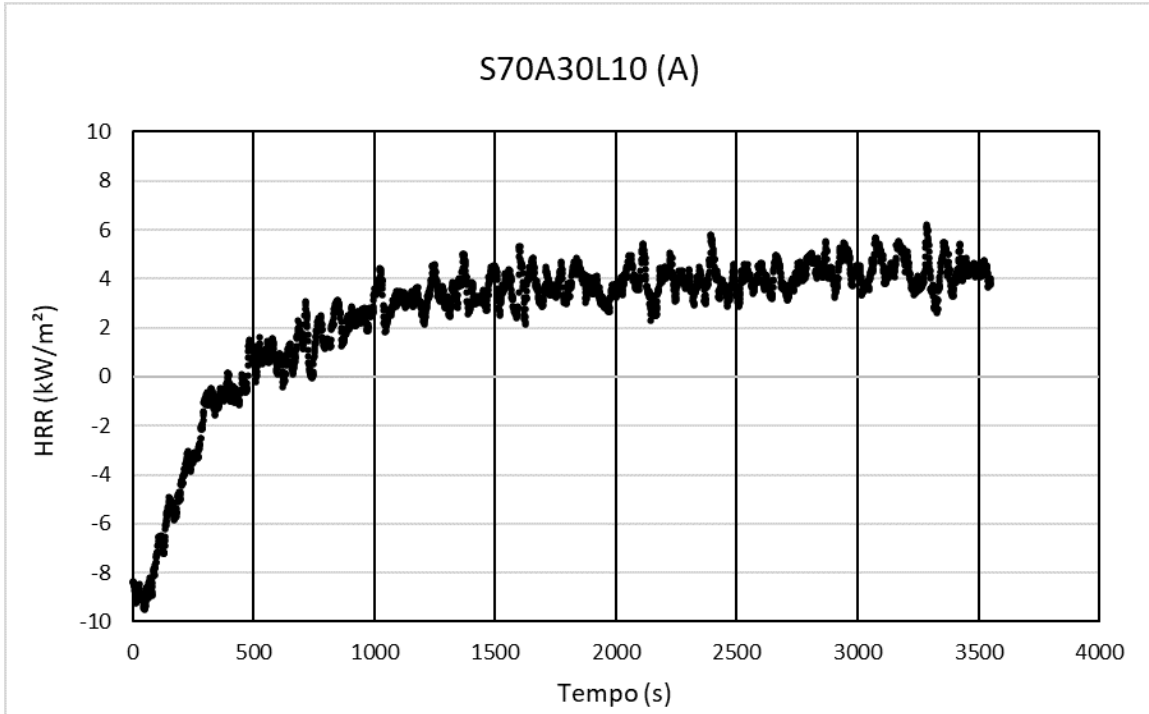
Taxa de liberação de calor por unidade de área (HRR) da amostra S70A30 (A).



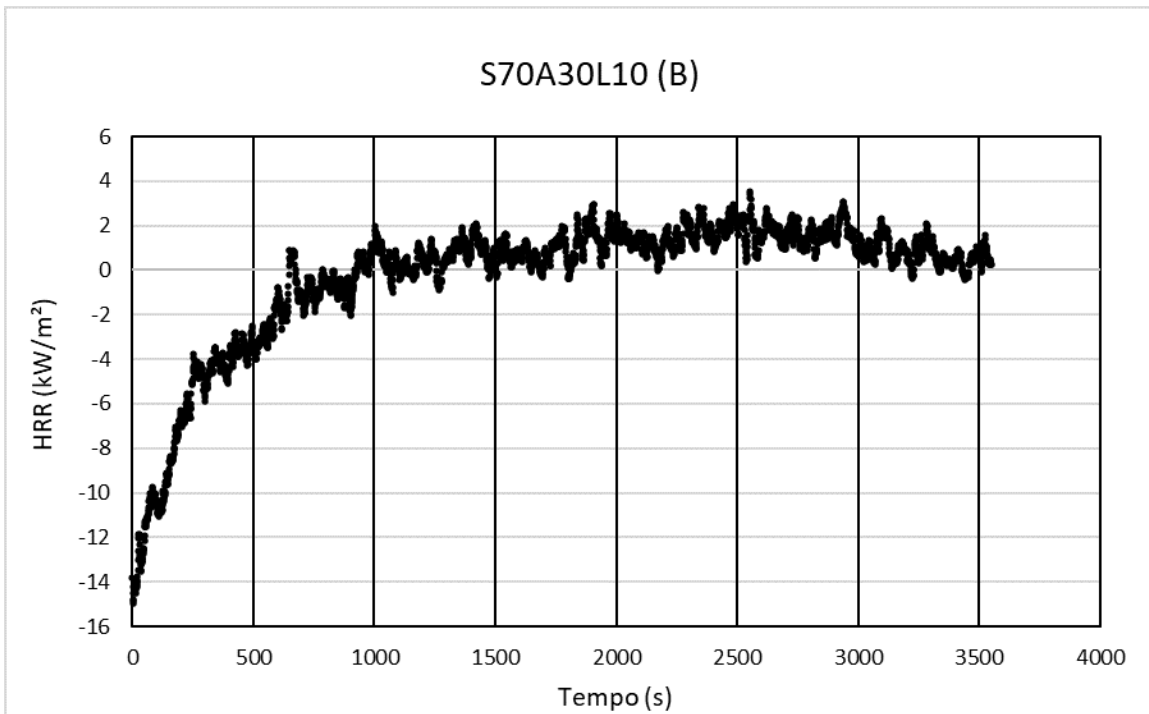
Taxa de liberação de calor por unidade de área (HRR) da amostra S70A30 (B).



