



**Universidade do Minho**

Escola de Engenharia

Hugo Henrique Veloso Antunes

**Desenvolvimento de misturas para painéis de revestimento à base de argila e fibras de lã de ovelha**

Dezembro 2022



**Universidade do Minho**

Escola de Engenharia

Hugo Henrique Veloso Antunes

**Desenvolvimento de misturas para painéis de revestimento à base de argila e fibras de lã de ovelha**

Dissertação de Mestrado  
Mestrado em Engenharia Civil

Trabalho efetuado sob a orientação de

**Doutora Sandra Maria Gomes Monteiro da Silva**

e da

**Doutora Eduarda Cristina Pires Luso**

Dezembro 2022

## DIREITOS DE AUTOR

Este é um trabalho académico que pode ser utilizado por terceiros desde que respeitadas as regras e boas práticas internacionalmente aceites, no que concerne aos direitos de autor e direitos conexos.

Assim, o presente trabalho pode ser utilizado nos termos previstos na licença abaixo indicada.

Caso o utilizador necessite de permissão para poder fazer um uso do trabalho em condições não previstas no licenciamento indicado, deverá contactar o autor, através do RepositóriUM da Universidade do Minho.



Atribuição-SemDerivações

CC BY-ND

<https://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0/>

## AGRADECIMENTOS

Com a conclusão desta importante etapa da minha vida, gostava de expressar a minha mais sincera gratidão a todos que me acompanharam e suportaram ao longo deste período. Muito Obrigado!

Quero agradecer às Doutoradas Sandra Silva e Eduarda Luso pela orientação, pelo tempo disponibilizado e pelo auxílio, leituras e correções que levaram ao sucesso final desta etapa. Ao Doutor Rui Silva, quero agradecer todo o apoio prestado e paciência em todos os momentos em que me acompanhou, quer durante a parte experimental quer mais tarde, tal como todos os conhecimentos transmitidos ao longo destes últimos meses. Muito Obrigado!

Quero agradecer a todos os técnicos do Laboratório de Engenharia Civil da Universidade do Minho, nomeadamente ao Cesar Gonçalves e ao Luciano Fernandes, por toda a paciência e ajuda prestada na realização dos ensaios experimentais.

Agradeço a todos os amigos que se demonstraram sempre disponíveis para me acompanhar e auxiliar nesta longa jornada. E por fim, um agradecimento especial à minha família e namorada por todo o conforto, preocupação e ajuda ao longo destes 5 anos de curso. Muito Obrigado!

## DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE

Declaro ter atuado com integridade na elaboração do presente trabalho académico e confirmo que não recorri à prática de plágio, nem a qualquer forma de utilização indevida ou falsificação de informações ou resultados em nenhuma das etapas conducente à sua elaboração.

Mais declaro que conheço e que respeitei o Código de Conduta Ética da Universidade do Minho.

## RESUMO

### **Desenvolvimento de misturas para painéis de revestimento à base de argila e fibras de lã de ovelha**

Atualmente, o cimento é o principal ligante utilizado na construção, contudo a sua produção consome uma elevada quantidade de energia a ser produzido e ao mesmo tempo emite cerca de 7% do CO<sub>2</sub> responsável pelo aquecimento global. A crescente procura de novos tipos de materiais e métodos de construção sustentáveis, devido a problemas associados aos elevados consumos de energia e emissões, problemas ambientais, ecológicos e económicos, tem conduzido ao estudo da utilização de materiais com menor impacto ambiental e com adequado desempenho mecânico. Um caso desses são as misturas de argila e fibras naturais. Para além das vantagens em termos de sustentabilidade, estes materiais podem contribuir no desempenho térmico, acústicos e higrotérmico, colaborando com um aumento da qualidade do ar interior dos edifícios.

Neste estudo avaliou-se o comportamento de misturas de solo argiloso com adição de diferentes quantidades de fibras naturais com a adição ou não de um ligante. Foi avaliado o desempenho mecânico, o nível de retração, o teor de humidade em equilíbrio, a massa volúmica, o módulo de elasticidade dinâmico e a velocidade de propagação de ultrassons de todas as misturas realizadas, contribuindo assim para o desenvolvimento de painéis de revestimento interior.

Os resultados obtidos permitiram determinar o comportamento mecânico, bem como avaliar possíveis interações entre os diferentes materiais utilizados. A análise dos resultados permitiu concluir que o aumento da quantidade de fibras, da percentagem de argila e a adição de cal hidráulica nas misturas, aumentaram a resistência mecânica, influenciaram o fenómeno de retração e o teor de humidade em equilíbrio.

Em comparação com os requisitos mínimos existentes para este tipo de materiais, apenas uma das misturas realizadas apresentou um valor aceitável.

**Palavras chave:** Fibras Naturais, Solo Argiloso, Argila, Lã, Cal Hidráulica, Misturas

## ABSTRACT

### **Development of mixtures for cladding panels produced with clay and sheep wool fibres**

Currently, cement is the main binder used in construction, however its production consumes a high amount of energy when produced, at the same time emits about 7% of CO<sub>2</sub> responsible, for global warming. With the growing demand for new types of materials and sustainable construction methods, due to problems associated with high energy consumption and emissions, environmental, ecological and economic problems, has led to the study of the use of materials with lower environmental impact and adequate mechanical performance, such as mixtures of clay and natural fibres, as is the case of sheep's wool. In addition to the advantages in terms of sustainability, these materials can contribute to the thermal, acoustic and hygrothermal performance, promoting the improvement of the indoor air quality of buildings.

This study evaluated the behaviour of clay soil mixtures with the addition of different amounts of natural fibres with or without the addition of a binder. The mechanical performance, shrinkage level, moisture content in equilibrium, density, dynamic modulus of elasticity and ultrasonic propagation velocity of all the mixtures carried out were evaluated, thus contributing to the development of interior cladding panels. The results obtained made it possible to determine the mechanical behaviour as well as to evaluate possible interactions between the different materials used. The analysis of the results allowed for the conclusion that increasing the amount of fibres, the clay percentage and the addition of hydraulic lime in the mixtures, increased the mechanical strength, influenced the shrinkage phenomenon and the moisture content in equilibrium.

In comparison with the existing minimum requirements for this type of materials, only one of the mixes performed presented the minimum acceptable value.

**Keywords:** Natural Fibres, Clay Soil, Clay, Wool, Hydraulic lime, Mixtures

## ÍNDICE

1	Introdução .....	1
1.1	Enquadramento .....	1
1.2	Objetivos .....	1
1.3	Organização da dissertação .....	2
2	Revisão bibliográfica .....	4
2.1	Painéis à base de solo argiloso .....	4
2.2	Solo argiloso .....	5
2.2.1	Argila Vs Minerais de argila .....	6
2.2.2	Propriedades da argila .....	7
2.2.3	A utilização da argila na construção .....	10
2.3	Fibras naturais .....	11
2.3.1	Lã de ovelha .....	12
2.3.2	Cânhamo .....	14
2.3.3	Sisal .....	15
2.3.4	Linho .....	15
2.3.5	Juta .....	16
2.3.6	Comparação das propriedades das fibras .....	17
2.4	Solo argiloso e fibras naturais .....	17
2.4.1	Solo argiloso e fibras Vs Humidade .....	18
2.4.2	Solo argiloso e fibras Vs Trocas térmicas .....	19
2.5	Soluções construtivas à base de argila e/ou fibras naturais no mercado .....	19
3	Programa experimental .....	22
3.1	Caracterização dos materiais .....	22



3.1.1	Solo argiloso .....	22
3.1.2	Lã de ovelha.....	26
3.1.3	Areia .....	29
3.1.4	Cal hidráulica .....	30
3.2	Definição da matriz de misturas .....	30
3.3	Procedimento de mistura .....	32
3.4	Procedimentos de ensaio .....	38
3.4.1	Massa volúmica aparente .....	38
3.4.2	Retração .....	38
3.4.3	Velocidade de propagação de ultrassons e módulo de elasticidade dinâmico .....	39
3.4.4	Resistência à flexão .....	41
3.4.5	Resistência à compressão .....	43
3.4.6	Teor de humidade em equilíbrio .....	44
4	Resultados e discussão .....	46
4.1	Apresentação dos resultados .....	46
4.2	Discussão dos resultados.....	47
4.2.1	Influência da quantidade de fibras .....	47
4.2.2	Influência do comprimento das fibras de lã .....	55
4.2.3	Influência da Percentagem de Argila .....	60
4.2.4	Influência da adição de cal hidráulica .....	70
4.2.5	Influência da massa volúmica.....	75
4.3	Discussão geral dos resultados .....	79
5	Conclusões e trabalhos futuros .....	81
5.1	Conclusões.....	81
5.2	Trabalhos futuros.....	83

Referências Bibliográficas .....	84
Anexos .....	89
Anexo 1: Ficha técnica Cal Hidráulica Secil .....	89
6    Apêndice .....	93

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Solo Argiloso .....	6
Figura 2 - Capacidade de Troca Catiônica .....	8
Figura 3 - Capacidade de Expansão .....	9
Figura 4 - a) Produção de adobes; b) Tinta de argila; c) Tijolo Cerâmico .....	10
Figura 5 - Tipo de Fibras .....	11
Figura 6 - Lã de Ovelha.....	12
Figura 7 - Cânhamo - Planta e Fibra.....	14
Figura 8 - Sisal - Planta e Fibra.....	15
Figura 9 - Linho - Planta e Fibra .....	16
Figura 10 - Juta - Planta e Fibra .....	16
Figura 11 - Solo Argiloso antes e depois da secagem e destorroamento.....	23
Figura 12 - Preparação da amostra para o ensaio de sedimentação - a) Amostra de solo; b) Mistura do com a solução.....	24
Figura 13 - Curva granulométrica solo argiloso.....	24
Figura 14 - Ensaio de limites de consistência.....	25
Figura 15 - Ensaio adaptado de determinação da massa volúmica aparente solo.....	26
Figura 16 - Aparência da a) Lã não lavada; b) Lã lavada.....	27
Figura 17 - Ensaio adaptado para a determinação da massa volúmica aparente da lã.....	27
Figura 18 - Corte das fibras de lã .....	29
Figura 19 - Curva Granulométrica da Areia.....	29
Figura 20 - Curvas granulométricas dos agregados .....	32
Figura 21 - Ensaio de espalhamento .....	33
Figura 22 - Relação $A/(S+Ar)$ - Percentagem de Argila.....	34
Figura 23 - Processo de mistura: (a) Molhagem das fibras; (b) Pré-mistura manual dos materiais; (c) Mistura dos materiais .....	36
Figura 24 - (a) Pós-Mistura; (b) Agregação das Fibras .....	36
Figura 25 - Moldagem da Mistura .....	37

Figura 26 - a) Provetes armazenados na câmara climática; b) Condições da câmara climática.....	37
Figura 27 - Retração visível nos moldes.....	39
Figura 28 - Equipamento Pundit Lab .....	40
Figura 29 - Módulo de Elasticidade Dinâmico - método direto .....	41
Figura 30 - a) Equipamento utilizado no ensaio de Flexão; b) Fendilhação do Provete .....	42
Figura 31 - Comportamento das fibras após rotura do provete.....	42
Figura 32 - a) Provetes após a divisão manual; b) Ensaio à compressão .....	43
Figura 33 - a) Pesagem das amostras; b) Amostras retiradas .....	44
Figura 34 - Influência da quantidade de fibras na resistência à flexão .....	48
Figura 35 - Curvas tensão de flexão - deflexão da família de misturas S40A60 .....	49
Figura 36 - Influência da quantidade de fibras na resistência à compressão .....	50
Figura 37 - Curvas tensão de compressão/extensão da família de misturas S50A50 .....	50
Figura 38 - Influência da quantidade de fibras na massa volúmica.....	51
Figura 39 -Influência da quantidade de fibras na velocidade Propagação Ultrassons .....	52
Figura 40 - Influência da quantidade de fibras no módulo de elasticidade dinâmico .....	53
Figura 41 - Influência da quantidade de fibras no teor de humidade em equilíbrio .....	54
Figura 42 - Influência da quantidade de fibras de lã na retração .....	55
Figura 43 - Influência do comprimento das fibras na resistência à flexão .....	55
Figura 44 - Influência do comprimento das fibras na resistência à compressão.....	56
Figura 45 - Influência do comprimento das fibras na massa volúmica.....	57
Figura 46 - Influência do comprimento das fibras na velocidade propagação ultrassons .....	58
Figura 47 - Influência do comprimento das fibras no módulo de elasticidade dinâmico .....	58
Figura 48 - Influência do comprimento das fibras no teor de humidade em equilíbrio.....	59
Figura 49 - Influência do comprimento das fibras na retração.....	60
Figura 50 - Influência da percentagem de argila na resistência à flexão (misturas sem cal hidráulica)	61
Figura 51 - Influência da percentagem de argila na resistência à flexão (misturas com cal hidráulica)	61
Figura 52 - Influência da percentagem de argila na resistência à compressão (mistura sem cal hidráulica)	62
.....	62
Figura 53 - Influência da percentagem de argila na resistência à compressão (mistura com cal hidráulica)	63
.....	63
Figura 54 - Influência da percentagem de argila na massa volúmica (mistura sem cal hidráulica) .....	64
Figura 55 - Influência da percentagem de argila na massa volúmica (mistura com cal hidráulica) .....	64

Figura 56 -Influência da percentagem de argila na velocidade de propagação ultrassons (mistura sem cal hidráulica) .....	65
Figura 57 - Influência da percentagem de argila na velocidade de propagação ultrassons (mistura sem cal hidráulica).....	65
Figura 58 - Influência da percentagem de argila no módulo de elasticidade dinâmico (mistura sem cal hidráulica) .....	66
Figura 59 - Influência da percentagem de argila no módulo de elasticidade dinâmico (mistura com cal hidráulica) .....	67
Figura 60 - Influência da percentagem de argila no teor de humidade em equilíbrio (mistura sem cal hidráulica) .....	67
Figura 61 - Influência da percentagem de argila no teor de humidade em equilíbrio (mistura com cal hidráulica) .....	68
Figura 62 - Influência da percentagem de argila na retração (mistura sem cal) .....	69
Figura 63 Influência da percentagem de argila na retração (mistura com cal) .....	69
Figura 64 – Influência da cal hidráulica na resistência à flexão .....	70
Figura 65 - Influência da cal hidráulica na resistência à compressão .....	71
Figura 66 - Influência da cal hidráulica na massa volúmica .....	72
Figura 67 - Influência da cal hidráulica na velocidade de propagação de ultrassons .....	72
Figura 68 - Influência da cal hidráulica no módulo de elasticidade dinâmico .....	73
Figura 69 - Influência da cal hidráulica no teor de humidade em equilíbrio .....	74
Figura 70 - Influência da cal hidráulica na retração.....	74
Figura 71 - Influência da massa volúmica na resistência à flexão.....	75
Figura 72 - Influência da massa volúmica na resistência à compressão .....	76
Figura 73 - Influência da massa volúmica na velocidade de propagação de ultrassons.....	76
Figura 74 - Influência da massa volúmica no módulo de elasticidade dinâmico.....	77
Figura 75 - Influência da massa volúmica no teor de humidade em equilíbrio .....	78
Figura 76 - Influência da massa volúmica na retração .....	78

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Enquadramento

A utilização de materiais de construção com elevada energia incorporada, desde a extração da matéria-prima ao transporte e processamento, é um problema relevante associado à sustentabilidade na construção, não contribuindo para as metas de descarbonização definidas pela União Europeia para 2050.

Para além do objetivo da neutralidade carbónica, é também essencial uma especial atenção à humidade do ar no interior dos edifícios, pois uma humidade relativa elevada pode ter consequências nefastas no edifício e nos seus ocupantes. A ocorrência de condensações e o aparecimento de bolor facilitam o desenvolvimento de bactérias e outras consequências negativas, tendo um impacto considerável na saúde e bem-estar dos utilizadores do edifício. Atualmente, é fulcral o desenvolvimento e estudo de sistemas construtivos com um baixo impacto ambiental e um elevado desempenho, contribuindo para as condições de conforto, saúde e bem-estar dos ocupantes dos edifícios.

No âmbito do Projeto ClaySkin, foi proposto o desenvolvimento de painéis de revestimento produzidos à base de fibras naturais, argila ou solo e adições (cimento, areia e cal), com baixa energia incorporada que podem beneficiar da capacidade de isolamento e propriedade higroscópica destes materiais, melhorando o desempenho térmico dos edifícios, contribuindo para o controlo da humidade relativa e para a melhoria da qualidade do ar interior.

O primeiro passo para o desenvolvimento dos painéis é o estudo da(s) melhor(es) composição(s) das misturas que serão usadas nos painéis de revestimentos, sendo este o contributo desta dissertação no âmbito do Projeto ClaySkin.

## 1.2 Objetivos

A presente dissertação tem como principal objetivo, a avaliação das características e do comportamento de misturas com vista à execução de um painel de revestimento, de forma a contribuir para o desempenho térmico e higrotérmico dos edifícios. Para tal, é necessário desenvolver uma mistura com as propriedades mecânicas que satisfaçam os requisitos mínimos para este tipo de painel. Esta solução

será constituída por uma mistura de solo argiloso, areia e fibras, podendo ou não, apresentar um ligante na sua matriz. Assim sendo o objetivo principal, divide-se nos seguintes sub-objetivos:

- Definir e caracterizar experimentalmente o comportamento mecânico das misturas;
- Identificar os tipos de relação entre solo argiloso-fibras;
- Analisar a quantidade de fibras e de areia a incorporar nas misturas;
- Avaliar o impacto da adição de um ligante nas misturas;
- Pré-selecionar um conjunto de misturas para o desenvolvimento posterior dos painéis ClaySkin.

### 1.3 Organização da dissertação

A presente dissertação está estruturada em cinco capítulos. De seguida é apresentado um breve resumo do que é apresentado em cada capítulo.

No capítulo 1 é exposto o enquadramento do estudo a ser realizado bem como os seus objetivos.

No capítulo 2 apresenta-se uma breve pesquisa bibliográfica sobre painéis de revestimento à base de solo argiloso e fibras naturais e sobre materiais que podem ser integrados no desenvolvimento da composição dos painéis. Desta forma, foi feito um levantamento sobre as características do solo argiloso, do seu modo de funcionamento e das suas propriedades, um levantamento de vários tipos de fibras que podem ser usadas e as suas propriedades e por fim um levantamento de soluções de revestimento existentes no mercado bem como das suas propriedades.

No Capítulo 3 é definida a matriz de misturas, bem como o procedimento de mistura e os procedimentos de ensaio utilizados para a sua caracterização.

No Capítulo 4 é realizada uma apresentação, comparação e conclusão dos resultados obtidos no estudo desenvolvido, nomeadamente o estudo da influência de cada uma das variáveis como por exemplo a quantidade de fibras, comprimento de fibras, percentagem de argila entre outras, avaliadas nas diferentes misturas.

No Capítulo 5 são apresentadas as conclusões do trabalho realizado com base nos resultados obtidos durante o desenvolvimento das misturas idealizadas e ensaiadas. Por fim, são apresentadas algumas ideias para trabalhos futuros, numa perspetiva de continuidade do estudo elaborado.



## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é feito um levantamento de conhecimentos úteis para o desenvolvimento do tema em estudo, abordando de uma forma breve as características de painéis de revestimento, apresentando possíveis materiais a utilizar na sua elaboração e comentando algumas soluções comerciais já presentes no mercado.

### 2.1 Painéis à base de solo argiloso

Os painéis à base de solo são um tipo de material muito explorado e utilizado na Alemanha, onde existem várias empresas especializadas neste ramo como por exemplo a ClayTec, Dachverband Lehm e.V. ou Lehmbaustoffe Schleusener.

Os painéis deste tipo são, geralmente, produzidos através da mistura de solo argiloso, que atua como ligante, areia, para a estabilização da mistura, água, fibras naturais, que melhoram as propriedades mecânicas, e a adição ou não de algum tipo de aditivo. Segundo as empresas produtoras, este tipo de painéis pode ser aplicado em tetos, paredes não estruturais, quer como uma camada interior, quer como um revestimento, ou então, como um substituto das paredes “tradicionalis” de gesso cartonado (Dachverband, 2022).

Este tipo de painéis é mais pesado do que as placas de gesso cartonado e apresentam uma maior espessura, mas apresentam um bom comportamento térmico e uma capacidade de difundir vapor água. Estes painéis têm também a capacidade de regulação da humidade, absorvendo-a quando esta é elevada e libertando-a quando esta é baixa (Greenspec, 2022).

Na Tabela 1 é apresentada uma comparação das características de um painel de solo argiloso com uma placa de gesso cartonado. Analisando-se os valores é possível verificar uma grande diferença nas características dos dois produtos. No caso do painel à base de solo, é possível verificar que a massa volúmica deste é superior ao dobro da massa volúmica da placa de gesso cartonado. Além disso, a resistência à flexão é metade do valor da resistência à flexão da placa de gesso cartonado. Quanto ao desempenho térmico, os painéis à base de solo argiloso apresentam o dobro da condutibilidade térmica das placas de gesso cartonado.

Atualmente, só existe uma norma alemã relativa ao desempenho de placas/painéis de argila. A norma DIN 18948:2018-12, define uma série de requisitos que este tipo de materiais deve obedecer de modo

a ser aprovado e utilizado. Na Tabela 2, são apresentados os requisitos mínimos mecânicos dos painéis à base de solo argiloso segundo a DIN 18948:2018-12.

Tabela 1 - Comparação de um painel à base de solo argiloso com uma placa de gesso cartonado

Características	Painel à base de solo (ClayTec)	Placa Gesso Cartonado (Gyptec)
Espessura (mm)	16	15
Comprimento (mm)	1250	2000-3000
Massa Volúmica (kg/m <sup>3</sup> )	1450	607
Resistência à flexão (N/mm <sup>2</sup> )	0,8	1,6
Condutibilidade Térmica (W/m.°C)	0,353	0,185
Referências	(ClayTec, 2022)	(Gyptec, 2022)

Tabela 2 - Requisitos mínimos para resistência à tração superficial e resistência à flexão segundo a DIN 18948:2018-12

Resistência à tração superficial (N/mm <sup>2</sup> )	≥ 0,1
Resistência à flexão (N/mm <sup>2</sup> )	≥ 0,8

Na norma DIN 18948:2018-12 é também feita uma classificação em função da densidade do painel. Nessa classificação, da classe 0.6 a 1.2, a massa volúmica varia entre os 510 kg/m<sup>3</sup> e os 1200 kg/m<sup>3</sup>, os painéis são considerados painéis de argila leve. Da classe 1.4 à 2.2, a massa volúmica varia entre os 1210 kg/m<sup>3</sup> e os 2200 kg/m<sup>3</sup>, são considerados painéis de argila.

Para além da classificação quanto à massa volúmica, é feita também a classificação dos painéis consoante a sua tolerância à humidade, capacidade de adsorção de água e comportamento ao fogo.

## 2.2 Solo argiloso

Utilizado ao longo dos tempos, o solo argiloso (Figura 1), mais precisamente os seus minerais argilosos são materiais com uma ótima perspetiva para o futuro da indústria da construção devido às suas inúmeras propriedades úteis, ao seu baixo custo, baixo impacto ambiental e também ao seu fácil acesso, pois devido à sua elevada difusão, em qualquer parte do mundo é possível encontrar um depósito de um ou outro tipo de argila. Devido às suas características, este solo tem vindo a atrair a atenção e investimento substancial a nível mundial em investigação e desenvolvimento (Kumari & Mohan, 2021).

A argila é uma rocha natural, granular, macia de grão fino ou material terroso, de dimensões muito reduzidas (Porto Editora, 2022) com dimensão inferior a 2  $\mu\text{m}$  (Tan et al., 2017)). Esta é composta essencialmente por materiais inorgânicos provenientes da meteorização e erosão de outras rochas e apresenta uma variedade de matérias na sua composição, como por exemplo, solo, minerais, entre outros sedimentos. Existem diversos tipos de argilas, com vários tipos de origem desde a sedimentação até à síntese hidrotérmica e com diferentes tipos de minerais de argila como por exemplo a caulinite, ilite e montmorilonite (Bergaya & Lagaly, 2013).

A composição química e mineral do solo argiloso é um tema complexo comparando com a de outras rochas. Diferenças a nível dos minerais argilosos de diferentes tipos, imperfeições estruturais, diferenças na cristalinidade e a presença de impurezas são alguns dos problemas relacionados com a dificuldade de identificação e quantificação das argilas (Nadziakiewicz et al., 2019).

O solo argiloso pode aparecer em diferentes formas de cores, do branco ao cinzento baço ou do castanho ao vermelho alaranjado, em função do conteúdo do solo. Normalmente, a diferente coloração do solo em condições iguais, traduzem-se em diferentes propriedades do solo (Robert et al., 2020).



Figura 1 - Solo Argiloso (Moraes, 2022)

### 2.2.1 Argila Vs Minerais de argila

A definição de “Argila” foi pela primeira vez formalizada em 1546 mas desde então esta definição foi revista várias vezes devido a incongruências notadas com novas descobertas relacionadas com este material. Mackenzie (1963), constatou que na definição de argila, todos os minerais na sua constituição eram considerados minerais argilosos, contudo, com a pesquisa realizada a este material, isso não era a verdade (Guggenheim & Martin, 1995). Foi, portanto, necessário distinguir e clarificar estas duas definições.

O termo “Argila” refere-se então a um material originado naturalmente, constituído primariamente por minerais finos, que normalmente apresenta um comportamento plástico quando na presença de água e que endurece quando seco ou aquecido. Apesar da argila possuir minerais filossilicatos, esta pode conter outro tipo de materiais que contribuem ou não para a sua plasticidade e endurecimento. Também pode conter matéria orgânica.

O termo “Mineral de Argila” refere-se, geralmente, aos minerais filossilicatos e outro tipo de materiais que têm impacto na plasticidade da argila e no endurecimento quando esta é seca ou aquecida (Guggenheim & Martin, 1995).

Estes minerais podem ser naturais ou sintéticos, filossilicatos ou não-filossilicatos e não apresentam um tamanho tipo (Bergaya & Lagaly, 2013). A composição química e estrutural dos minerais argilosos é semelhante aos minerais primários que provêm da crosta terrestre, principalmente das rochas metamórficas ou magmáticas (Kumari & Mohan, 2021).

## 2.2.2 Propriedades da argila

### *Relação água – argila*

As propriedades químicas e físicas dos minerais argilosos estão diretamente ligadas a algum aspeto de como a água interage com a superfície da argila. Os minerais de argila possuem água na sua constituição de várias formas. Esta pode estar inserida em poros e posteriormente pode ser evaporada devido às condições climáticas, pode ser adsorvida na superfície estrutural do mineral argiloso, ou então em minerais argilosos como vermiculite, sepiolite, esmectite, haloisite hidratada, paligorsquite, a água pode aparecer em camadas intermédias ou em canais estruturais (Grim & Kodama, 2022).

A capacidade de retenção de água varia com o conteúdo argiloso bem como com o tamanho das partículas elementares de argila (Bruand & Tessier, 2000).

### *Capacidade de troca catiónica*

A Capacidade de Troca Catiónica (Figura 2) pode ser definida como a quantidade de catiões disponíveis para troca a um certo nível de pH e normalmente está relacionada com a carga da camada. Estes minerais são capazes de adsorver certos iões e retê-los na sua superfície sem que estes afetem a sua estrutura básica de silicato podendo estes iões depois ser facilmente trocados por outros iões (Bergaya et al., 2006). Fatores como o tamanho, a natureza da partícula, a temperatura, a estrutura cristalina, a força do ião, o pH do meio, influenciam a capacidade de troca de iões (Tertre et al., 2013).

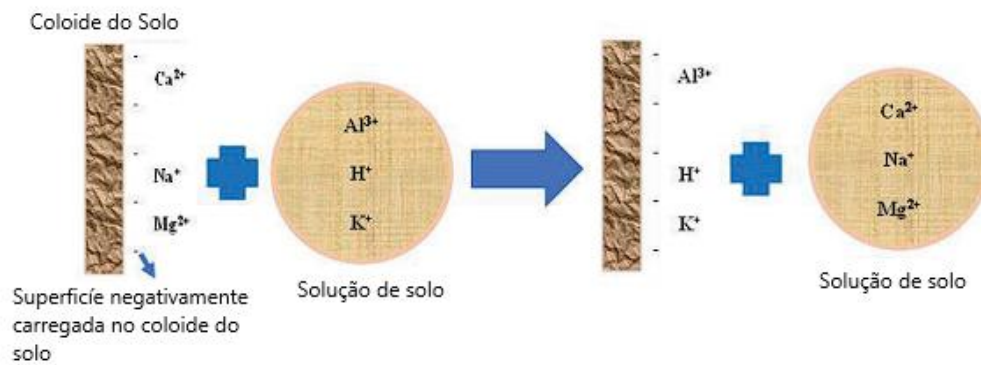


Figura 2 - Capacidade de Troca Catiônica (Adaptado de (Kumari & Mohan, 2021))

### *Capacidade de expansão*

A capacidade de expansão de um solo argiloso é afetada pelo tipo e quantidade de minerais argilosos, nível de saturação, nível de vazios e quantidade de água presente (Meshram et al., 2021).

Num ambiente controlado, os minerais de argila secos ao adsorverem água, vão adicioná-la nas camadas intermédias provocando uma expansão do espaço entre camadas. Isto apenas ocorre num grupo restrito de minerais argilosos, como por exemplo a esmectite e a vermiculite. Este grupo de minerais apresenta como especificidade um maior espaço entre camadas estruturais intermédias relativamente aos minerais argilosos não expansíveis. Quanto maior for o espaço intermédio maior é a capacidade de expansão. O aumento dos espaços entre camadas dos minerais argilosos é consequência das forças energéticas de hidratação associadas à interação das partículas (Kumari & Mohan, 2021).

A capacidade de expansão (Figura 3) pode depender de fatores como a densidade da carga das camadas de minerais argilosos, o tipo de iões entre camadas, a concentração de iões presentes na solução envolvente com minerais de argila, a quantidade de água presente nas camadas intermédias dos minerais de argila e por fim o tipo e quantidade de minerais de argila (Ghasemi & Sharifi, 2021).

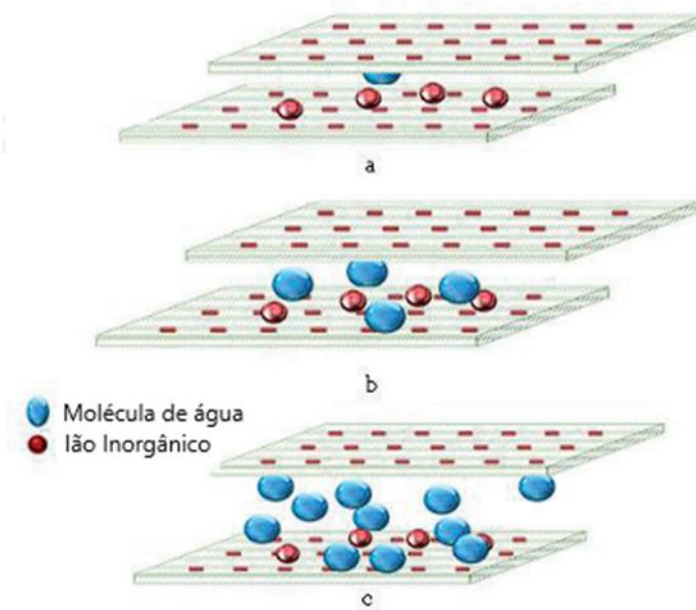


Figura 3 - Capacidade de Expansão (Adaptado de (Kumari & Mohan, 2021))

### *Plasticidade*

A plasticidade pode ser definida como a propriedade de um material que permite a deformação sob tensão sem romper e manter a forma produzida após a tensão ter sido removida. É a propriedade que permite que o material seja moldado pela aplicação de uma força. Os materiais cerâmicos em geral desenvolvem a plasticidade quando estão misturados com quantidades relativamente pequenas de água. Esta é uma propriedade importante e é afetada pela composição dos minerais, substâncias orgânicas presentes, área específica da superfície, estado de dispersão das partículas, o tamanho destas e por fim pelas características da água (Lagaly, 2006).

Existe um método, denominado o método Atterberg, que permite a determinação da quantidade de água necessária para alcançar um ponto de plasticidade ótimo. Este método estabelece um limite de água máximo para quando o material começa a ficar fluido e um limite mínimo de água onde a argila pode ser trabalhada sem correr risco de rotura. A diferença entre estes dois limites traduz um indicador de plasticidade. Quanto maior for a quantidade de água presente nos minerais de argila maior é a plasticidade, sendo que o limite máximo varia consoante a natureza da argila (Haigh et al., 2013).

### 2.2.3 A utilização da argila na construção

Num setor tão importante e antigo como é o setor da construção, a utilização de uma diversidade de materiais, como o cimento, a cal, a argila, a madeira, os metais, entre outros depende das suas propriedades e dos custos envolvidos.

Atualmente, o cimento é o principal ligante utilizado na construção, contudo este consome uma elevada quantidade de energia a ser produzido e ao mesmo tempo emite cerca de 7% do CO<sub>2</sub> responsável pelo aquecimento global. Desta forma é necessária a inclusão no mercado da construção de outros tipos de materiais com propriedades semelhantes que satisfaçam as necessidades e que por sua vez apresentem um impacto ambiental inferior ao apresentado pelo cimento e outros materiais ligantes correntemente utilizados (Singh, 2022).

A argila é uma das matérias-primas presente desde sempre no nosso planeta, sendo esta utilizada ao longo dos tempos pelas várias civilizações que existiram e existem atualmente.

Na Idade Antiga, período entre os 3500 A.C. e os 476 D.C., a argila era utilizada como uma argamassa no processo de fabrico de blocos cerâmicos na construção. Na altura, a argila simples ou com a combinação de outro tipo de ligante de cal representavam o principal ligante usado na execução de alvenaria (Diaconu et al., 2017).

Nos tempos atuais, a argila permanece um material enúmeras vezes utilizado no setor da construção como por exemplo em tijolos de alvenaria, blocos de terra comprimida, argamassas, tintas entre outros (Figura 4).

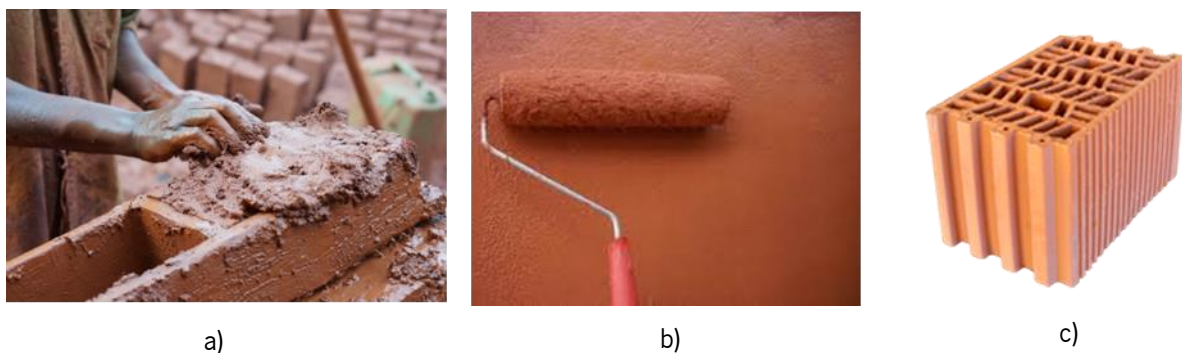


Figura 4 - a) Produção de adobes (Nordin, 2020); b) Tinta de argila (Redação Pensamento Verde, 2016); c) Tijolo Cerâmico (Priceram, 2022)

No futuro, um grande desafio relacionado com a utilização da argila e de materiais que possuam argila é descobrir e analisar novos métodos mais sustentáveis e amigos do ambiente de mistura, estabilização,

sinterização, cura e secagem deste material e comparar características ambientais e económicas de modo a tornar este material mais viável na sua utilização (Shubbar et al., 2019).

### 2.3 Fibras naturais

O reforço dos painéis à base de argila com fibras tem-se revelado um método bastante eficiente no aumento da resistência mecânica e também no comportamento da retração dos painéis.

Com o aparecimento das fibras sintéticas a utilização fibras naturais caiu para um segundo plano. Contudo esta tendência tem vindo a alterar-se e as fibras naturais recomeçaram a assumir-se como um recurso viável e vistas como uma alternativa melhor ao uso de fibras sintéticas. Estas podem ser aplicadas, sozinhas ou combinadas, com outro tipo de material de diferentes campos, desde a indústria têxtil, passando pela indústria automóvel até à indústria da construção. Comparativamente às fibras sintéticas, estas apresentam um conjunto de vantagens como por exemplo, baixo custo, baixa densidade, sustentabilidade, biodegradabilidade, reciclagem e por fim as suas propriedades são similares ou melhores do que as apresentadas pelas fibras sintéticas (Mohanty et al., 2005).

As fibras podem ser classificadas consoante a sua origem e segundo o seu tipo, origem vegetal, animal ou mineral como se pode ver na Figura 5.

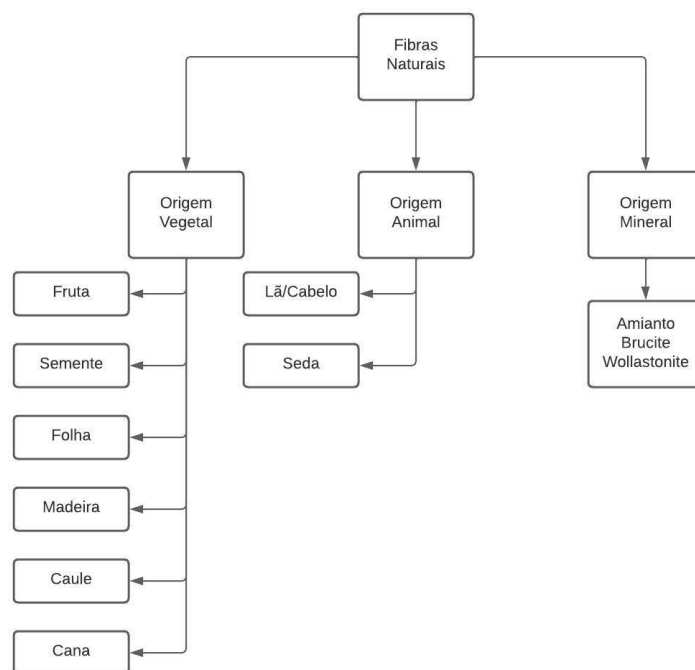


Figura 5 - Tipo de Fibras (Adaptado de (Bismarck et al., 2005))



Nas secções seguintes são apresentadas algumas fibras naturais e as suas características mais relevantes.

### 2.3.1 Lã de ovelha

A ovinocultura é uma exploração muito presente na cultura portuguesa, com as estatísticas a registar cerca de 2200000 ovinos em Portugal, distribuídos igualmente entre o Norte e o Sul do Tejo (INE, 2016). A produção de lã foi, durante muito tempo, umas das principais motivações para a exploração ovina, paradigma este que foi alterado devido ao aparecimento das fibras sintéticas, focando-se esta exploração na produção de carne e leite, tornando a lã (Figura 6) num subproduto desta exploração e direcionando-a para um papel secundário.

Contudo, a produção desta matéria-prima mantém-se devido à necessidade da tosquia anual dos animais gerando uma elevada quantidade de uma matéria-prima que pode ser utilizada em vários campos desde a moda passando pela arquitetura e acabando na medicina. A lã de ovelha é um material natural, não poluente, reciclável, reutilizável, durável e muito versátil, apresentando diversas propriedades úteis em vários campos da ciência (Santos et al., 2019).



Figura 6 - Lã de Ovelha

#### *Capacidade de absorção*

As fibras da lã apresentam um comportamento higroscópico graças à presença de um ou mais grupos de macromoléculas com a capacidade de atração de água, dando-lhe a capacidade de absorção de 33 a 34% do seu peso seco. A capacidade de absorção é inversamente proporcional ao diâmetro da fibra (Hearle, 2002).

A absorção de água pode ocorrer devido a diferentes fenómenos. A água liga-se a grupos hidrofílicos presentes nas proteínas, sendo este fenómeno resultado da quebra das ligações das moléculas de hidrogénio com as cadeias proteicas devido a um aumento das moléculas de água na superfície e nos espaços intercelulares (Io Nostro et al., 2002).

Como consequência da absorção de água por parte das fibras, estas expandem o seu tamanho pois a absorção da água por parte da matriz vai aumentar o espaço entre as fibrilhas da lã. Esta expansão ocorre quando as moléculas de água entram na zona de ligação das moléculas de hidrogénio à matriz da lã, desfazendo estas ligações. Quando mais inchada estiver a fibra maior é a absorção (Tuzcu, 2007).

#### *Comportamento higrotérmico*

Esta propriedade da lã tem sido muito estudada devido à sua grande utilidade no setor da indústria têxtil, tendo um grande impacto no conforto do utilizador.

Durante a fase de absorção da humidade é produzido calor, provocando um aumento da temperatura da fibra. No processo inverso, quando a fibra liberta humidade há uma redução da temperatura. A quantidade de calor gerado varia consoante a humidade relativa, assumindo uma tendência positiva com o aumento da humidade relativa. Nenhuma outra fibra consegue produzir o mesmo calor que as fibras de lã (Stuart et al., 1989).

#### *Capacidade antibacteriana*

Atualmente, na bibliografia não existe ainda uma certeza sobre as propriedades antibacterianas da lã (Caven et al., 2019). Contudo existem duas possíveis razões para a presença desta propriedade neste material. A primeira delas revela que a própria fibra pode apresentar um efeito antibacteriano, ou seja, a camada lipídica e o córtex da fibra têm um comportamento antibacteriano. A segunda teoria tem como base uma propriedade intrínseca da lã possuir um núcleo hidrocópico e uma superfície hidrofóbica criando assim condições hostis na proximidade da fibra para o desenvolvimento bacteriano. De salientar que a capacidade de captação odores da lã pode dar uma falsa sensação da ausência de bactérias sem realmente prevenir ou inibir o seu desenvolvimento (Caven et al., 2019).

Em Yusuf et al (2012) o tecido de lã quando tingida com extrato de folhas de hena mostrou um bom comportamento antibacteriano para várias espécies bacterianas.

### *Encrespamento*

O encrespamento é a conturbação e enrugamento das fibras de lã e isto permite que as fibras se mantenham juntas durante a fiação, melhorando a coesão das fibras. Quanto mais pequeno o diâmetro da fibra mais ondulada e mais frisada são as fibras por centímetro. Esta propriedade é afetada pela humidade do ambiente envolvente. O encrespamento das fibras de lã aumenta o volume e consegue reter uma grande quantidade de ar entre as fibras o que proporciona uma boa capacidade isolante (Tuzcu, 2007).

### 2.3.2 Cânhamo

O cânhamo (Figura 7) é uma planta da família *Cannabaceae*, originária da zona central da China, que se espalhou para o mundo inteiro e agora é cultivada em vários países de clima temperado.

Trata-se de uma fibra vegetal orgânica, proveniente do caule da planta cânhamo, e que é obtida através de vários processos como secagem, maceração, esmagamento e por fim um processo de agitação para a separação das fibras. Geralmente, estas fibras apresentam um comprimento superior a 1,8 m e são feitas de células individuais cilíndricas com superfícies irregulares (Ramesh, 2018).



Figura 7 - Cânhamo - Planta e Fibra (de Marco, 2021; Marketing Agropress, 2022)

A resistência à tração é uma das principais propriedades da fibra de cânhamo apresentando excelentes valores nesta propriedade mecânica. Com o processo de maceração a fibra torna-se mais dura e resistente, mas no sentido inverso, perde elasticidade e a capacidade de alongamento (Bismarck et al., 2005).

### 2.3.3 Sisal

O sisal (Figura 8) é uma planta da família *Agavaceae*, originária da América Central, mais precisamente do México, sendo que atualmente a Tanzânia e o Brasil são os maiores produtores desta planta.

A fibra de sisal é uma fibra dura e é extraída das folhas verdes. Depois de colhida é lavada e colocada a secar ao sol. É uma das fibras mais exploradas, sendo em média produzidas aproximadamente 4,5 milhões de toneladas anualmente em todo o mundo. O comprimento desta fibra varia entre os 0,6 a 1,5m e o seu diâmetro varia entre os 100 a 300  $\mu\text{m}$ .

As fibras de sisal são sensíveis à temperatura, sendo que com o seu aumento, a suas propriedades como resistência à tração, módulo de elasticidade e dureza tendem a diminuir. As suas propriedades de tração não são uniformes ao longo do seu comprimento. O preço das fibras de sisal é muito inferior ao preço de outras fibras naturais e até mesmo sintéticas (Bismarck et al., 2005).