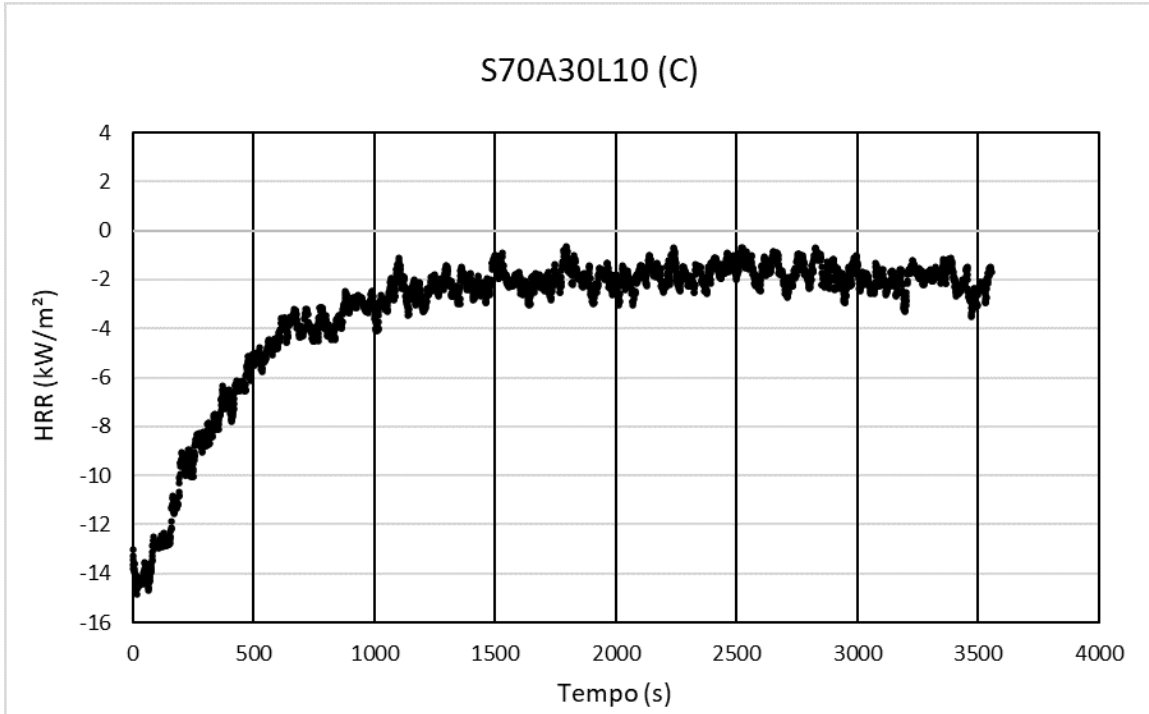
Taxa de liberação de calor por unidade de área (HRR) da amostra S70A30 (C).