Figura 8 – Sisal - Planta e Fibra (Cotesi, 2016; Wikipedia, 2021)

### 2.3.4 Linho

Da família *Linaceae*, o linho (Figura 9) é uma planta que se desenvolve em regiões com um clima temperado e estima-se que seu cultivo começou há 10000 anos, sendo esta uma das fibras a mais antigas conhecidas (Goyal et al, 2014).

A planta cresce num período compreendido entre os 80 a 110 dias e a altura varia entre os 0,80 a 1,5 m. Quando o objetivo é utilizar as fibras do linho, apenas a parte central da planta é aproveitada (cerca de 75% da sua altura), e desta forma as suas fibras variam entre os 0,60 a 1,4 m de comprimento. Por sua vez, o diâmetro varia entre os 40 a 80  $\mu\text{m}$  (Bismarck et al., 2005).

Estas fibras são pouco extensíveis, muito elásticas e muito resistentes. Suportam temperaturas a rondar 200°C sem se decomporem, mas em contacto direto com a luz solar estas tendem a perder, gradualmente, a sua resistência. Devido à elevada quantidade de mão de obra para a sua preparação, estas fibras, comparativamente com outro tipo de fibras, são mais caras (Bismarck et al., 2005).



Figura 9 - Linho - Planta e Fibra (Bernardo, 2022; Guichon, 2019)

#### 2.3.5 Juta

Originária das regiões tropicais Asiáticas, a juta (Figura 10) é uma planta da família *Tiliaceae*, e a sua fibra é versátil, amiga do ambiente, natural e durável. A planta demora cerca de 3 meses a alcançar a sua altura máxima (entre os 2 a 4 m) e as fibras de juta apresentam dimensões entre o 1,5 e 3 m de comprimento. São consideradas as fibras vegetais mais higroscópicas, mas a sua longevidade é extensa quando totalmente secas. Apresentam pequena resistência à humidade e também a ácidos e tal como outras fibras. Quando expostas à luz solar as suas fibras tendem a perder a sua resistência à tração (Bismarck et al., 2005).



Figura 10 - Juta - Planta e Fibra (de Souza, 2010)

### 2.3.6 Comparação das propriedades das fibras

Na Tabela 3, são apresentados alguns valores de propriedades mecânicas das fibras expostas anteriormente. As fibras apresentam uma densidade muito parecida, mas nas restantes propriedades existe uma maior disparidade de resultados. De salientar que no caso das fibras de lã, o nível de humidade que apresentam, tem um impacto significativo nas suas propriedades, podendo os seus valores duplicarem consoante o nível de humidade.

Numa comparação breve entre as fibras naturais de origem animal (Lã) e as fibras naturais de origem vegetal (Cânhamo, Sisal, Linho e Juta) observa-se uma maior resistência à tração e um maior módulo de elasticidade nas fibras de origem vegetal. Quanto ao alongamento na rotura, as fibras de lã apresentam uma maior extensão de alongamento relativamente às fibras vegetais.

Tabela 3 - Propriedades das fibras

Fibra	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	Alongamento na rotura (%)	Resistência à tração (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Referência
Lã	1,07-1,3	25-50	100-350	2-5	(Popescu & Wortmann, 2010); (Merrick, 1998); (Ahmad Wani & ul Rehman Kumar, 2021)
Cânhamo	1,47-1,5	1,6-40	550-900	34-70	(Maia et al., 2018)
Sisal	0,9-1,5	2-14	347-700	9-38	
Linho	1,4-1,5	1,2-3,2	345-1500	27,6-80	
Juta	1,3-1,48	1,5-1,9	393-800	10-30	

## 2.4 Solo argiloso e fibras naturais

Com a crescente procura de novos tipos de materiais e métodos de construção sustentáveis o número de estudos realizados onde o solo argiloso é utilizado juntamente com fibras naturais tem crescido (Gowthaman et al., 2018). Com isto é possível, numa primeira fase, perceber que tipo de vantagens e desvantagens apresenta esta combinação de matérias-primas no desenvolvimento de argamassas, blocos ou painéis de revestimento.

Eires et al. (2014) num trabalho desenvolvido sobre argamassas de terra e cal reforçadas com fibras naturais, com o principal objetivo de melhorar as características básicas deste tipo de argamassas, estudou a adição de fibras de banana, coco e sisal numa argamassa padrão de terra (com 18% de argila)

e cal. Com a adição de 0,24% de fibras (em relação à massa da mistura seca) obteve um bom comportamento na fendilhação/fissuração por retração, destacando a redução deste problema, e as propriedades mecânicas cumpriam os requisitos mínimos estipulados pelas normas associadas.

Sabbà et al.(2021) num estudo sobre construção em taipa, caracterizou um tipo de taipa (com 16% de argila após correção) corrigida com areia e cascalho com adição de 0,25% de fibras de palha (em relação à massa da taipa). O objetivo da utilização, que se veio a comprovar, das fibras de palha foi melhorar as propriedades mecânicas mais especificamente a resistência à tração e ductilidade do material.

Para além da sustentabilidade, a argila e as fibras naturais podem contribuir para a melhoria do ambiente graças às suas propriedades térmicas e higrotérmicas (Ramakrishnan et al., 2021).

A qualidade do ar interior das habitações tem sido uma das principais preocupações, tendo este fator vindo a agravar-se ao longo do tempo sendo sinalizado internacionalmente pela Organização Mundial de Saúde com a origem do conceito Síndrome do Edifício Doente, em meados do século XX, associado a uma série de queixas e desconforto ambiental relacionados com a falta de ventilação e níveis de temperatura e humidade inadequados que se vieram a agravar devido ao aparecimento da pandemia de Covid-19 que obrigou as pessoas a ficarem mais tempo em casa expostas a estas condições (Gomes et al., 2021).

#### 2.4.1 Solo argiloso e fibras Vs Humidade

A humidade relativa elevada, para além das consequências a nível comportamental do edifício, nomeadamente o menor isolamento térmico ou o aparecimento de infiltrações, pode ter outro tipo de consequências, com a ocorrência de condensações, como o aparecimento de bolor que facilita o desenvolvimento de bactérias e outras repercussões negativas, tendo impacto considerável na saúde e bem-estar dos utilizadores do edifício (Pereira, 2021).

O desenvolvimento e utilização de revestimento de superfícies tendo como base a utilização de solo, mais precisamente um solo argiloso, evitará grandes oscilações de humidade atuando desta forma como uma proteção contra estas variações de humidade, ajudando a estabelecer um equilíbrio da humidade relativa do ambiente interior nos edifícios. Esta propriedade do revestimento à base de solo é resultado da troca do vapor de água com o ar, absorvendo o vapor de água quando o ar se encontra muito húmido e libertando-o quando o ar se encontra menos húmido, ou seja, mais seco (Gomes et al., 2021).



As fibras naturais como a lã de ovelha, garantem a “respirabilidade” das superfícies. Com as variações da humidade relativa no ar, a lã apresenta a capacidade de regular a humidade através de processos de adsorção/dessorção da água atmosférica, garantindo um elevado grau de conforto (Hegyi et al., 2021).

#### 2.4.2 Solo argiloso e fibras Vs Trocas térmicas

A utilização de paredes à base de solo é uma técnica conhecida mundialmente pela sua capacidade de regular a temperatura interior, apresentando uma elevada inércia térmica evitando grandes variações da temperatura interior (Giada et al., 2019).

As fibras naturais são também um tipo de material muito utilizado como solução no isolamento térmico dos edifícios, nomeadamente, a lã, que apresenta características térmicas que asseguram nas necessidades de isolamento térmico (Hegyi et al., 2021).

## 2.5 Soluções construtivas à base de argila e/ou fibras naturais no mercado

Atualmente já existem algumas soluções no mercado com a utilização de argila, onde esta é utilizada devido às suas propriedades. Para além das suas propriedades, a baixa incorporação de energia, o seu baixo custo e facilidade de obtenção são alguns dos pontos a favor da sua utilização e investimento.

As soluções existentes no mercado à base de argila são sobretudo argamassas para rebocos, placas tipo placas de gesso cartonado, tintas e ladrilhos.

Nas tabelas seguintes são apresentadas quatro soluções que tem em comum a utilização da argila na sua composição. Os produtos apresentados na Tabela 4 e na Tabela 5, Tierrafino Clay Plaster e Tierrafino T-Paint, respetivamente, são uma argamassa e um tipo de tinta utilizadas como revestimento interior. A solução da Tabela 6, Clay Dry Plasterboard, é uma placa de revestimento interior, normalmente, para revestir superfícies de gesso cartonado antigas, ou então, para revestir betão. Na Tabela 7, a Clayboards Heavy (LEMIX) pode ser utilizada como revestimento de paredes, tetos ou fachadas, ou então como elemento autoportante, ou seja, paredes divisórias interiores. Esta solução é utilizada como alternativa às tradicionais placas de gesso cartonado e possui uma resistência à flexão de  $0,8\text{N/mm}^2$ . Estas duas soluções utilizam argila e fibras naturais, dois dos materiais que serão utilizados neste estudo.



Tabela 4 – Reboco Tierrafino Clay Plaster (Tierrafino B.V, 2022)


Composição	Propriedades	
Areia Argila	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Permeável ao vapor de água</li> <li>- Regulador de humidade e temperatura</li> <li>- Anti estático</li> <li>- Diminui a reverberação</li> <li>- Não perde a intensidade da cor com o tempo</li> <li>- 100% natural – sem aditivos químicos</li> <li>- Reutilizável e biodegradável</li> </ul>	

Tabela 5 – Tinta Tierrafino T-Paint (Tierrafino B.V, 2022)


Composição	Propriedades	
Areia Argila Aglutinante natural	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Permeável ao vapor de água</li> <li>- Regulador de humidade e temperatura</li> <li>- Anti estático</li> <li>- Diminui a reverberação</li> <li>- Não perde a intensidade da cor com o tempo</li> </ul>	

Tabela 6 – Painel Clay Dry Plasterboard (CLAYTEC GmbH & Co. KG, 2022)



Composição	Propriedades	
Argila Perlite Tapete de junco Cânhamo Malha de hessian	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Isolamento acústico</li> <li>- Proteção contra incêndios</li> <li>- Influência positiva sobre o clima térmico interior</li> <li>- Argila regula a humidade do ar e absorve os odores</li> </ul>	

Tabela 7 – Painel Clayboards Heavy (LEMIX) (CLAYTEC GmbH & Co. KG, 2022)

Composição	Propriedades	
Argila, Terra, Fibra de madeira Amido Malha de hessian	- Isolamento acústico - Proteção contra incêndios - Influência positiva sobre o clima térmico interior - Argila regula a humidade do ar e absorve os odores	

Após o levantamento de soluções comerciais existentes, a idealização deste estudo aproxima-se bastante do tipo de material Clayboard e Clay Dry Plasterboard.

### 3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Neste capítulo é descrito o programa experimental executado para o estudo de composições necessário ao desenvolvimento dos painéis de revestimento. Pretendem-se, assim, pré-selecionar os tipos de composições que apresentaram os melhores resultados para serem utilizadas em trabalhos experimentais futuros, onde será caracterizado o seu comportamento relativamente ao desempenho higratérmico dos painéis.

Numa primeira fase, definiu-se e caracterizou-se os materiais disponibilizados e utilizados. Seguidamente, foi descrito todo o processo de preparação das misturas. Idealizou-se uma matriz de composições de à base de solo argiloso a serem estudadas, nomeadamente com e sem fibras naturais e com ou sem estabilização com cal hidráulica

Depois da definição da matriz, seguiu-se o trabalho laboratorial, onde foi realizada a caracterização experimental das misturas em provetes prismáticos com as dimensões  $40 \times 40 \times 160 \text{mm}^3$ , por meio de ensaios de trabalhabilidade, retração, teor de humidade em equilíbrio e análise de propriedades mecânicas, como resistência à compressão, resistência à flexão, velocidade de propagação de ultrassons e módulo de elasticidade dinâmico das possíveis composições dos painéis.

#### 3.1 Caracterização dos materiais

Para a realização deste estudo foram utilizados os seguintes materiais: solo argiloso, lã de ovelha, areia e cal hidráulica. O critério de seleção dos materiais mais especificamente do solo argiloso e da lã de ovelha, esteve relacionado com as propriedades apresentadas que se enquadram nos objetivos que se traçaram para a propriedades finais deste tipo de painéis. Outro critério de seleção, foi a facilidade de obtenção destes materiais, no caso do solo argiloso, já estar armazenado na Universidade do Minho e no caso da lã de ovelha, ser um resíduo, normalmente, eliminado em aterro, disponibilizada pelo Instituto Politécnico de Bragança.

##### 3.1.1 Solo argiloso

O solo utilizado para a realização do presente trabalho, é um solo argiloso proveniente do Alentejo, disponível Universidade do Minho em grande quantidade.

Não sendo conhecidas as propriedades físicas e mecânicas do solo utilizado, foi necessária a sua determinação de forma a estudar e prever o seu impacto nas propriedades finais das composições.

Desta forma, foram efetuados ensaios de análise granulométrica (Peneiração, Sedimentação), de determinação dos limites de consistência (Limite de Liquidez e Limite de Plasticidade), a determinação da densidade, massa volúmica aparente.

Devido ao local onde o solo foi armazenado (no exterior) e mantido durante um longo período, apresentava um elevado teor em água tendo um aspeto mais compacto como é visível na (Figura 11, à direita). De modo a preparar o solo para os ensaios, foi necessário, numa primeira fase, colocar o solo numa estufa com uma temperatura constante de 100°C de modo a secá-lo totalmente. Após a secagem do solo foi necessário desagregar, manualmente, os torrões grandes de solo, com o auxílio de um pilão, resultando num aspeto final mais arenoso (Figura 11, esquerda).



Figura 11 - Solo Argiloso antes e depois da secagem e destorroamento

#### *Granulometria e sedimentação*

A granulometria do solo é uma das propriedades mais relevantes para o estudo das composições de uma argamassa. A determinação da granulometria do solo utilizado, foi feita por peneiração por via húmida (utilização de água para a desagregação dos torrões de solo) e sedimentação (Figura 12) segundo a especificação E 196 (LNEC, 1966) sendo obtida a curva granulométrica, apresentada na Figura 13. Fazendo uma análise da curva granulométrica obtida, verifica-se que este solo possui uma percentagem de argila de cerca de 34%, como mostra na Tabela 8.

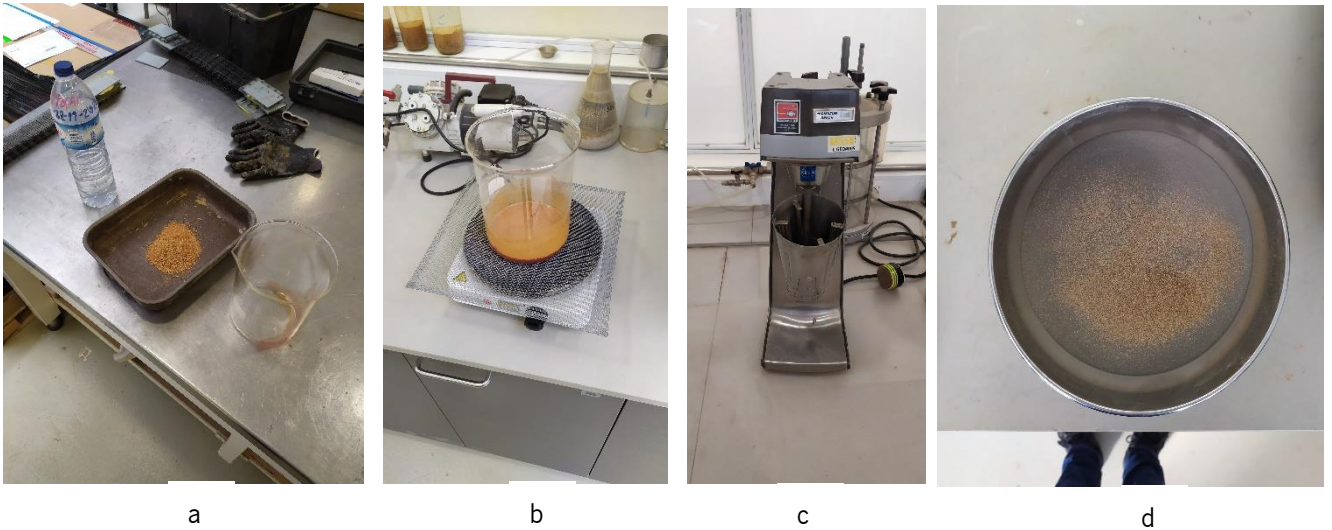


Figura 12 - Preparação da amostra para o ensaio de sedimentação - a) Amostra de solo; b) Mistura do com a solução

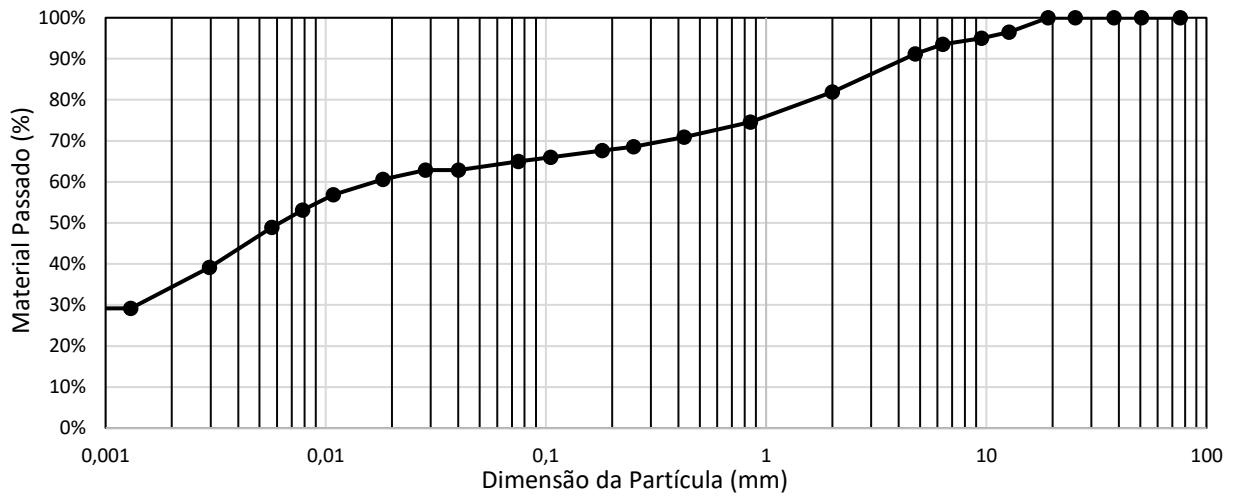


Figura 13 - Curva granulométrica solo argiloso

Tabela 8 - Percentagem das frações granulométricas do Solo Argiloso

<b>Textura</b>	Argila ( $\emptyset < 0,002\text{mm}$ ) (%)	34
	Silte ( $0,002 \leq \emptyset < 0,006\text{mm}$ ) (%)	30
	Areia ( $0,006 \leq \emptyset < 2\text{mm}$ ) (%)	18
	Cascalho ( $\emptyset \geq 2\text{mm}$ ) (%)	18

### *Limites de consistência*

Os limites de consistência foram também determinados, segundo a norma portuguesa NP 143 (IPQ, 1969), e os resultados foram os apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 - Resultados ensaios limites de consistência

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

Na Figura 14a), apresenta-se a concha de Casagrande, utilizada para a determinação do limite de liquidez. Na figura Figura 14b), ilustra-se o ensaio de determinação do limite de plasticidade.



a)

b)

Figura 14 - Ensaio de limites de consistência

### *Massa volúmica aparente*

Devido à ausência de informação relativa à massa volúmica do solo utilizado, adaptou-se um ensaio para determinação desta propriedade. Com o objetivo e permitir a conversão das composições para volume, o ensaio (Figura 15) consistiu na introdução de uma amostra pesada, previamente, de solo argiloso no interior de uma proveta graduada, em duas fases, com uma breve agitação da proveta entre fases. Depois foi retirando o valor do volume final.

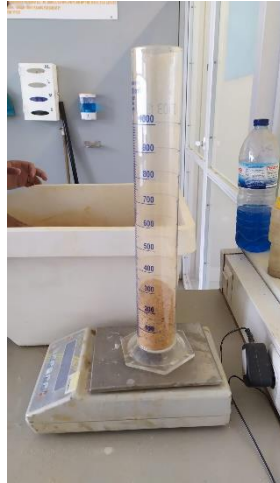


Figura 15 - Ensaio adaptado de determinação da massa volúmica aparente solo

Com o peso e volume calculados, aplicou-se a Equação 1 para a determinação a massa volúmica aparente. A massa volúmica aparente média calculada foi de  $1068 \text{ kg/m}^3$ , com um coeficiente de variação de 1%.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1)$$

Onde:

$\rho$  – Massa Volúmica ( $\text{kg/m}^3$ )

$m$  – Massa da amostra (kg)

$V$  – Volume da amostra ( $\text{m}^3$ )

### 3.1.2 Lã de ovelha

A lã de ovelha, fibra natural escolhida para utilizar neste estudo foi fornecida pelo Instituto Politécnico de Bragança. Em Trás-os-Montes a lã, resultante de tosquia, devido à falta de uso, acaba por ser considerada um resíduo e enviada para aterro.

A lã utilizada foi inicialmente lavada, pois a lã não lavada apresenta um odor forte e também uma espécie de gordura (Figura 16a), o que dificultava o processo de preparação das fibras para as misturas.



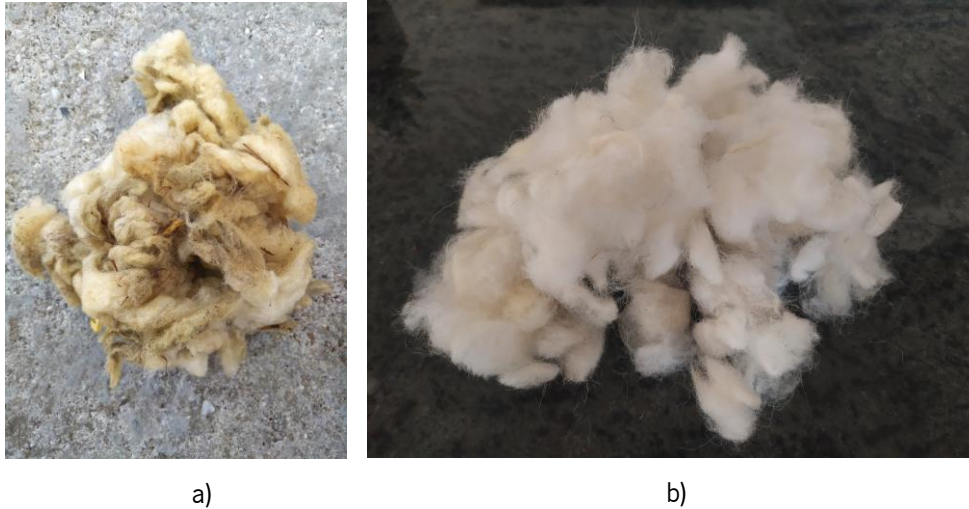


Figura 16 – Aparência da a) Lã não lavada; b) Lã lavada

Após a lavagem, realizada pelo fornecedor, a lã (Figura 16b) apresentava um aspeto mais claro e menos gorduroso, melhorando a sua trabalhabilidade, facilitando o processo de separação e também o processo do corte das fibras.

#### *Massa volúmica aparente*

Tal como referido, devido à ausência de informação relativa à massa volúmica da lã, adotou-se um procedimento semelhante para a determinação desta propriedade. O ensaio (Figura 17) consistiu na introdução de uma amostra pesada, previamente, de fibras no interior de uma proveta graduada, em duas fases, com a ajuda de um pilão leve na compactação da lã. Depois foi retirando o valor do volume final. O mesmo procedimento foi realizado três vezes.

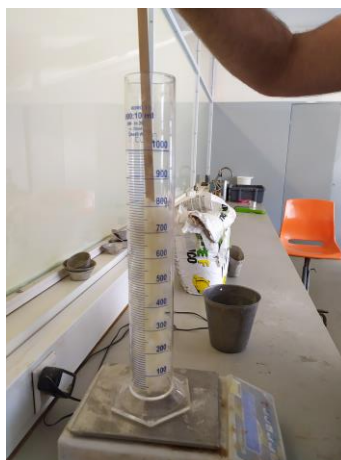


Figura 17 - Ensaio adaptado para a determinação da massa volúmica aparente da lã



Para a determinação do valor médio da massa volúmica aparente foi utilizada a mesma Equação (1). A massa volúmica aparente média da lã calculada foi de 22,32kg/m<sup>3</sup>, com um coeficiente de variação de 2%.

#### *Teor de humidade*

De modo a recolher mais informações relativamente às propriedades das fibras de lã foi realizado um ensaio de determinação do teor de humidade. Este ensaio consistiu na colocação de uma amostra pesada de fibras de lã numa câmara climática com temperatura controlada durante um período de 24h. No final deste período, as fibras foram novamente pesadas para se conhecer a massa de água perdida devido à secagem do material. Foram utilizadas duas câmaras climáticas com dois valores diferentes de temperatura, 100°C e 40°C, de modo a observar-se o comportamento da lã e também para perceber-se se a temperatura elevada influenciaria as propriedades das fibras.

O teor de humidade foi determinado recorrendo à Equação 2.

$$\omega = \frac{M_W}{M_{m.seco}} * 100 \quad (2)$$

Onde:

$\omega$  - Teor de humidade em equilíbrio (%)

$M_W$ - Massa de água (g)

$M_{m.seco}$ - Massa de material seco (g)

O resultado do ensaio teor de humidade o para a amostra colocada na câmara climática a 100°C foi de 16% e para a amostra colocada na câmara climática a 40°C foi de 7%. Com estes resultados, as fibras mostraram um comportamento higroscópico interessante.

#### *Corte das fibras*

No planeamento das misturas, explicado posteriormente, a fibras de lã de ovelha foram cortadas de diferentes tamanhos de forma a verificar o impacto do tamanho destas nas propriedades das misturas. Para isto foi necessário encontrar um mecanismo (Figura 18) que permitisse cortar as fibras de uma forma rápida e também rigorosa de modo a obter as fibras com os tamanhos estipulados, dois/quatro/seis centímetros, para as diferentes misturas. Desta forma, foi improvisado um objeto de cartão que permitiu a fixação e o seu corte com a dimensões pretendidas.



Figura 18 - Corte das fibras de lã

### 3.1.3 Areia

#### *Granulometria*

A areia utilizada no processo das misturas foi adquirida a um fornecedor de materiais de construção, na região de Braga, como meia areia (0/4). Antes da sua utilização, a areia foi seca numa estufa ventilada a cerca 100°C, e armazenada, de modo a estar protegida da humidade. Foi realizada também uma análise granulométrica da areia, e a sua curva granulométrica está apresentada Figura 19.

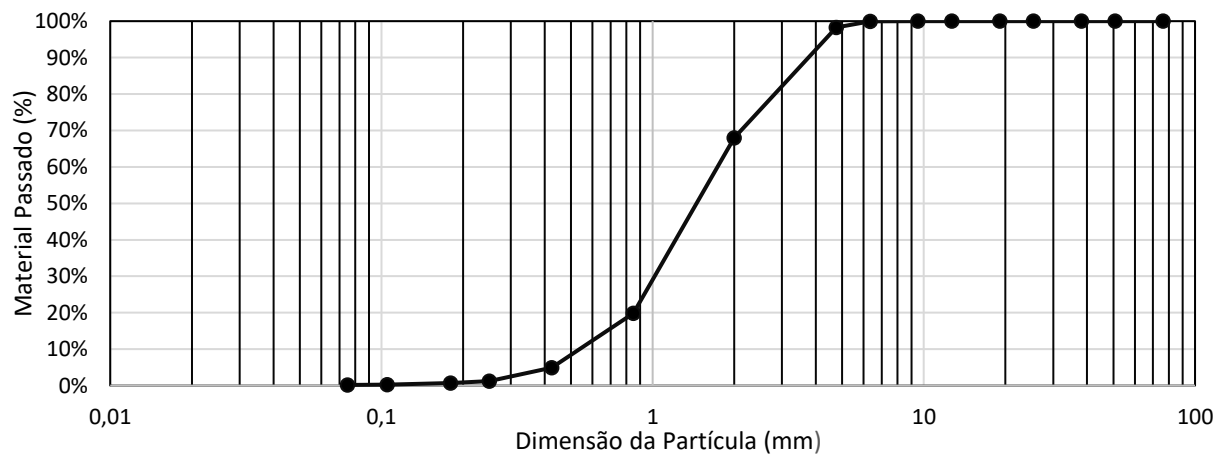


Figura 19 - Curva Granulométrica da Areia

#### *Massa volúmica aparente*

Para a determinação da massa volúmica aparente, foi utilizado, exatamente, o mesmo procedimento adotado para a determinação desta propriedade no solo argiloso.

Para a determinação do valor médio da massa volúmica aparente foi utilizada Equação (1). A massa volúmica aparente média calculada foi de  $1628 \text{ kg/m}^3$ , com um coeficiente de variação de 1%.

#### 3.1.4 Cal hidráulica

Neste trabalho, utilizou-se uma cal hidráulica natural NHL 5 da marca Secil, constituída por silicatos e aluminatos de cálcio e hidróxido de cálcio, obtida por cozedura de calcário margoso, seguida de moagem. De acordo com a ficha técnica, esta cal apresenta uma classe de mínima à compressão, aos 28 dias compreendida entre os 5MPa e os 15MPa. Toda a informação pode ser consultada no Anexo 1.

#### *Massa volúmica aparente*

Para a determinação da massa volúmica aparente, foi utilizado o procedimento adotado para a determinação desta propriedade no solo argiloso, utilizando-se para o cálculo a Equação (1) sendo a massa volúmica aparente média calculada de  $862 \text{ kg/m}^3$ , com um coeficiente de variação de 1%.

### 3.2 Definição da matriz de misturas

Concluída a fase de escolha e caracterização dos materiais que iriam ser utilizados neste estudo, foi necessária a elaboração de uma matriz de misturas para prosseguir com o estudo. Para isso, definiu-se inicialmente uma nomenclatura que se adequasse a cada mistura e que também facilmente identificasse a mistura quanto à sua constituição. Desta forma, foi utilizada a inicial de cada um dos materiais [S - %Solo, A - %Areia, L- %Ligante, F- Fibras (g/kg) e \_Comprimento das fibras] seguido da quantidade de material que no caso dos agregados foram quantificados em percentagem (%). No caso das fibras foram quantificadas em gramas por quilogramas de agregados (g/kg) seguida do comprimento da fibra em centímetros. A percentagem do ligante foi definida em função da quantidade dos agregados (solo + areia) sendo que a massa máxima dos agregados era de 2 kg. Por exemplo: S50A50L10F45\_4 representa uma mistura com 50% de solo, 50% de Areia, 10% Ligante relativamente aos agregados e 45g/kg de Fibras de 4 centímetros, relativamente aos agregados.

A percentagem de água relativa a cada mistura foi determinada para cada mistura consoante o espalhamento e a quantidade de fibras adicionadas, tal como é apresentado na Secção 3.3.

Na Tabela 10 está apresentada a matriz de mistura deste estudo.

Tabela 10 - Matriz de composições (em peso)

Mistura	Solo	Areia	Fibra 2 cm (g/kg)	Fibra 4 cm (g/kg)	Fibra 6 cm (g/kg)	Ligante
S50A50	50%	50%	-	-	-	-
S40A60	40%	60%	-	-	-	-
S30A70	30%	70%	-	-	-	-
S50A50F15_2	50%	50%	15	-	-	-
S50A50F30_2	50%	50%	30	-	-	-
S50S50F45_2	50%	50%	45	-	-	-
S50A50F15_4	50%	50%	-	15	-	-
S50A50F30_4	50%	50%	-	30	-	-
S50A50F45_4	50%	50%	-	45	-	-
S50S50F15_6	50%	50%	-	-	15	-
S50S50F30_6	50%	50%	-	-	30	-
S50S50F45_6	50%	50%	-	-	45	-
S40A60F15_4	40%	60%	-	15	-	-
S40A60F30_4	40%	60%	-	30	-	-
S40A60F45_4	40%	60%	-	45	-	-
S30A70F15_4	30%	70%	-	15	-	-
S30A70F30_4	30%	70%	-	30	-	-
S30A70F45_4	30%	70%	-	45	-	-
S50A50L10	50%	50%	-	-	-	10%
S40A60L10	40%	60%	-	-	-	10%
S30A70L10	30%	70%	-	-	-	10%
S50A50L10F15_4	50%	50%	-	15	-	10%
S50A50L10F30_4	50%	50%	-	30	-	10%
S50A50L10F45_4	50%	50%	-	45	-	10%
S40A60L10F15_4	40%	60%	-	15	-	10%
S40A60L10F45_4	40%	60%	-	45	-	10%
S30A70L10F15_4	30%	70%	-	15	-	10%
S30A70L10F45_4	30%	70%	-	45	-	10%
S30A70L10F15_4	30%	70%	-	15	-	10%
S30A70L10F45_4	30%	70%	-	45	-	10%

O solo argiloso utilizado no procedimento de mistura foi, previamente, peneirado no peneiro 4 (ASTM), de modo a limitar o solo a uma partícula máxima de 4,75 mm. Na Figura 20 estão representadas as curvas granulométricas do solo argiloso peneirado, da areia e das razões Solo/Areia utilizadas para as diferentes composições. Deste processo resultaram composições com diferentes percentagens de argila, tal como apresentado na Tabela 11.

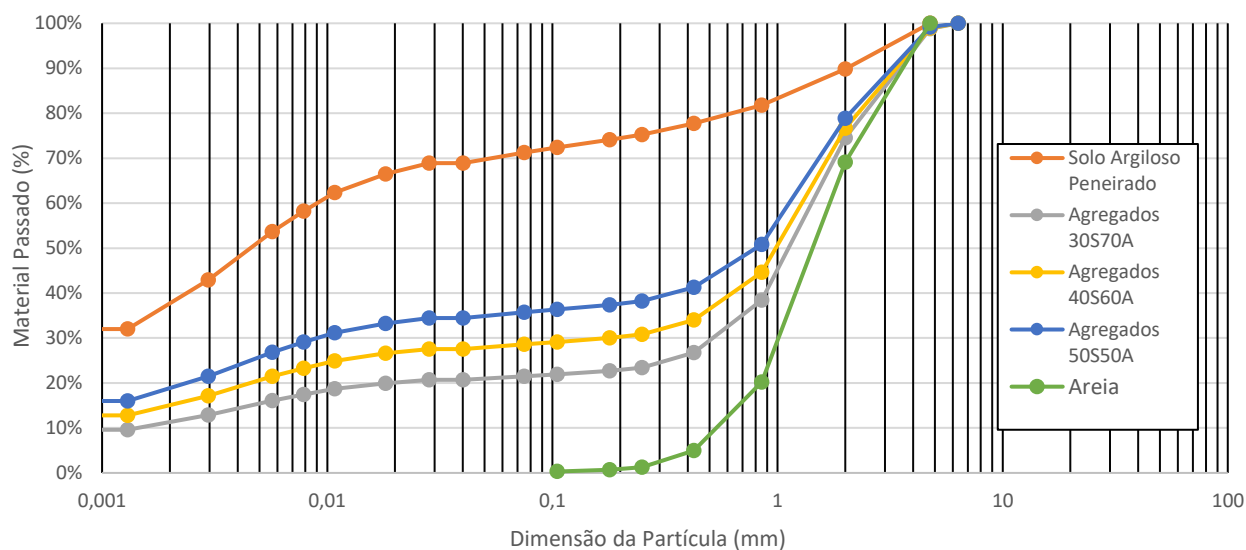


Figura 20 - Curvas granulométricas dos agregados

Tabela 11 - Percentagem de argila nos agregados das diferentes tipologias de agregados

Agregados	Percentagem de Argila (%)
Solo Argiloso Peneirado	34
Agregados S50A50	19
Agregados S40A60	15
Agregados S30A70	11

### 3.3 Procedimento de mistura

Depois de estabelecida a matriz de misturas a realizar, foi estipulada uma metodologia de mistura para a realização das argamassas. As misturas foram realizadas no Laboratório de Materiais de Construção do Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho.

O procedimento para a preparação das argamassas consistiu em três fases, realização da mistura, moldagem e por fim a secagem/cura dos provetes. A primeira fase da realização da mistura passou por pesar todos os materiais utilizados na mistura, numa fase inicial, numa balança com precisão de +/- 0,1g. De seguida, nas misturas que não envolveram fibras, introduziram-se os materiais secos juntamente com a água no balde da misturadora. Ligou-se a misturadora e cronometraram-se 120 segundos no modo velocidade lenta. Após a mistura dos materiais foi realizado o ensaio de espalhamento com o objetivo de determinar a quantidade de água adicionar às misturas. Como critério de paragem do

processo de determinação da quantidade de água, foi definido o intervalo de espalhamento entre 145 a 155 mm, com vista a uma mistura mais “seca”, pensando no processo de moldagem/prensagem dos painéis, em trabalhos futuros. O ensaio de espalhamento (Figura 21) foi realizado segundo a norma EN 1015-3 (CEN, 1999a).



Figura 21 – Ensaio de espalhamento

O ensaio de espalhamento foi realizado apenas para as misturas sem fibras naturais, pois a sua presença impedia o espalhamento da argamassa. A quantidade de água para as misturas com fibras foi determinada recorrendo à quantidade de água para a mistura com a mesma razão Solo-Areia sem fibras, mais a água adicionada com a molhagem das fibras. No final a contabilização da água adicionada a cada mistura foi efetuada através da razão da água pela massa do solo e areia utilizados em cada mistura. Na Tabela 12 estão apresentados os valores do ensaio de espalhamento e a respetiva razão Água/ (Solo+Areia)  $[A/(S+Ar)]$ . É possível, verificar com o aumento da percentagem de argila na mistura, a quantidade de água necessária para atingir o espalhamento definido é maior. Para além disto, a adição da cal nas misturas também vai gerar uma maior necessidade de água para a obtenção do espalhamento definido.

Tabela 12 - Valores do ensaio de espalhamento

Mistura	Espalhamento (mm)	A/(S+Ar)
S50A50	155	0,25
S40A60	155	0,22
S30A70	150	0,18
S50A50L10	150	0,34
S40A60L10	150	0,30
S30A70L10	150	0,24

Na Figura 22 é apresentada a relação água adicionada à mistura com a variação da percentagem de argila de cada mistura. Numa primeira análise é possível observar-se um aumento generalizado da necessidade de água com o aumento da percentagem de argila, de forma a obter o resultado estipulado para o ensaio de espalhamento das argamassas.

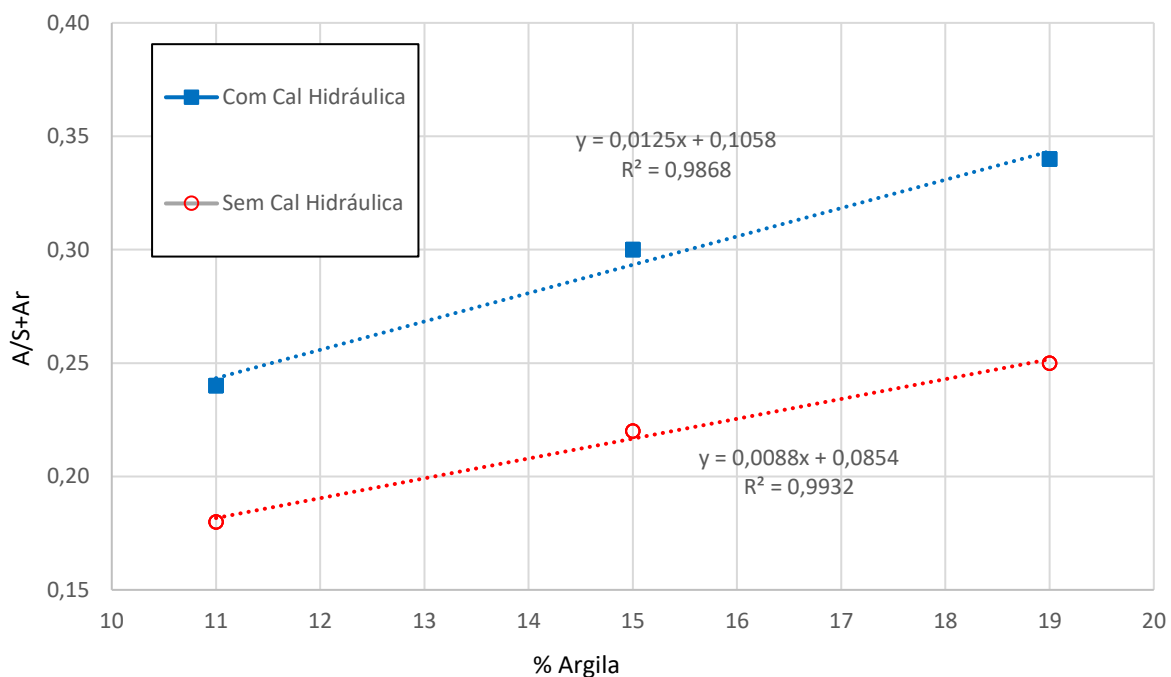


Figura 22 - Relação A/(S+Ar) - Percentagem de Argila

Relativamente à presença ou não de cal hidráulica na mistura, é possível verificar um aumento da necessidade de água nas misturas que incluem cal hidráulica na sua composição. Nas misturas com fibras, inicialmente mergulharam-se as fibras em água durante um período de 10 minutos (Figura 23a). Após os 10 minutos, fibras da água foram retiradas do balde e foi removida a água em excesso das fibras espremendo-as manualmente. O peso das fibras molhadas foi limitado ao triplo do seu peso inicial, evitando o excesso de água na mistura. Na Tabela 13 é apresentada a razão Água/(Solo+Areia) para cada mistura estudada.

Depois da molhagem das fibras, colocaram-se as fibras no balde da misturadora, juntamente com a água determinada nas misturas sem fibras com a mesma proporção de solo/areia e posteriormente colocaram-se os materiais secos. Antes de colocar o balde na misturadora, todos os materiais foram brevemente misturados manualmente de forma a facilitar e tentar evitar que misturadora ficasse presa (Figura 23b). Após a junção de todos os materiais, cronometraram-se 120 segundos com a misturadora no modo velocidade lenta (Figura 23c).

Tabela 13 - Relação Água/(Solo+Areia) para cada composição

<b>Mistura</b>	<b>Água/(Solo+Areia)</b>
S50A50	0,25
S40A60	0,22
S30A70	0,18
S50A50F15_2	0,27
S50A50F30_2	0,36
S50S50F45_2	0,35
S50A50F15_4	0,25
S50A50F30_4	0,31
S50A50F45_4	0,35
S50S50F15_6	0,28
S50S50F30_6	0,31
S50S50F45_6	0,34
S40A60F15_4	0,25
S40A60F30_4	0,28
S40A60F45_4	0,31
S30A70F15_4	0,21
S30A70F30_4	0,24
S30A70F45_4	0,27
S50A50L10	0,34
S40A60L10	0,30
S30A70L10	0,24
S50A50L10F15_4	0,37
S50A50L10F30_4	0,40
S50A50L10F45_4	0,44
S40A60L10F15_4	0,33
S40A60L10F45_4	0,39
S30A70L10F15_4	0,27
S30A70L10F45_4	0,33



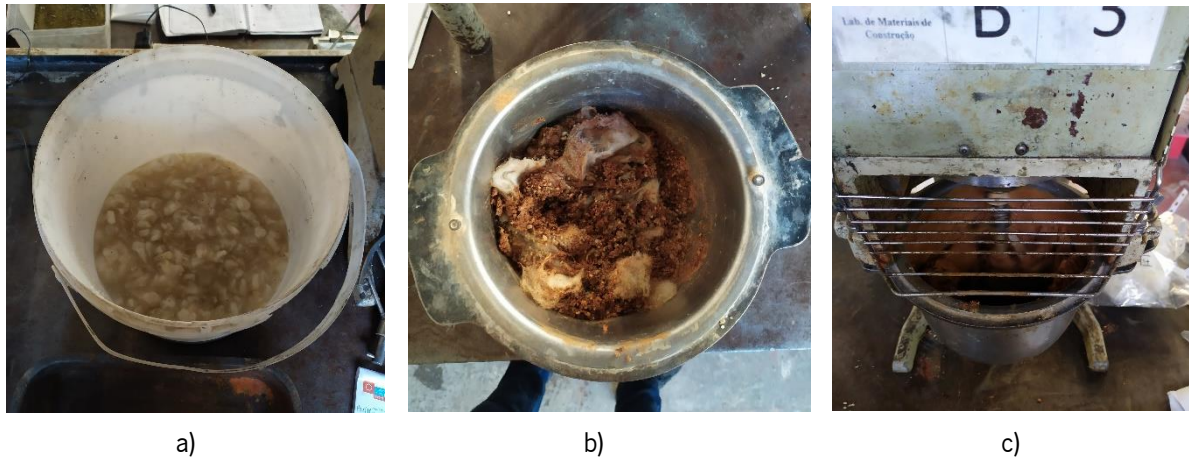


Figura 23 - Processo de mistura: (a) Molhagem das fibras; (b) Pré-mistura manual dos materiais; (c) Mistura dos materiais

O processo de mistura (Figura 24a) foi várias vezes dificultado pelas fibras, visto que a adição de um elevado volume de fibras fez com que, numa primeira fase, a pá da misturadora ficasse presa com a sua aglomeração. Desta forma, o processo da mistura em vários casos não foi contínuo, obrigando à sua paragem e à separação manual das fibras no balde da misturadora. No final, foi possível observar a agregação das fibras, existindo ligações entre as fibras com mais de 10cm (Figura 24b).