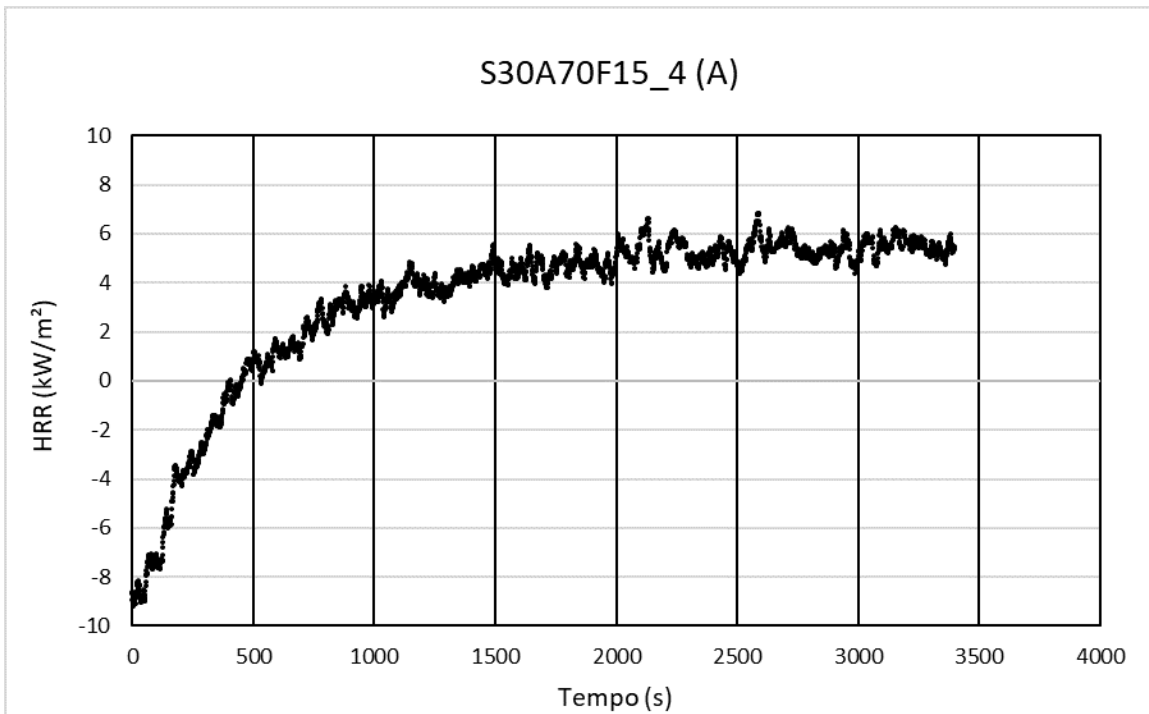
Taxa de liberação de calor por unidade de área (HRR) da amostra S70A30L10 (A).



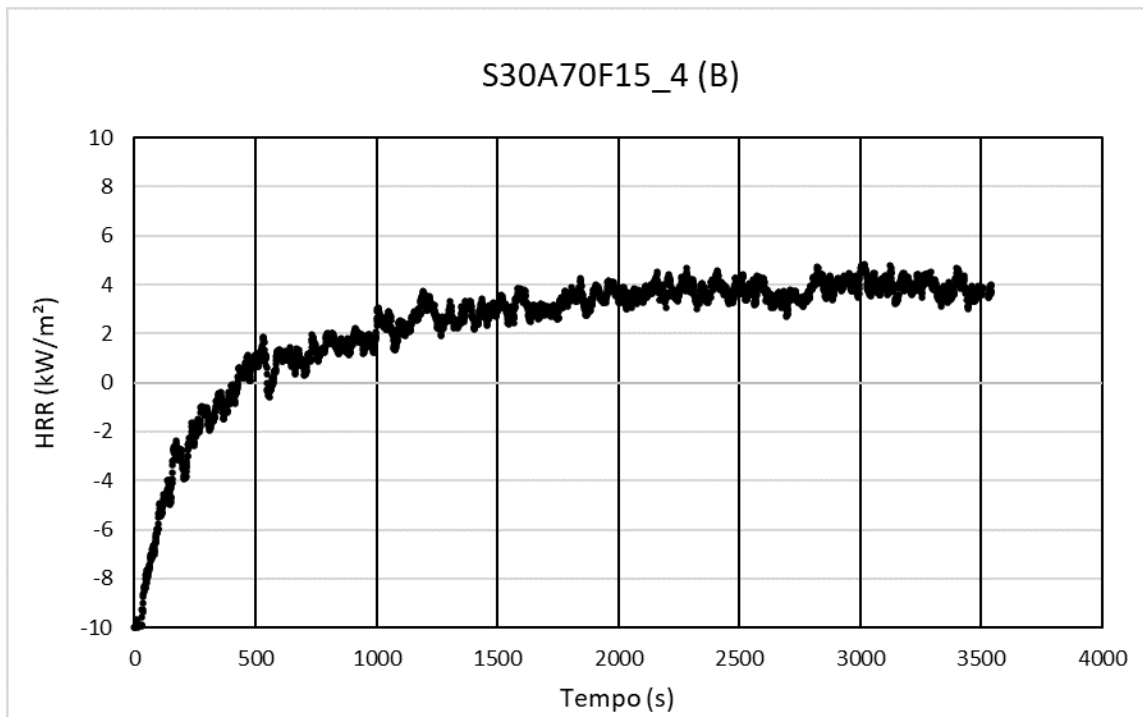
Taxa de liberação de calor por unidade de área (HRR) da amostra S70A30L10 (B).