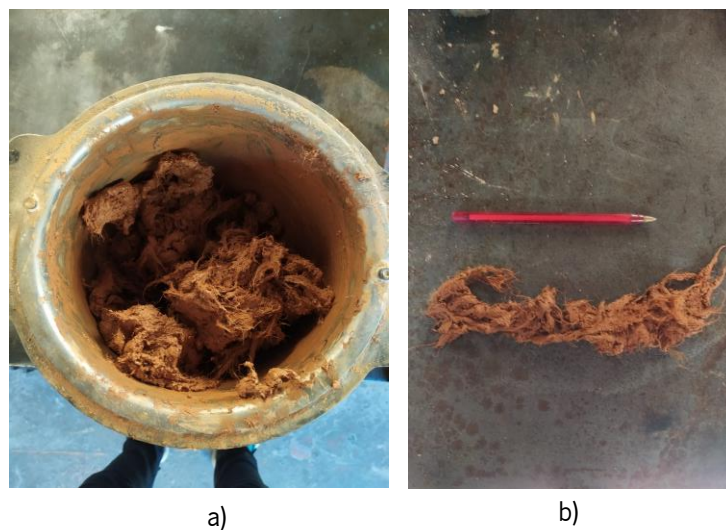


Figura 24 - (a) Pós-Mistura; (b) Agregação das Fibras

Concluída a primeira fase do processo da mistura, passou-se à segunda fase, a fase da moldagem, usando moldes de madeira, com 40x40x160 [mm<sup>3</sup>]. Os moldes de madeira foram previamente pincelados com óleo de descofrante, para facilitar o processo de desmoldagem. A mistura foi moldada em duas camadas, com vinte e cinco pancadas por camada com a utilização de um pilão leve. Foram

Desenvolvimento de misturas para painéis de revestimento à base de argila e fibras de lã de ovelha

moldados três provetes de cada composição (Figura 25), com o objetivo de obter três valores para cada ensaio, no mínimo.

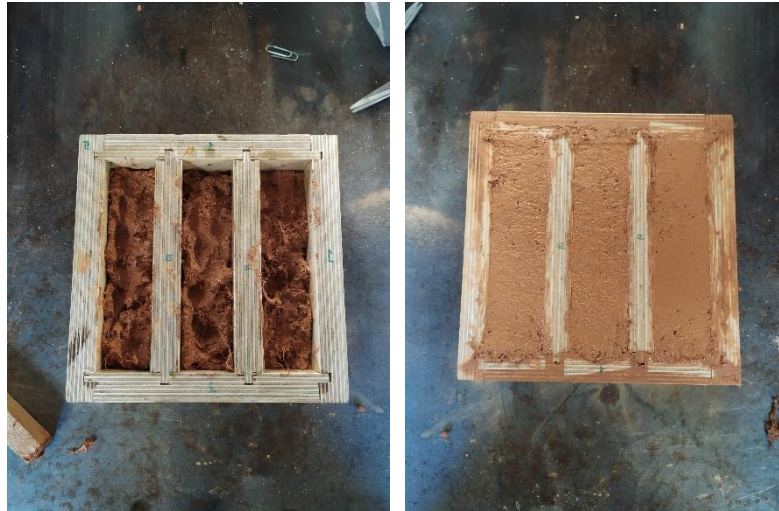


Figura 25 – Moldagem da Mistura

Por fim, os provetes (Figura 26a) foram colocados numa câmara climática, Câmara ClimaPlus 400 (Figura 26b) do Laboratório de Estruturas da Universidade do Minho, com temperatura de 20°C e 57,5% humidade relativa, constantes ao longo do período de secagem mínimo de 28 dias.



a)



b)

Figura 26 - a) Provetes armazenados na câmara climática; b) Condições da câmara climática

Os moldes que continham misturas com cal na sua constituição foram embrulhados com película aderente transparente durante os primeiros três dias na câmara climática, de forma a impedir a perda de humidade durante esse período, promovendo as reações de hidratação do ligante.

### 3.4 Procedimentos de ensaio

Terminada a realização das misturas e o período de secagem/cura dos provetes, passou-se aos ensaios laboratoriais. Numa primeira fase, os provetes foram sujeitos a ensaios não-destrutivos, mais precisamente os ensaios de caracterização da retração, da massa volúmica aparente, da velocidade de propagação de ultrassons e do módulo de elasticidade dinâmico. Após a realização dos ensaios não destrutivos, seguiram-se os ensaios destrutivos, onde foi feita a caracterização mecânica dos provetes, nomeadamente o ensaio de resistência à flexão e compressão e por fim o ensaio de determinação do teor de humidade em equilíbrio.

#### 3.4.1 Massa volúmica aparente

Para a determinação da massa volúmica aparente, numa primeira fase os provetes foram medidos recorrendo a um paquímetro digital, retirando comprimento, largura e altura dos provetes. Este procedimento foi realizado para cada um dos três provetes disponíveis por mistura. Depois de medidas as dimensões de cada provete, estes foram pesados numa balança digital com 0,001 g de precisão. Por fim, com a massa e volume de cada provete, determinou-se a massa volúmica. Para cada composição, calculou-se a média e o coeficiente de variação.

#### 3.4.2 Retração

A retração, assim como a expansão, é um fenómeno que pode ser definido como a variação do volume de uma argamassa fresca após a sua secagem/cura. Este acontecimento é extremamente importante no desempenho de revestimentos à base de terra. Este tipo de materiais apresentam um nível exagerado de retração, provocando a abertura de fissuras, levando à entrada de água para o seu interior. Como consequência deste fenómeno, aparecem diversas patologias que levam a perda de durabilidade e redução da resistência mecânica. A avaliação do nível de retração de uma argamassa é feita analisando a variação do volume, neste caso na redução do seu volume após a secagem/cura. A secagem consiste na perda total ou praticamente total da água adicionada na mistura levando à mudança de volume, originada por fenómenos de sucção entre partículas. A presença de partículas de argila, neste caso, podem ter influência na retração da argamassa devido à sua elevada expansibilidade quando em contacto com água. Sendo assim, é expectável que o nível de retração seja influenciado pela percentagem de

argila, bem como pela sua mineralogia. A presença de ligantes, como cimento e/ou cal hidráulica, vão influenciar este fenómeno pois reagem com as partículas de argila alterando a sua expansibilidade.

Neste estudo, foi possível observar retração (Figura 27) nos provetes realizados, contudo o ensaio realizado não apresenta uma precisão suficiente para valores muito baixos de retração.

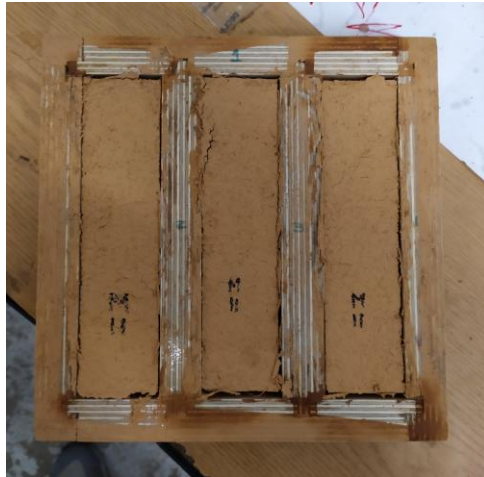


Figura 27 - Retração visível nos moldes

O valor da retração do provete foi determinado utilizando a Equação 3.

$$R_L = \frac{L_0 - L_f}{L_0} * 100 \quad (3)$$

Onde:

$R_L$  – Retração Linear (%)

$L_0$  – Comprimento inicial do provete (mm)

$L_f$  – Comprimento final do provete (mm)

### 3.4.3 Velocidade de propagação de ultrassons e módulo de elasticidade dinâmico

A velocidade de propagação de ultrassons vai permitir uma avaliação da compacidade da argamassa e uma identificação de possíveis fissuras existentes.

No procedimento de ensaio foi utilizado o equipamento Pundit Lab (Figura 28), disponível no laboratório LEST da Universidade do Minho. Este equipamento de medição possui uma sonda emissora e outra recetora de ondas ultrassónicas, onde através dos quais é medido o tempo de propagação da onda ao longo do provete. A velocidade de propagação da onda foi determinada, considerando a distância entre sondas e o tempo medido, utilizando a Equação 4.

$$V_{uss} = \frac{d}{t} \quad (4)$$

Onde:

$V_{uss}$  – Velocidade de propagação de ultrassons (m/s)

d – Distância percorrida (m)

t – Tempo decorrido (s)



Figura 28 - Equipamento Pundit Lab

O módulo de elasticidade dinâmico ( $E_d$ ) foi determinado utilizando o método dos Ultrassons (Marques et al., 2020). Este é um ensaio não-destrutivo onde através da leitura do valor da velocidade propagação das ondas ultrassónicas nos provetes é possível determinar o  $E_d$  do provete analisado.

Para este trabalho, foi utilizado o método direto (Figura 29) que consiste na colocação das sondas em face opostas do provete, medindo, desta forma, o tempo de propagação das ondas, desde a sonda emissora à sonda recetora.

No ensaio realizado foram retiradas dez leituras por provete com uma frequência nominal do transdutor de 54 kHz, e uma tensão de pulso de +/- 500 V.



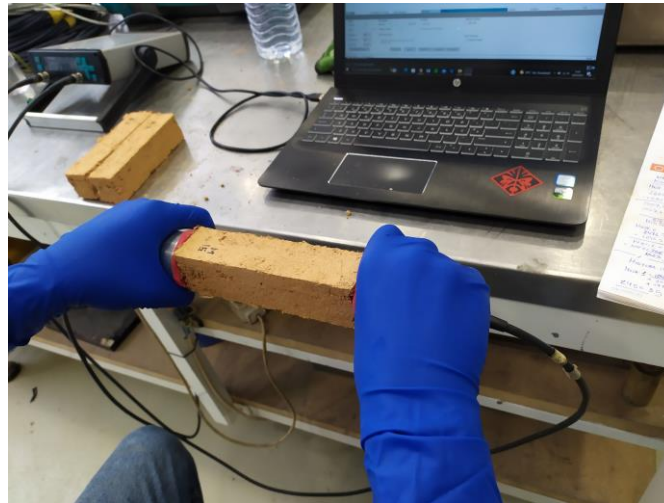


Figura 29 - Módulo de Elasticidade Dinâmico - método direto

Depois de retirados os valores da velocidade de propagação das ondas, o valor de  $E_d$  de cada provete foi calculado de acordo com a seguinte Equação 5 (Marques et al., 2020).

$$E_d = \frac{(1 + \nu) * (1 - 2 * \nu)}{(1 - \nu)} * v^2 * \rho * 10^{-9} \quad (5)$$

Onde:

$E_d$  – Modulo de elasticidade dinâmico (GPa)

$v$ – Velocidade de propagação da onde ultrassónica no provete (m/s)

$\nu$  – Coeficiente de Poisson (-)

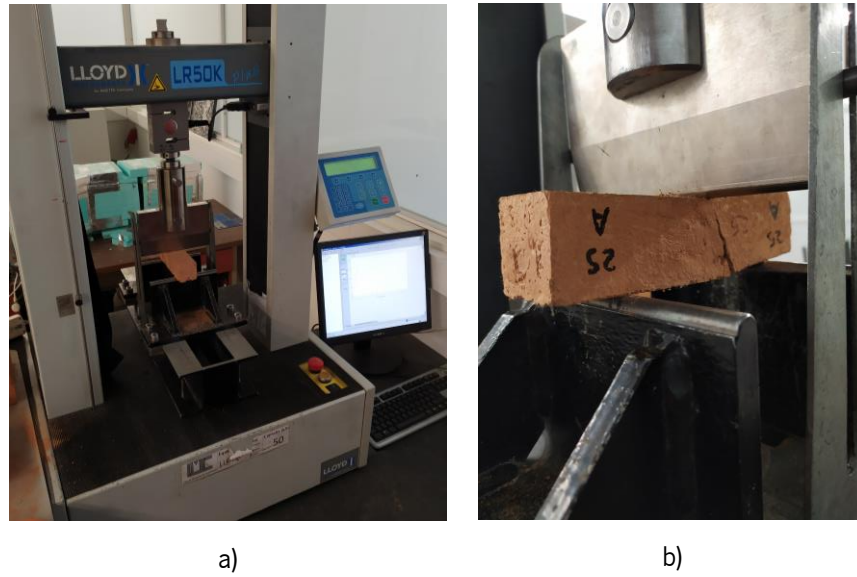
$\rho$  - Massa volúmica do provete (kg/m<sup>3</sup>)

Neste caso, foi adotado o valor de 0,2 para o coeficiente de Poisson (Kumar et al.,2021).

#### 3.4.4 Resistência à flexão

O ensaio de resistência à flexão foi realizado segundo a norma EN 1015-11 (CEN, 1999). Foram realizados três ensaios por composição em provetes prismáticos com dimensões de 40x40x160 mm<sup>3</sup>.

Devido à baixa resistência que argamassas à base de solo apresentam e de forma a controlar o ensaio de forma estabilizada no seu pico, durante o ensaio de flexão optou-se por os ensaios em deslocamento em vez de força. A velocidade de ensaio foi de 3 µm/s. Para este ensaio, foi utilizada a prensa automática “LR 50K Plus da LLOYD instruments” (Figura 30a)), disponibilizada pelo Laboratório de Materiais de Construção da Universidade do Minho, com recolha automática dos dados.



De salientar que nos provetes das argamassas que continham fibras (Figura 31), o ensaio foi limitado a duração máxima de 25 minutos, pois as fibras não permitiram a rotura total dos provetes (Figura 30b)).



Figura 31 - Comportamento das fibras após rotura do provete

A resistência à flexão,  $f_b$ , foi calculada tendo em consideração a geometria dos provetes e a configuração do ensaio, usando a seguinte Equação 6.

$$f_b = 1.5 \frac{Fl}{bd^2} \quad (6)$$

Onde:

$f_b$  – Resistência à flexão (MPa)

$F$  - Carga máxima aplicada sobre o provete (N)

$l$  – Distância entre apoios do provete (mm)

$b$  – Largura do provete (mm)

$d$  – Altura do provete (mm)

### 3.4.5 Resistência à compressão

O ensaio de resistência à compressão, à semelhança do ensaio de resistência à flexão, foi realizado segundo a norma EN 1015-11 (CEN, 1999) e o equipamento mecânico utilizado foi o mesmo do ensaio anterior, “LR 50K Plus da LLOYD instruments”, mas com uma configuração diferente, adequada à compressão (Figura 32a)). Neste ensaio, optou-se, também, por controlar a velocidade de deslocamento da prensa, devido à baixa resistência deste tipo de argamassas e também para controlar o ensaio de forma estabilizada no seu pico, utilizando uma velocidade de 6  $\mu\text{m/s}$ .

Como os provetes, no ensaio à flexão, não chegaram à rotura total, foi necessária a divisão manual do provete fendilhado (Figura 32b)), possibilitando assim a realização do ensaio de compressão com as metades resultantes.

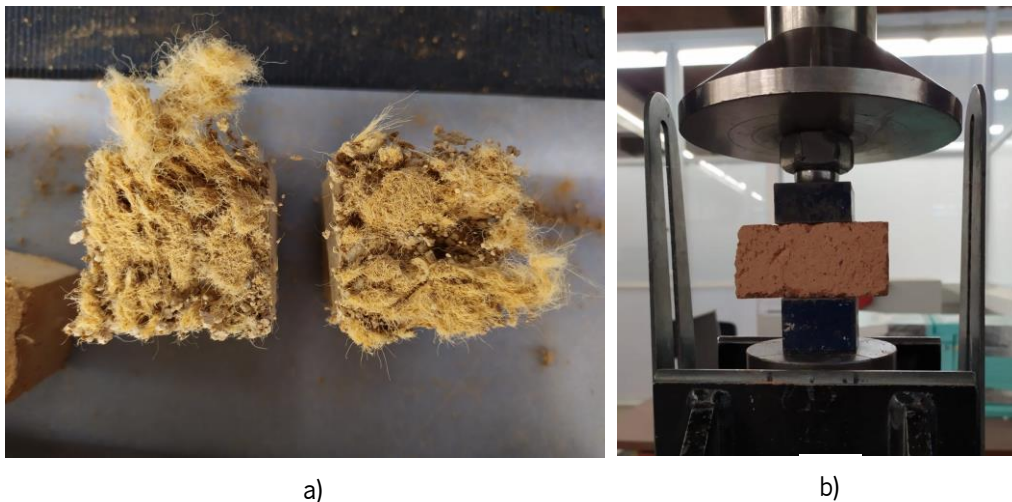


Figura 32 - a) Provetes após a divisão manual; b) Ensaio à compressão

Pela mesma razão do ensaio de resistência à flexão, nos provetes das misturas com fibras, o tempo do ensaio foi limitado a 15 minutos.



A resistência à compressão,  $f_c$ , foi determinada através da seguinte Equação 7.

$$f_c = \frac{F_c}{A} \quad (7)$$

Onde:

$f_c$  – Resistência à compressão (MPa)

$F_c$  – Carga máxima aplicada no provete (N)

$A$  – Área da secção carregada (mm<sup>2</sup>)

#### 3.4.6 Teor de humidade em equilíbrio

De modo a determinar o teor de humidade em equilíbrio, após o ensaio de compressão, foram retiradas e pesadas as amostras dos provetes (Figura 33a)), numa balança digital com 0,001g de precisão. Estas amostras foram colocadas em cápsulas e foram armazenadas numa estufa a +/- 100°C, num período de 24h. Após as 24h, as amostras (Figura 33b)) foram retiradas da estufa e foram novamente pesadas. Com valores da massa da amostra antes e depois do período na estufa, foi calculada a diferença de massas e determinada a massa de água e a massa de solo seco.

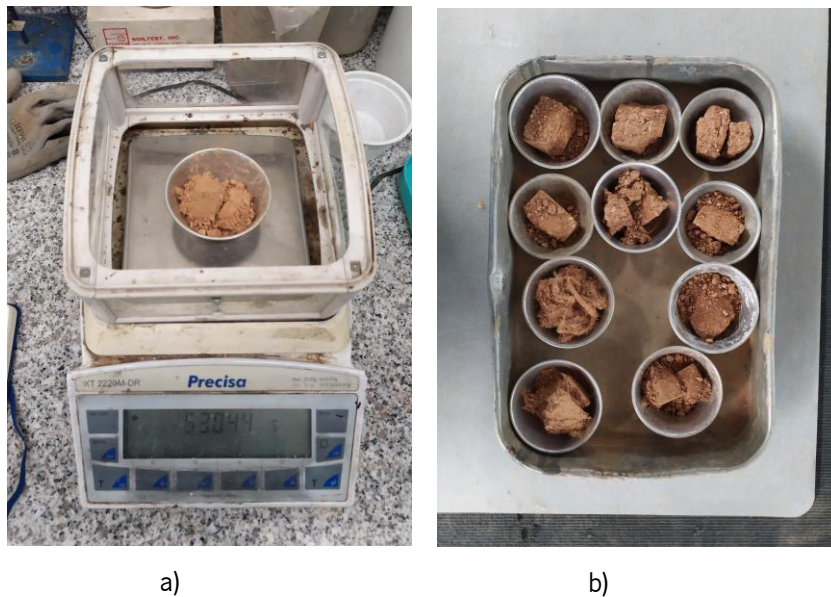


Figura 33 - a) Pesagem das amostras; b) Amostras retiradas

O teor de humidade em equilíbrio foi calculado segundo a Equação 8.

$$\omega_{eq} = \frac{M_w}{M_{s.seco}} * 100 \quad (8)$$

Onde:

$\omega_{eq}$ - Teor de humidade em equilíbrio (%)

$M_w$ - Massa de água (g)

$M_{s.seco}$ - Massa de solo seco (g)

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentadas as comparações entre as diferentes misturas e são discutidos os resultados obtidos nos ensaios realizados.

### 4.1 Apresentação dos resultados

Na Tabela 14 são apresentados os valores médios das propriedades avaliadas nos ensaios (coeficiente de variação entre parênteses) em termos de massa volúmica ( $\rho$ ), resistência à flexão ( $f_b$ ), resistência à compressão ( $f_c$ ), retração ( $R_L$ ), velocidade de propagação de ultrassons ( $v$ ), módulo de elasticidade dinâmico ( $E_d$ ) e teor de humidade em equilíbrio ( $w_{eq}$ ).

Tabela 14 - Valores médios das propriedades avaliadas nos ensaios (coeficiente de variação entre parênteses)

Mistura	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$f_b$ (MPa)	$f_c$ (MPa)	$R_L$ (mm)	$v$ (m/s)	$E_d$ (GPa)	$w_{eq}$ (%)
S50A50	1658 (1%)	0,24 (-)*	0,71 (6%)	3,2 (6%)	1433 (2%)	3,07 (4%)	0,75(-)
S40A60	1728 (1%)	0,22(15%)	0,55 (9%)	2,3 (16%)	1356 (1%)	2,86 (2%)	0,68(-)
S30A70	1811 (1%)	0,20 (-)*	0,29 (7%)	1,3 (0%)	1403 (1%)	3,21 (1%)	0,50(-)
S50A50F15_2	1586 (1%)	0,48 (14%)	0,91 (9%)	3,5 (10%)	1474 (2%)	3,10 (4%)	0,94(-)
S50A50F30_2	1370 (2%)	0,47 (5%)	0,58 (19%)	1,4 (13%)	1275 (2%)	2,00 (2%)	0,90(-)
S50A50F45_2	1363 (1%)	0,61 (21%)	0,66 (12%)	1,0 (17%)	1240 (3%)	1,89 (8%)	1,16(-)
S50A50F15_4	1493 (2%)	0,46 (19%)	0,47 (3%)	0,7 (25%)	1243 (6%)	2,08 (15%)	0,96(-)
S50A50F30_4	1460 (2%)	0,49 (32%)	0,59 (13%)	1,4 (13%)	1282 (3%)	2,16 (4%)	1,1(-)
S50A50F45_4	1429 (1%)	0,50 (21%)	0,68 (10%)	0,6 (50%)	1246 (1%)	2,00 (1%)	1,31(-)
S50A50F15_6	1468 (3%)	0,37 (24%)	0,53 (23%)	0,5 (35%)	1299 (3%)	2,23 (8%)	0,94(-)
S50A50F30_6	1462 (2%)	0,57 (22%)	0,61 (21%)	1,5 (25%)	1256 (1%)	2,07 (2%)	0,99(-)
S50A50F45_6	1381 (3%)	0,62 (13%)	0,47 (11%)	0,6 (0%)	1256 (3%)	1,96 (6%)	1,39 (-)
S40A60F15_4	1528 (5%)	0,42 (13%)	0,47 (20%)	0,0 (0%)	1355 (1%)	2,52 (2%)	0,56 (-)
S40A60F30_4	1456 (3%)	0,51 (9%)	0,52 (18%)	0,6 (0%)	1338 (2%)	2,35 (8%)	1,12 (-)
S40A60F45_4	1415 (3%)	0,63 (10%)	0,54 (17%)	0,0 (0%)	1335 (2%)	2,27 (1%)	1,38 (-)
S30A70F15_4	1665 (1%)	0,37 (16%)	0,51 (8%)	0,0 (0%)	1390 (1%)	2,89 (1%)	0,56 (-)
S30A70F30_4	1430 (1%)	0,51 (9%)	0,51 (7%)	0,1 (173%)	1305 (2%)	2,19 (4%)	0,97 (-)
S30A70F45_4	1462 (1%)	0,45 (14%)	0,52 (8%)	0,2 (173%)	1253 (2%)	2,07 (5%)	1,07 (-)
S50A50L10	1534 (2%)	0,32 (5%)	0,76 (11%)	0,0 (0%)	1362 (1%)	2,56 (4%)	0,92 (-)
S40A60L10	1635 (1%)	0,33 (6%)	0,73 (5%)	2,8 (0%)	1354 (3%)	2,70 (4%)	0,83 (-)
S30A70L10	1767 (1%)	0,34 (8%)	0,71 (6%)	2,3 (8%)	1389 (2%)	3,07 (3%)	0,66 (-)
S50A50L10F15_4	1390 (3%)	0,51 (3%)	0,67 (15%)	1,0 (35%)	1278 (4%)	2,04 (6%)	1,26 (-)
S50A50L10F30_4	1373 (4%)	0,51 (10%)	0,69 (18%)	1,1 (42%)	1220 (1%)	1,84 (3%)	1,32 (-)
S50A50L10F45_4	1333 (5%)	0,69 (12%)	0,83 (9%)	0,8 (22%)	1251 (2%)	1,87 (3%)	1,54(-)
S40A60L10F15_4	1443 (4%)	0,48 (16%)	0,46 (9%)	0,3 (100%)	1240 (1%)	2,00 (4%)	0,90(-)
S40A60L10F45_4	1385 (2%)	0,80 (-)*	0,96 (18%)	0,6 (0%)	1384 (2%)	2,39 (4%)	1,45(-)
S30A70L10F15_4	1654 (1%)	0,38 (5%)	0,64 (51%)	0,0 (0%)	1297 (1%)	2,51 (3%)	1,06(-)
S30A70L10F45_4	1432 (1%)	0,58 (8%)	0,81 (11%)	0,0 (0%)	1282 (3%)	2,12 (4%)	1,57(-)

\*Número de ensaios inferior a 3

Comparando os valores médios das propriedades nos ensaios com os requisitos mínimos especificados na norma alemã DIN 18948:2018-12, mais especificamente na resistência à flexão, conclui-se que a mistura S40A60L10F45\_4 seria a mistura desenvolvida neste trabalho mais indicada para a realização dos painéis. Relativamente aos valores médios de massa volúmica, é possível concluir-se que todas as misturas ultrapassam os 1200 kg/m<sup>3</sup>, não sendo possível o desenvolvimento de painéis de argila leves com este tipo de composições.

## 4.2 Discussão dos resultados

Neste capítulo é realizada uma análise, comparação e conclusão dos resultados obtidos sobre a influência de cada uma das variáveis avaliadas nas diferentes misturas.

### 4.2.1 Influência da quantidade de fibras

De seguida apresenta-se a discussão da variação da quantidade de fibras nas misturas nas diferentes propriedades das misturas

#### *Resistência à flexão*

Na Figura 34 é apresentada a relação da resistência à flexão dos provetes com a variação da quantidade de fibras adicionadas na mistura. Analisando-se os resultados é possível verificar um aumento generalizado da resistência à flexão com o aumento da quantidade de fibras adicionadas. Como é visível, o valor médio da resistência à flexão das misturas sem fibras aumenta, com adição de 15g/kg, 30g/kg e 45g/kg, respetivamente, 54%, 82% e 111%.

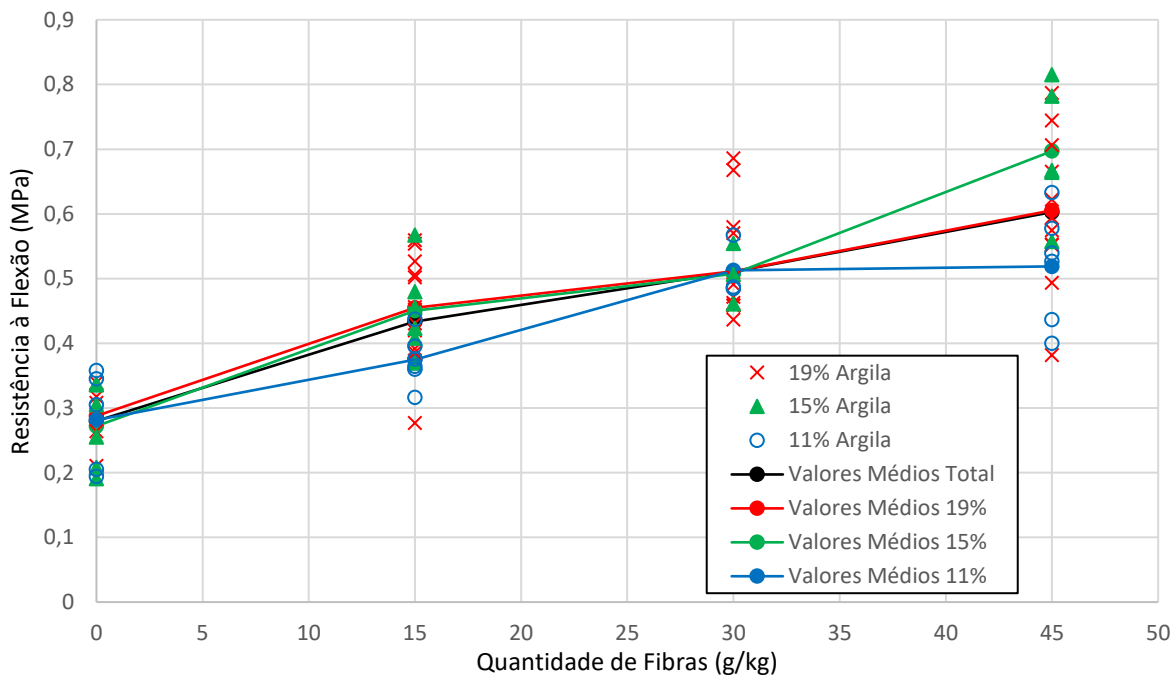


Figura 34 - Influência da quantidade de fibras na resistência à flexão

É possível, também, reparar que no caso das misturas com fibras existe uma maior dispersão de resultados. Esta observação pode ser explicada pela formação de “ninhos” de fibras de lã durante o processo mistura, não promovendo uma distribuição uniforme na matriz.

Na Figura 35 é possível observar as curvas da tensão de flexão/deflexão das diferentes quantidades de fibras adicionadas à família de misturas S40A60. Analisando-se as curvas é facilmente perceptível a influência das fibras, existindo um claro aumento das tensões de flexão com o aumento da quantidade de fibras, como analisado anteriormente. Outro comportamento evidente é o aumento da ductilidade do material. Com a adição das fibras os provetes não apresentaram uma rotura frágil, mas sim uma rotura dúctil. Além disto, as oscilações visíveis nas curvas das misturas com fibras podem ser explicadas por roturas de fibras singulares, que ocorrem de forma progressiva e à medida que estas são solicitadas.

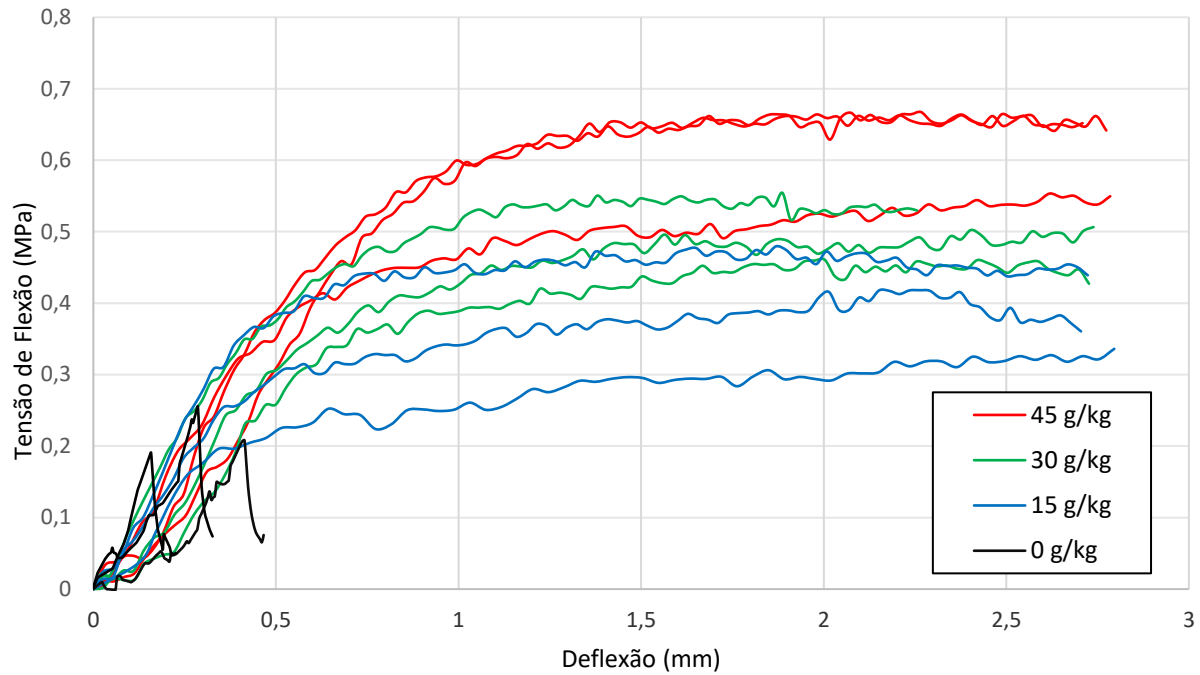


Figura 35 - Curvas tensão de flexão - deflexão da família de misturas S40A60

Comparando com outros estudos realizados com a incorporação de fibras naturais em argamassas de terra e cal, Eires et al., 2014 conclui uma tendência positiva na adição das fibras naturais (fibras de coco) na mistura, aumentando em 44% os valores ensaios de resistência à flexão.

Com estes resultados é possível concluir que a adição das fibras aumenta a resistência à flexão das misturas.

#### *Resistência à compressão*

Diferentemente dos resultados apresentados no ensaio de resistência à flexão, com adição de fibras na mistura não se observa uma alteração clara da resistência compressão, tal como mostra na Figura 36. Porém, os valores mais altos registados são identificados nas misturas com 15g/kg de fibras, apesar de demonstrarem uma elevada dispersão. Com isto, não é possível concluir que adição de fibras permite um aumento da resistência à compressão dos provetes.

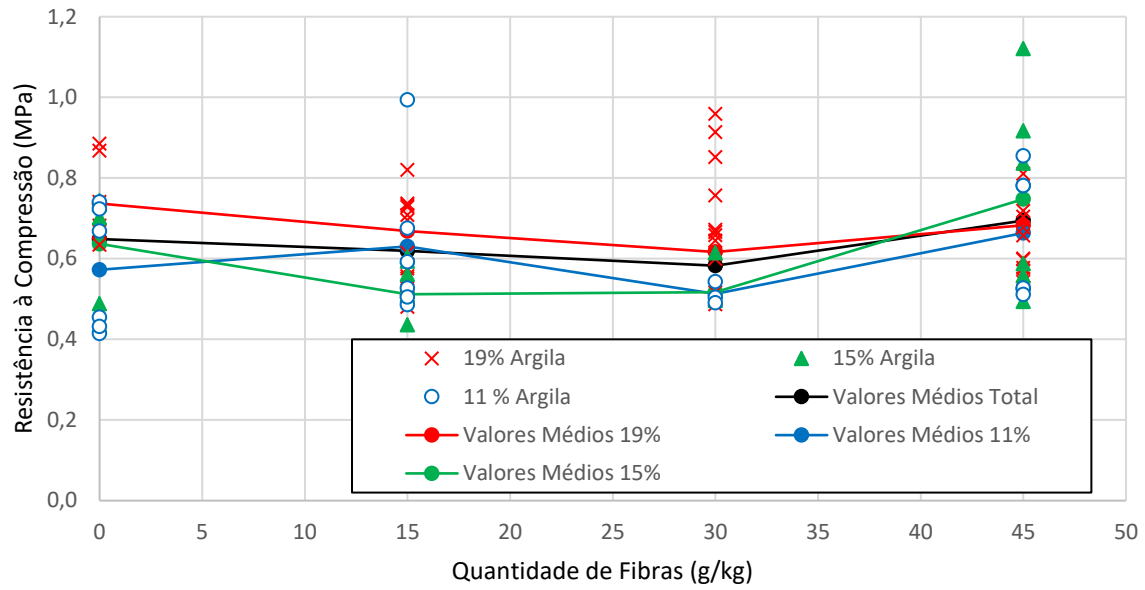


Figura 36 - Influência da quantidade de fibras na resistência à compressão

Na Figura 37 são apresentadas as curvas tensão de compressão - extensão das diferentes quantidades de fibras da família de misturas S50A50. Contudo, tal como nas curvas de tensão de flexão - deflexão, é possível confirmar a maior ductilidade do material com a adição das fibras.

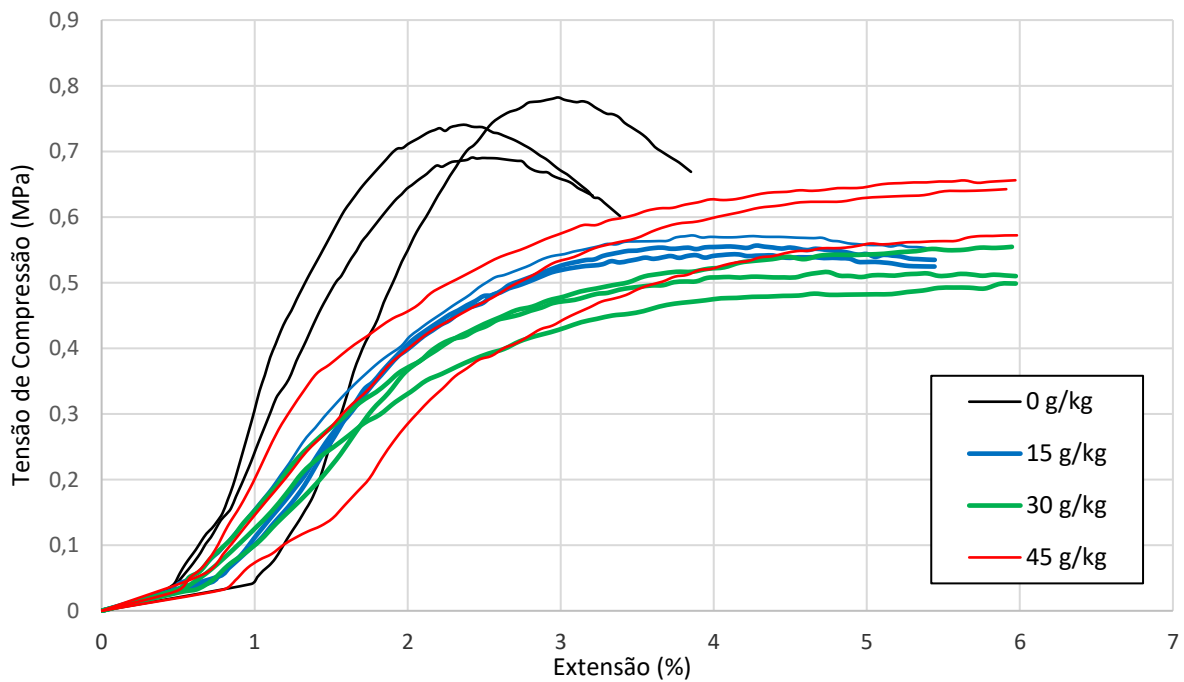


Figura 37 - Curvas tensão de compressão/extensão da família de misturas S50A50

Gelana et al. (2019), analisaram o impacto da incorporação de fibras de lã de ovelha nas propriedades do betão C20/25, verificando um ligeiro aumento da resistência à compressão na incorporação de 0,5, 1 e 1,5% (em relação à massa de material seco) de fibras de lã na composição do betão, mas na adição de 2% observaram uma diminuição de 25% da resistência. Com isto, pode-se supor que existe uma quantidade de fibras máxima que quando ultrapassada pode levar a um decréscimo da resistência à compressão das misturas. Com isto, pode-se concluir que a adição das fibras não tem algum tipo de influência no aumento da resistência à compressão em misturas.

### Massa volúmica

A influência da quantidade de fibras na massa volúmica das misturas é apresentada na Figura 38. Com a adição das fibras é visível a diminuição da massa volúmica, especialmente se as misturas sem fibras são a base de comparação. Isto explica-se pela menor massa volúmica aparente das fibras comparativamente ao material granular, resultando numa maior percentagem de vazios no material endurecido com uma maior quantidade de fibras utilizadas.

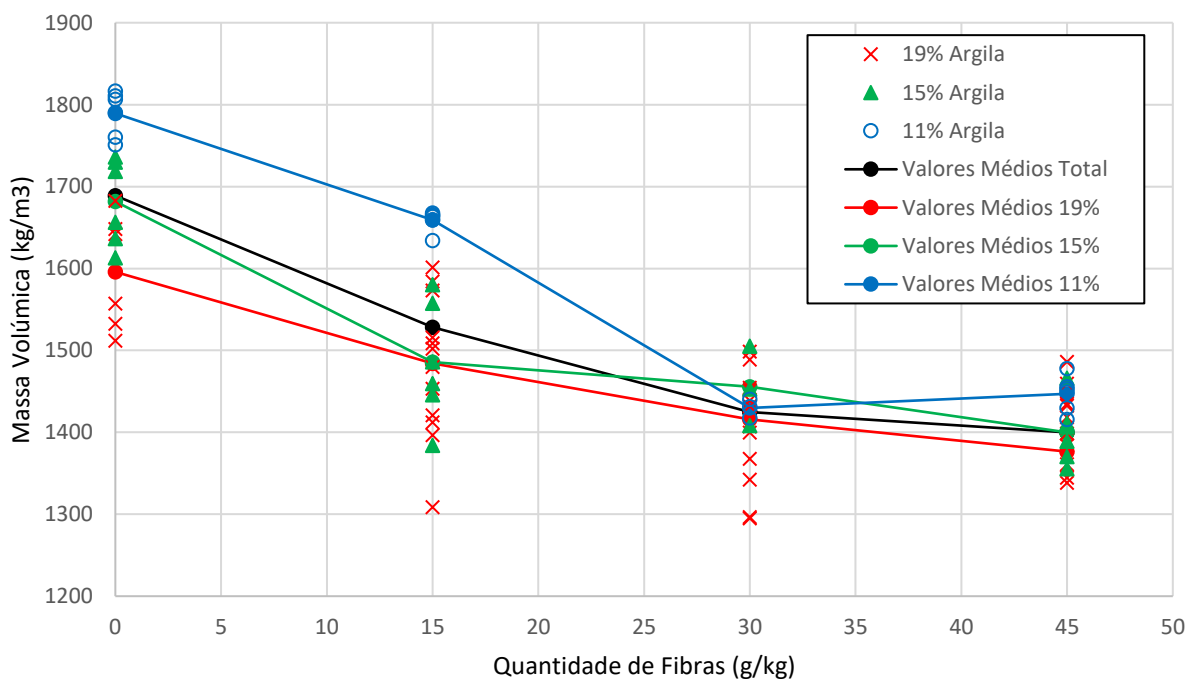


Figura 38 - Influência da quantidade de fibras na massa volúmica



*Velocidade de propagação de ultrassons*

A velocidade de propagação dos ultrassons está relacionada com a compacidade dos provetes, sendo que quando menor for o valor da velocidade menor será a compacidade.

Na Figura 39 pode ser visualizada a alteração da velocidade de propagação dos ultrassons com o aumento da quantidade de fibras. Observando-se os resultados é possível notar dois tipos de comportamentos distintos. Na mistura com 15% de argila, observa-se uma estabilização da velocidade de propagação dos ultrassons com o aumento da quantidade de fibras. No caso das misturas com 11% e 19% de argila observa-se uma diminuição da velocidade com o aumento da quantidade fibras.