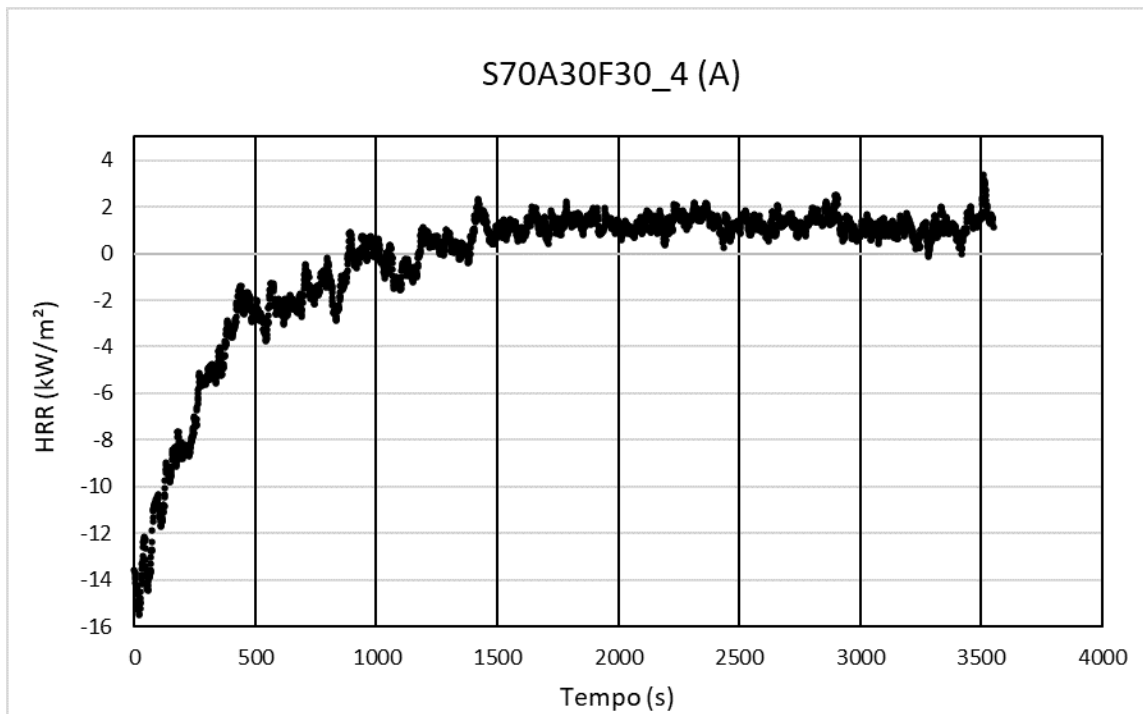
Taxa de liberação de calor por unidade de área (HRR) da amostra S70A30L10 (C).



Taxa de liberação de calor por unidade de área (HRR) da amostra S70A30F15_4 (A).



Taxa de liberação de calor por unidade de área (HRR) da amostra S70A30F15_4 (B).



Taxa de liberação de calor por unidade de área (HRR) da amostra S70A30F30_4 (A).