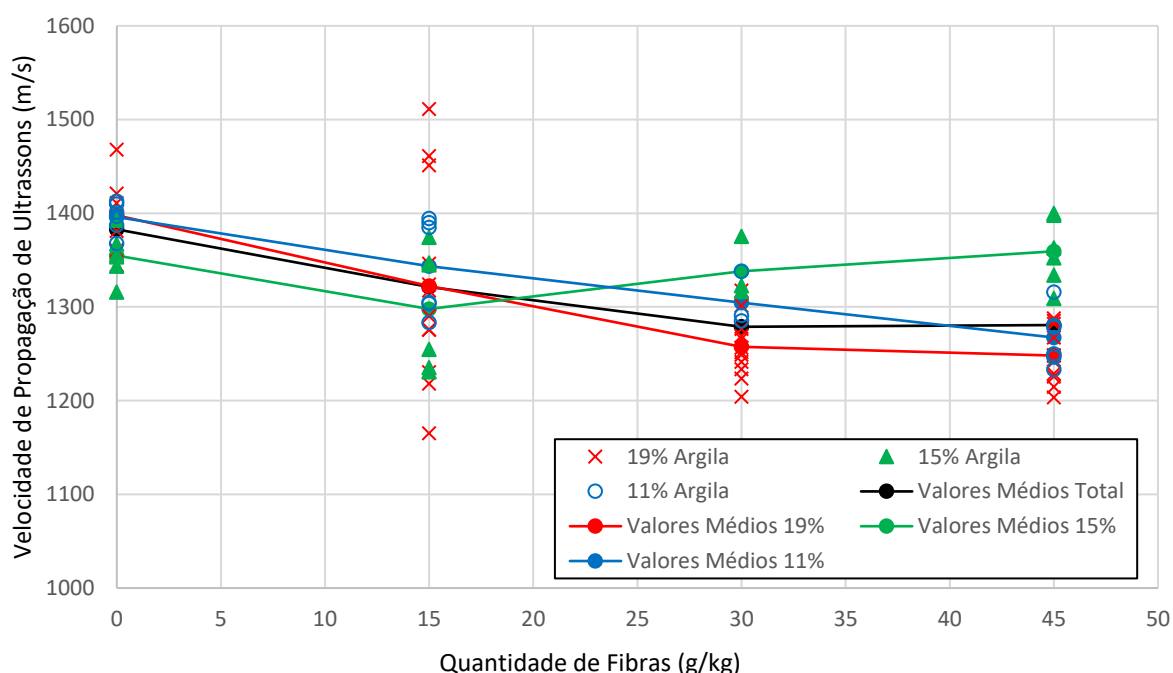


Figura 39 -Influência da quantidade de fibras na velocidade Propagação Ultrassons

*Módulo de elasticidade dinâmico*

A Figura 40 apresenta a evolução da relação do módulo de elasticidade dinâmico com a quantidade de fibras na mistura. Tal como nos resultados da velocidade de propagação de ultrassons, as misturas com 11% e 19% de argila apresentam uma diminuição dos valores do módulo de elasticidade dinâmico com o aumento da quantidade das fibras, enquanto a restante família de misturas com 15% de argila apresenta uma estabilização dos valores do módulo de elasticidade dinâmico. Note-se, contudo, que o cálculo do módulo de elasticidade dinâmico depende da velocidade de propagação de ultrassons e da massa volúmica, que por sua vez são propriedades que se interrelacionam.

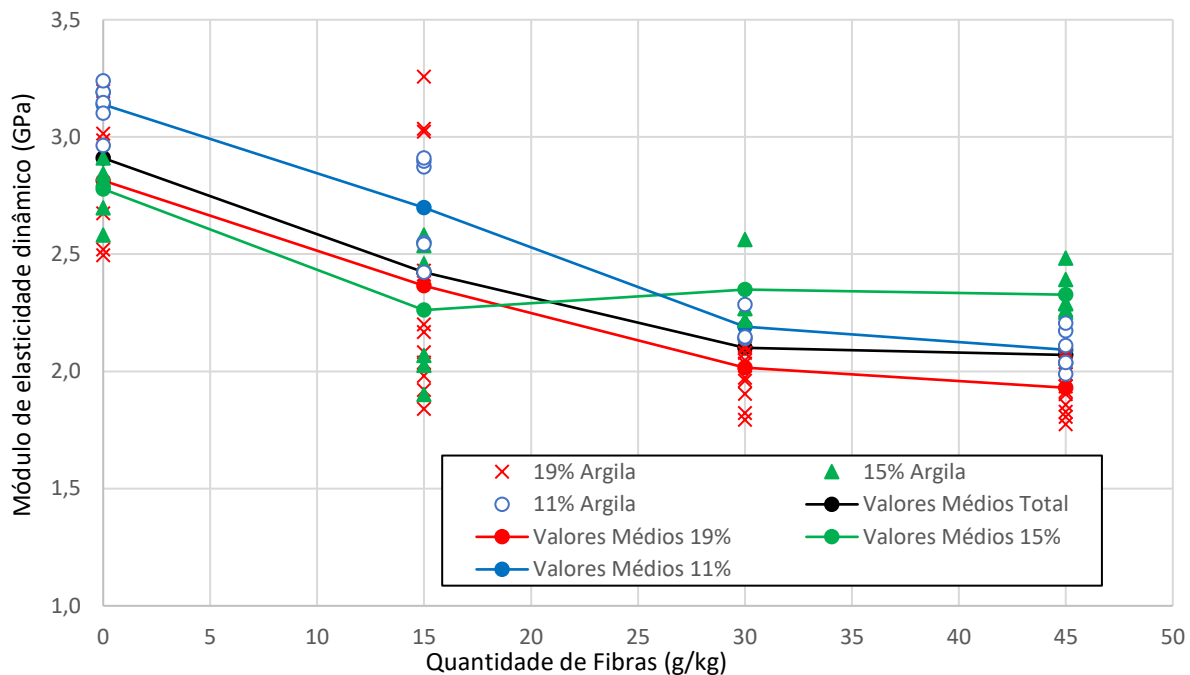


Figura 40 - Influência da quantidade de fibras no módulo de elasticidade dinâmico

#### *Teor de humidade em equilíbrio*

Os resultados do teor de humidade em equilíbrio com a variação da quantidade de fibras adicionadas na mistura estão representados na Figura 41. Como pode ser observado, o teor de humidade em equilíbrio aumenta com o aumento da quantidade de fibras na mistura, verificando-se os seus valores máximos nas misturas com maior quantidade. Este comportamento pode estar relacionado com dois fatores. O primeiro tem haver com uma possível maior higroscopicidade da lã comparativamente à argila, evidenciando o aumento do teor de humidade em equilíbrio com aumento da quantidade de fibras. O segundo fator está relacionado com a diminuição da massa volúmica derivada do aumento da quantidade de fibras, gerando uma maior porosidade aberta no material, facilitando posteriormente este aumento do teor de humidade em equilíbrio. Comparativamente ao valor médio do teor de humidade em equilíbrio para as misturas sem fibras, a adição de 15g/kg, 30g/kg e 45g/kg de fibras, resulta, respetivamente, num aumento médio de 24%, 47% e 88%.

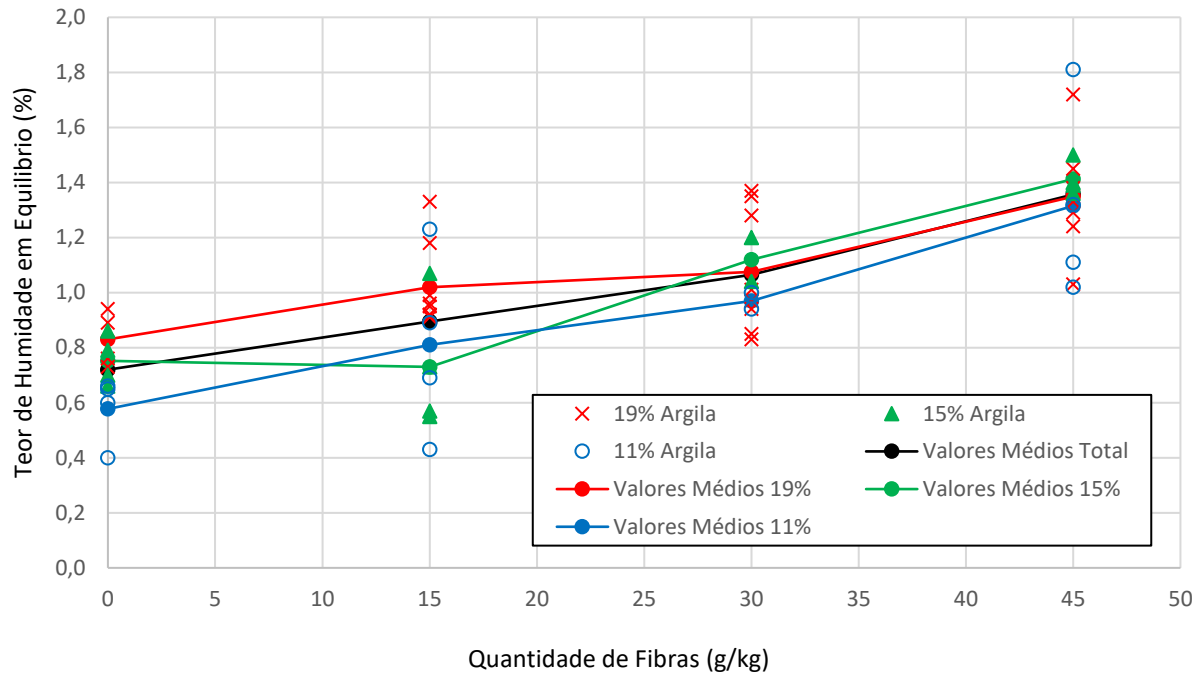


Figura 41 - Influência da quantidade de fibras no teor de humidade em equilíbrio

### Retração

Na Figura 42 é apresentada a relação da retração com a variação da quantidade de fibras na mistura. Analisando-se a figura, é possível verificar um decréscimo da retração dos provetes prismáticos com o incremento da quantidade de fibras na mistura. As fibras aparentemente contrariariam o fenómeno de retração através da restrição das deformações associadas à secagem dos provetes. Este valor pode estar relacionado com o método de medição da retração, o que no caso de variações muito baixas de dimensões não apresenta uma elevada exatidão. Comparativamente ao valor médio da retração para as misturas sem fibras, a adição de 15g/kg, 30g/kg e 45g/kg, de fibras, resultou numa diminuição média da retração de 44%, 60% e 76%, respetivamente.

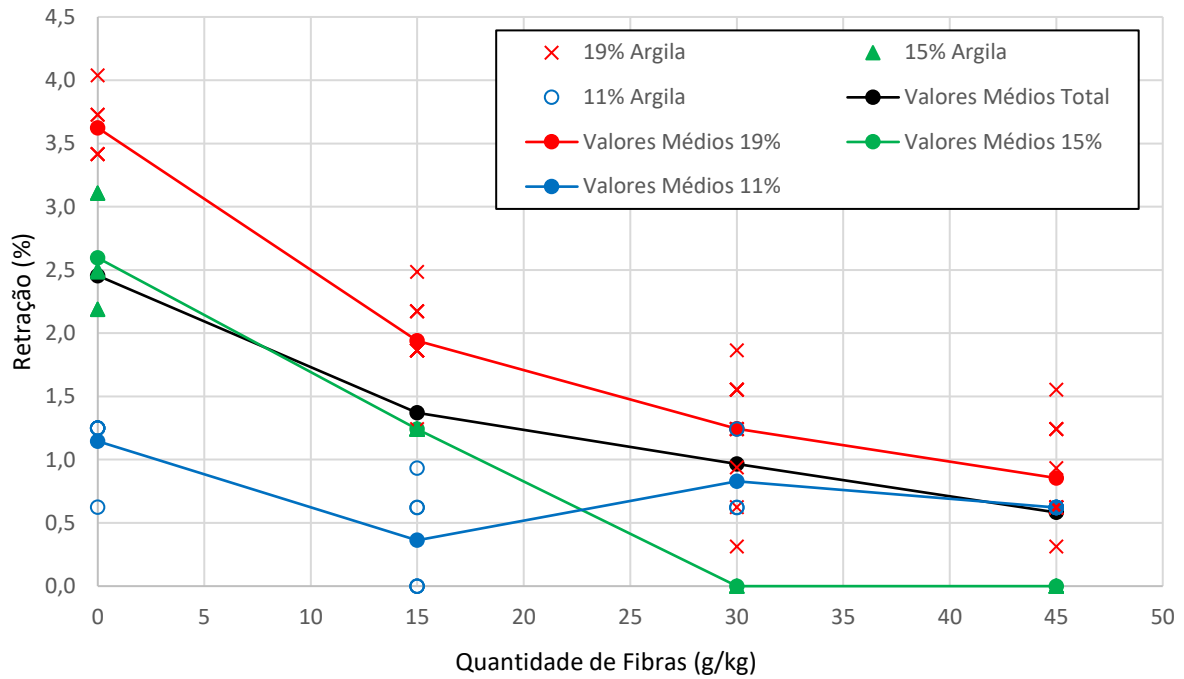


Figura 42 - Influência da quantidade de fibras de lã na retração

#### 4.2.2 Influência do comprimento das fibras de lã

##### Resistência à flexão

A relação entre a resistência à flexão e o comprimento das fibras nas misturas S50A50 é apresentada na Figura 43.

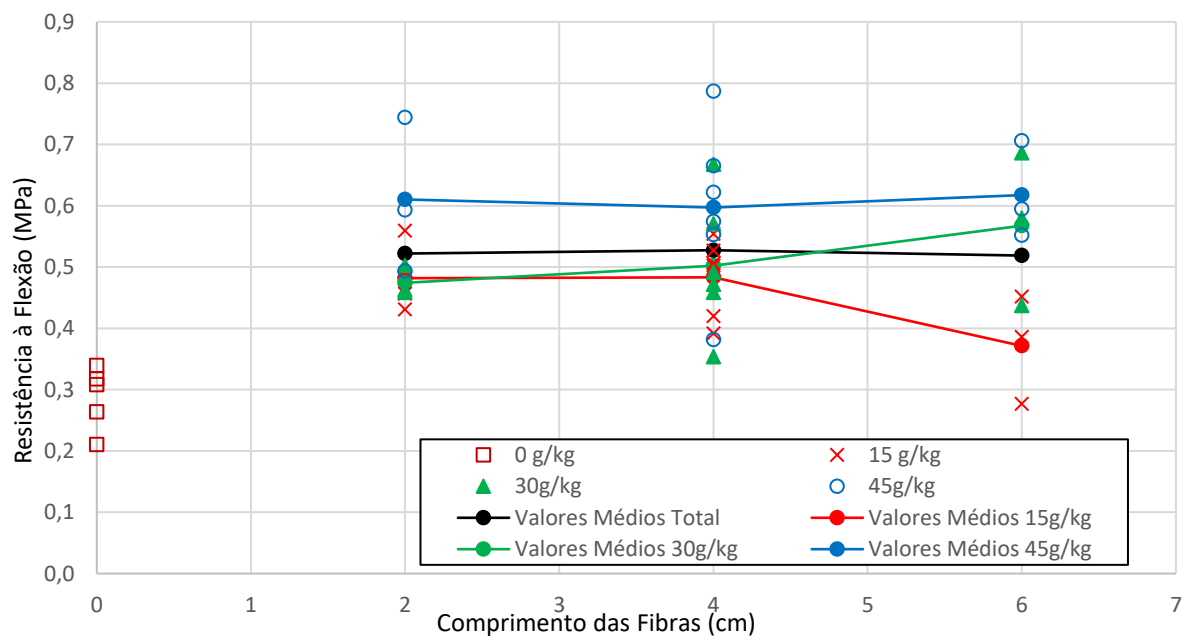


Figura 43 - Influência do comprimento das fibras na resistência à flexão

Observa-se que o aumento do comprimento das fibras não tem uma relação aparente com a resistência à flexão. Possivelmente a ligação entre as fibras e a matriz do material não será crítica para esta propriedade. Contudo, esta observação é afetada pela elevada dispersão observada nos resultados.

#### *Resistência à compressão.*

Na Figura 44 é apresentada a evolução da resistência à compressão com a variação do comprimento das fibras nas misturas S50A50. Analisando-se os dados, é possível verificar uma diminuição da resistência à compressão com o aumento do comprimento das fibras dentro das misturas com a mesma quantidade de fibras. Esta tendência negativa evidencia, eventualmente uma ligação menos eficiente das fibras mais longas à matriz, causada por uma homogeneização da mistura fresca inferior

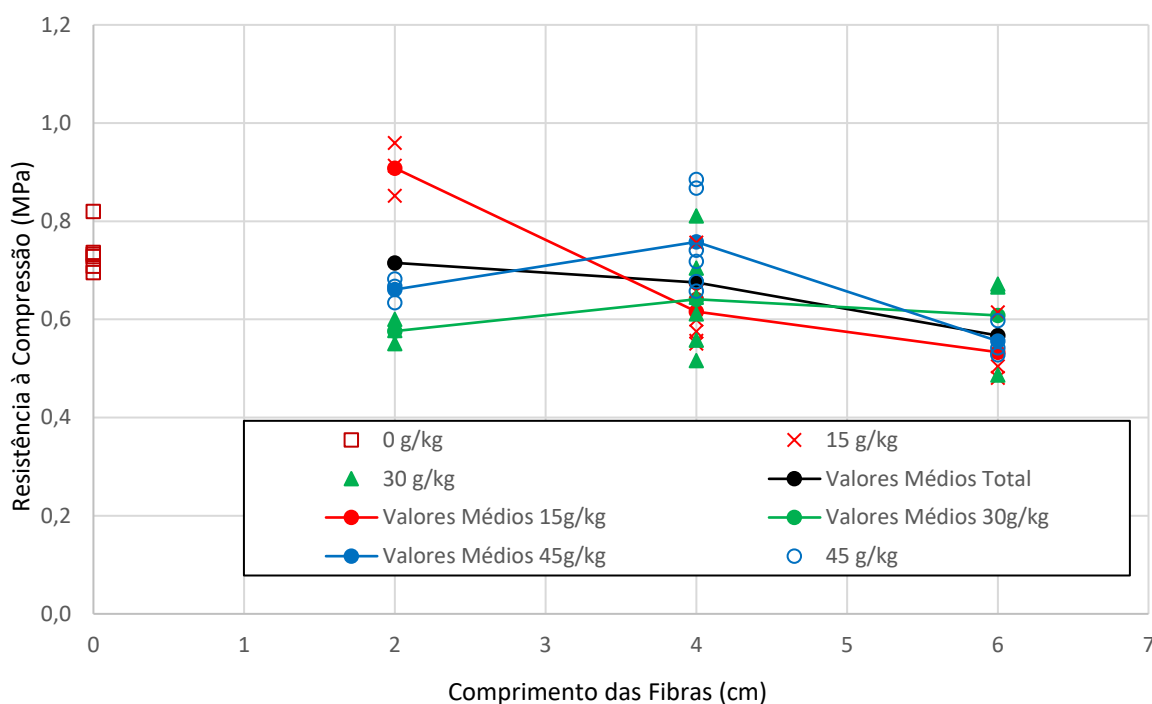


Figura 44 - Influência do comprimento das fibras na resistência à compressão

#### *Massa volúmica*

Na Figura 45 é apresentada a variação da massa volúmica com a variação do comprimento das fibras de lã nas misturas S50A50. É possível observar-se 3 comportamentos distintos entre misturas com diferentes quantidades de fibras. Na família de misturas com 15 g/kg de fibras observa-se uma diminuição da massa volúmica à medida que o comprimento das fibras aumenta. Na família de misturas com 30 g/kg de fibras observa-se o oposto, ou seja, há um aumento da massa volúmica sempre que o

comprimento das fibras aumenta. No último caso, nas famílias de misturas com 45g/kg de fibras, da variação do comprimento dos 2 cm para os 4 cm é possível verifica um aumento da massa volúmica. Contudo na variação do comprimento dos 4 cm para os 6 cm observa-se uma diminuição da massa volúmica dos provetes. Estes 3 comportamentos aparentemente aleatórios não permitem uma conclusão clara sobre a influência do comprimento das fibras na massa volúmica das misturas.

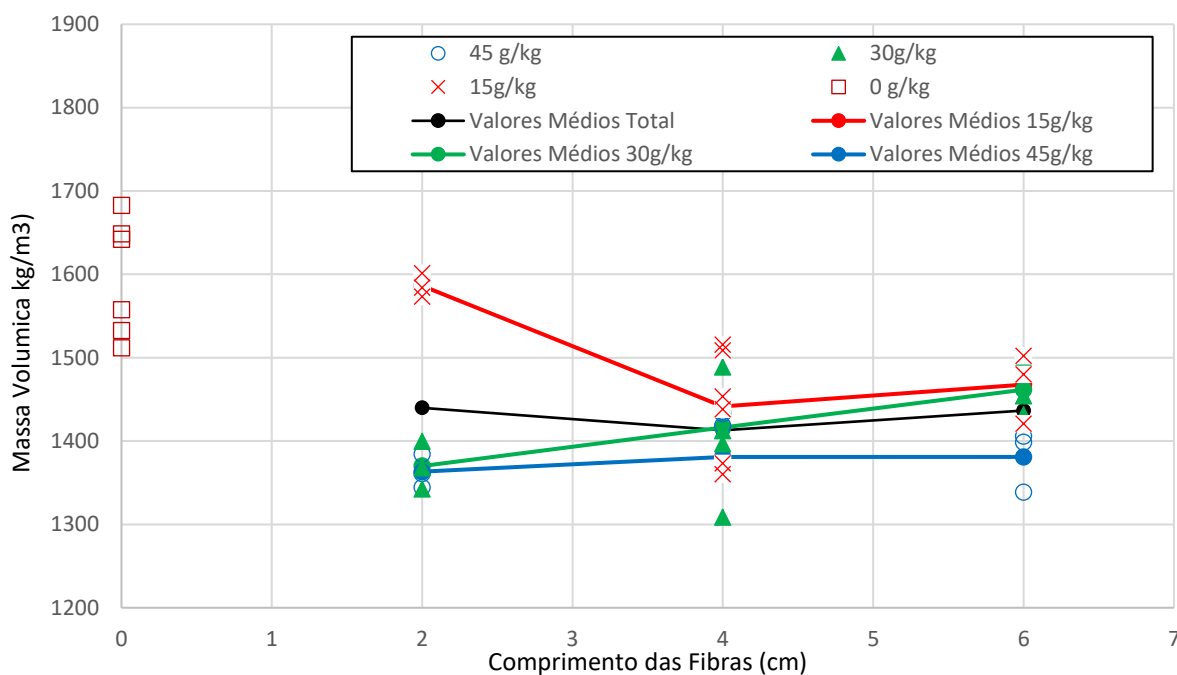


Figura 45 - Influência do comprimento das fibras na massa volúmica

*Velocidade de propagação de ultrassons.*

Na Figura 46 estão apresentadas as medições da velocidade de propagação de ultrassons em função do comprimento das fibras nas misturas S50A50.

No caso das misturas com 30g/kg e 45g/kg de fibras é possível observar-se uma estabilização dos resultados com a variação do comprimento. Contudo nas misturas com 15g/kg de fibras, na variação do comprimento de 2 cm para 4 cm verifica-se um decréscimo acentuado da velocidade de propagação de ultrassons. O mesmo não ocorre na variação do comprimento dos 4 cm para os 6 cm, observando-se uma estabilização da velocidade. Tal aleatoriedade poderá estar relacionada com a dispersão observada para a massa volúmica

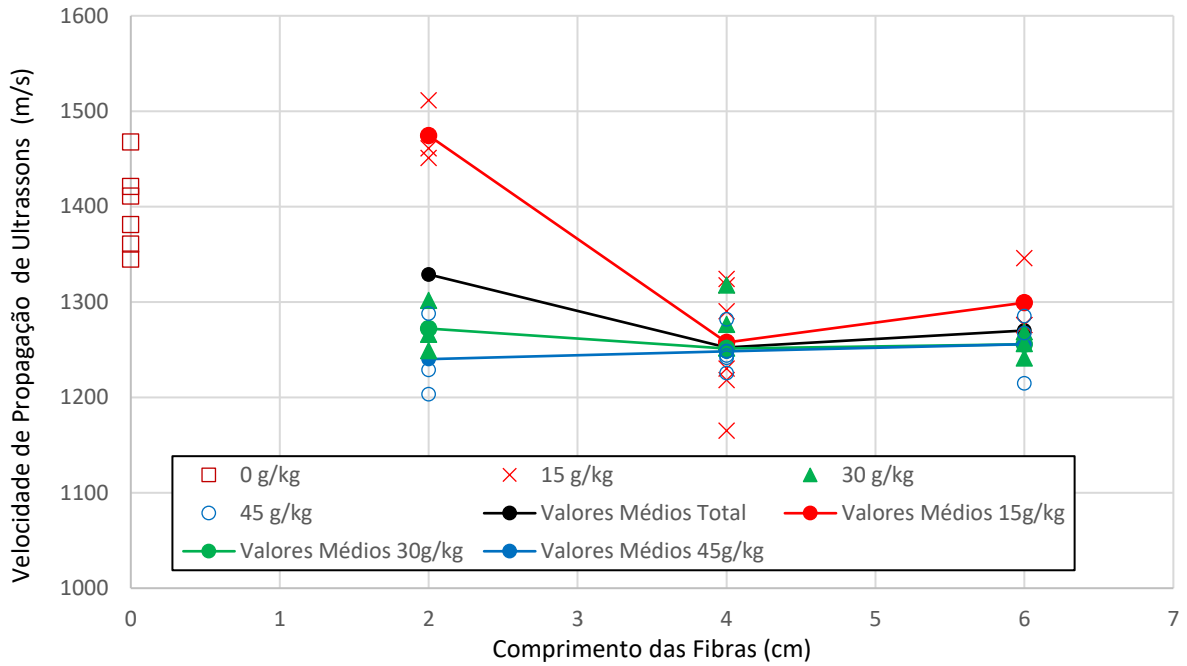


Figura 46 - Influência do comprimento das fibras na velocidade propagação ultrassons

*Módulo de elasticidade dinâmico*

A Figura 47 apresenta a variação do módulo de elasticidade dinâmico com a variação do comprimento das fibras nas misturas S50A50. Esta propriedade depende da velocidade de propagação de ultrassons e da massa volúmica. Mais concretamente, a variação do módulo de elasticidade dinâmico apresenta um comportamento muito similar ao observado para a velocidade de propagação de ultrassons.

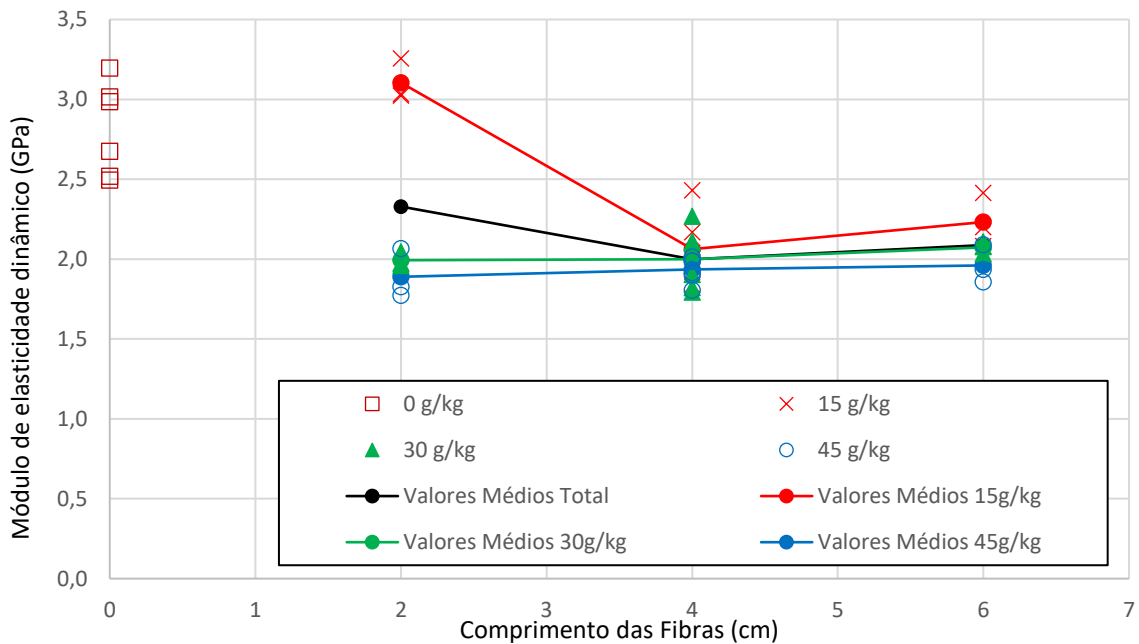


Figura 47 - Influência do comprimento das fibras no módulo de elasticidade dinâmico

*Teor de humidade em equilíbrio*

Na Figura 48 são apresentados os resultados do teor de humidade em equilíbrio com a variação do comprimento das fibras de lã nas misturas S50A50. Analisando os resultados, é possível verificar um aumento do teor de humidade nas misturas com 45g/kg de fibras quando o seu comprimento é aumentado. Contudo, nas restantes misturas com 15g/kg e 30g/kg de fibras, verifica-se um aumento do teor de humidade nas misturas com fibras de 4 cm comparativamente às misturas com fibras com 2 cm e 6 cm de comprimento. De uma forma geral, parece não existir uma influência do comprimento das fibras no teor de humidade em equilíbrio.

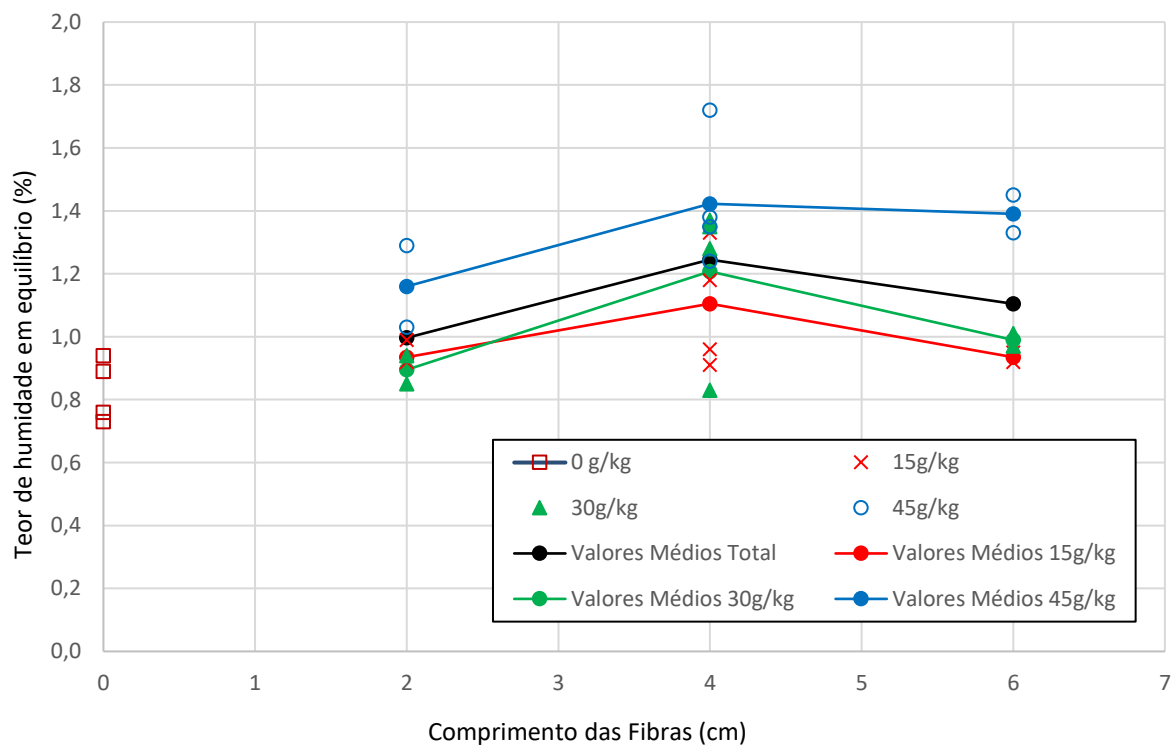


Figura 48 - Influência do comprimento das fibras no teor de humidade em equilíbrio

*Retração*

Na Figura 49 são apresentados os valores da retração com a variação dos comprimentos de fibras nas misturas S50A50. Observando-se, a variação dos valores médios, a retração não apresenta um comportamento consistente, uma vez que, no geral, os valores obtidos foram muito baixos, e método de ensaio realizado não foi suficientemente preciso.



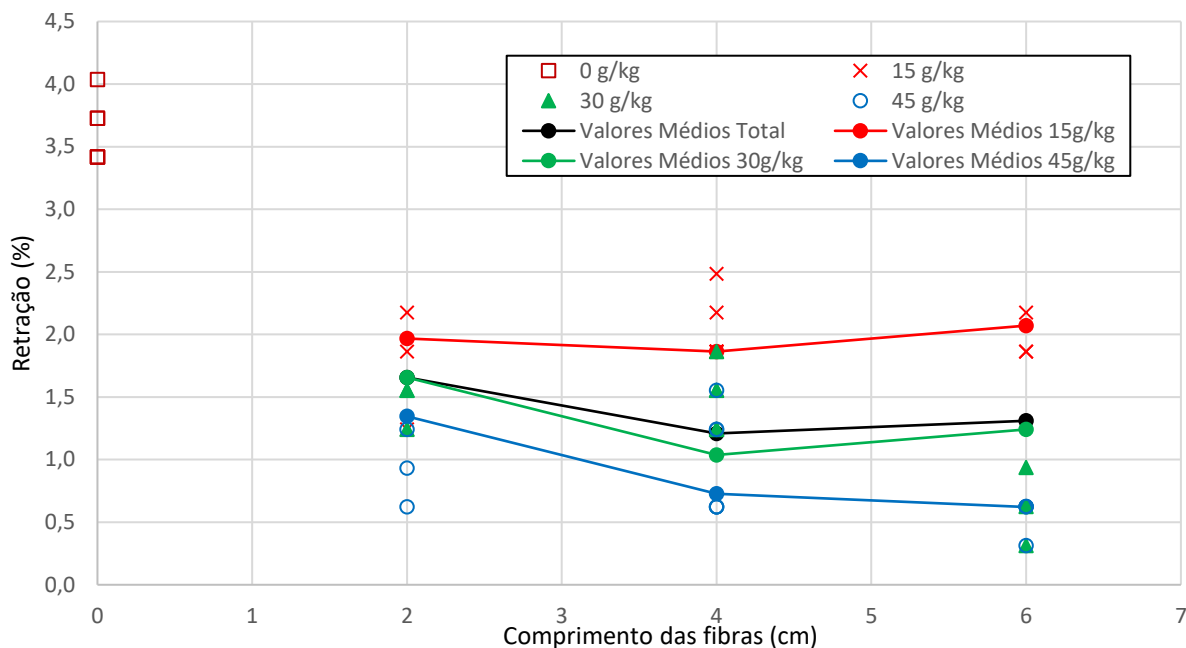


Figura 49 - Influência do comprimento das fibras na retração

#### 4.2.3 Influência da Percentagem de Argila

##### *Resistência à Flexão*

Na Figura 50 é apresentada a relação da resistência à flexão dos provetes com a variação da percentagem de argila nas misturas sem cal hidráulica. Analisando-se os resultados é possível verificar um aumento ligeiro da resistência à flexão com o aumento da percentagem de argila nas misturas com fibras e sem fibras. No entanto, destaca-se uma maior influência da presença ou não das fibras na variação da resistência à flexão.

Na Figura 51 é apresentada a relação da resistência à flexão dos provetes com a variação da percentagem de argila nas misturas com cal hidráulica. No caso específico das misturas com fibras, é possível observar-se um aumento similar às misturas com fibras e sem cal. Contudo, é clara uma maior dispersão dos resultados da resistência. No caso das misturas sem fibras, parece não existir qualquer alteração da resistência à flexão com a percentagem de argila.

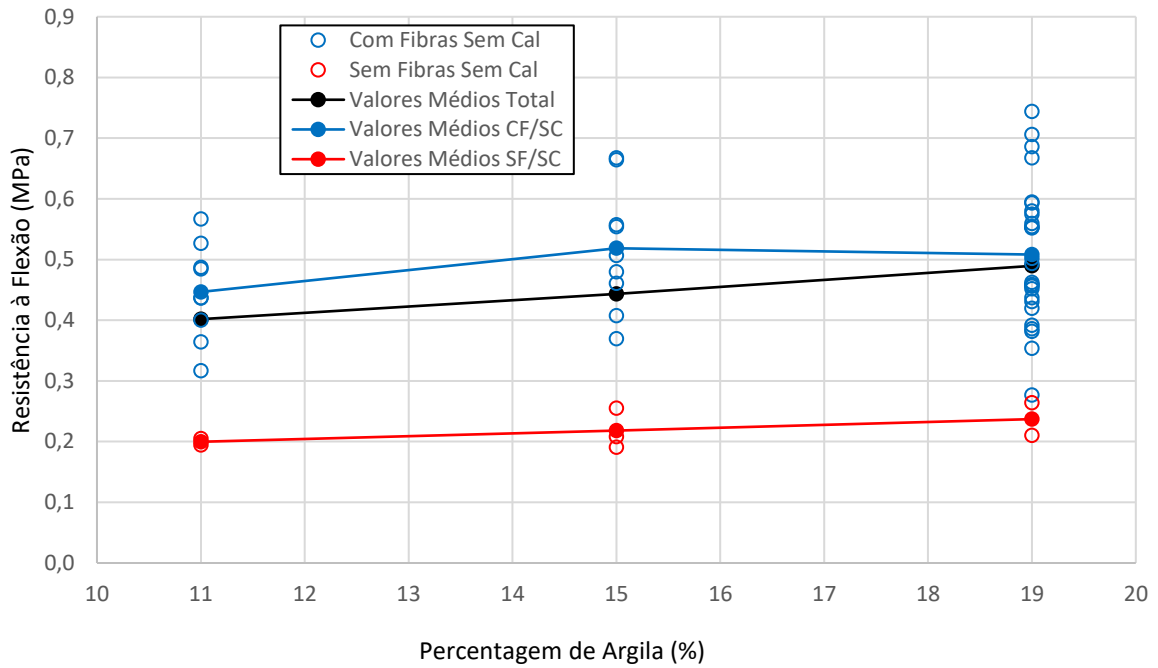


Figura 50 - Influência da porcentagem de argila na resistência à flexão (misturas sem cal hidráulica)

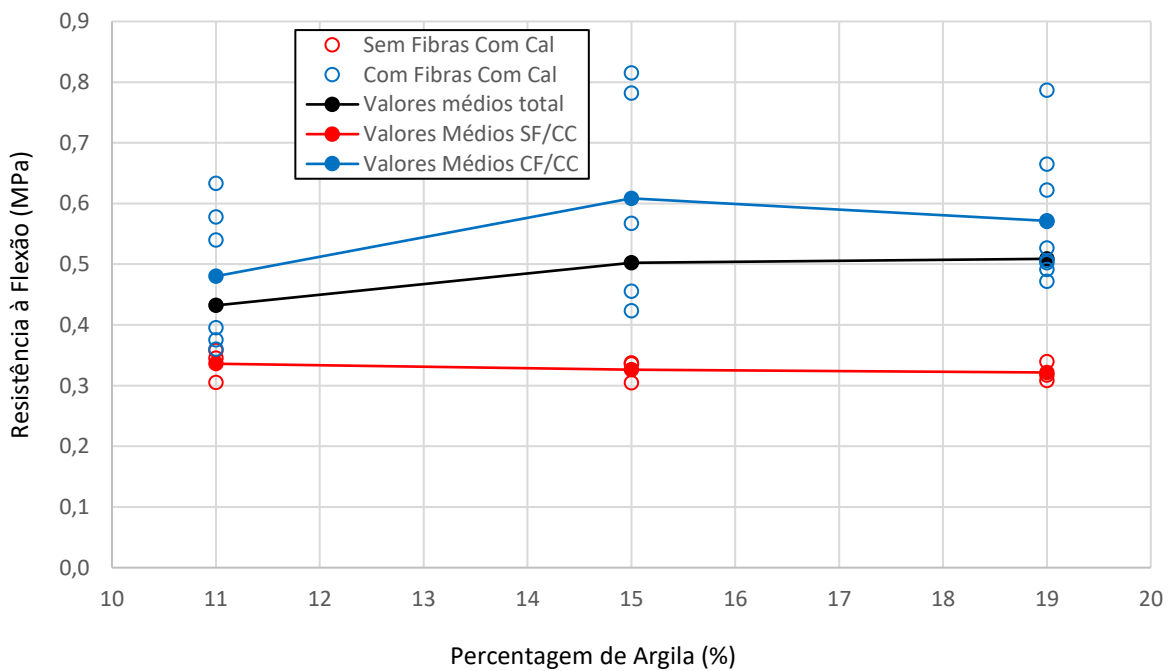


Figura 51 - Influência da porcentagem de argila na resistência à flexão (misturas com cal hidráulica)

*Resistência à compressão*

Os resultados da resistência à compressão relacionados com a variação da porcentagem de argila são apresentados na Figura 52. Observando os resultados, é visível o aumento da resistência à compressão nos dois tipos de misturas. Contudo, nas misturas com fibras, o aumento médio da resistência à

compressão só se verifica na variação da percentagem dos 15% para os 19% de argila. Analisando a mistura com menor percentagem de argila (11%) observou-se nas misturas sem fibras, com 15% e 19% de argila um aumento médio da resistência à compressão, respetivamente, de 25% e 64%.

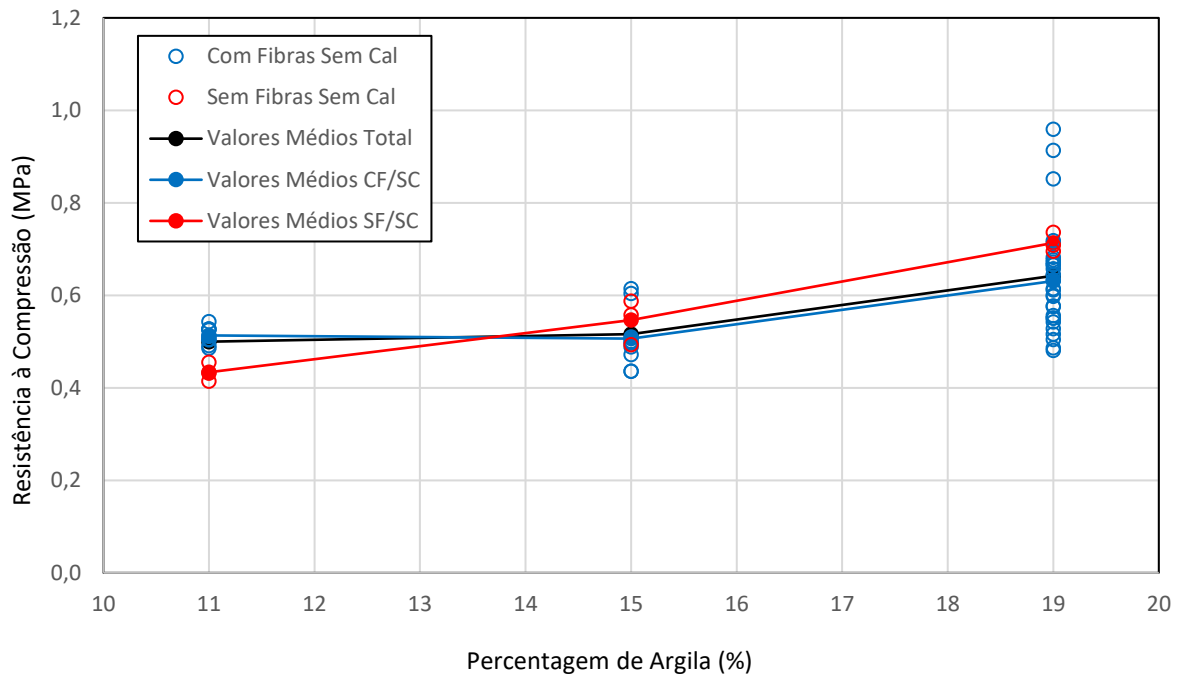


Figura 52 - Influência da percentagem de argila na resistência à compressão (mistura sem cal hidráulica)

Na Figura 53 são apresentados os valores da resistência à compressão com o aumento da percentagem de argila nas misturas com adição de cal hidráulica. Diferentemente ao comportamento observado nas misturas sem a adição de cal, não se verifica um aumento da resistência mecânica com o aumento da percentagem de argila na mistura. Para além disto, os resultados apresentam uma dispersão elevada. Com isto, pode-se concluir que a presença da cal anula a influência da argila como ligante na mistura.

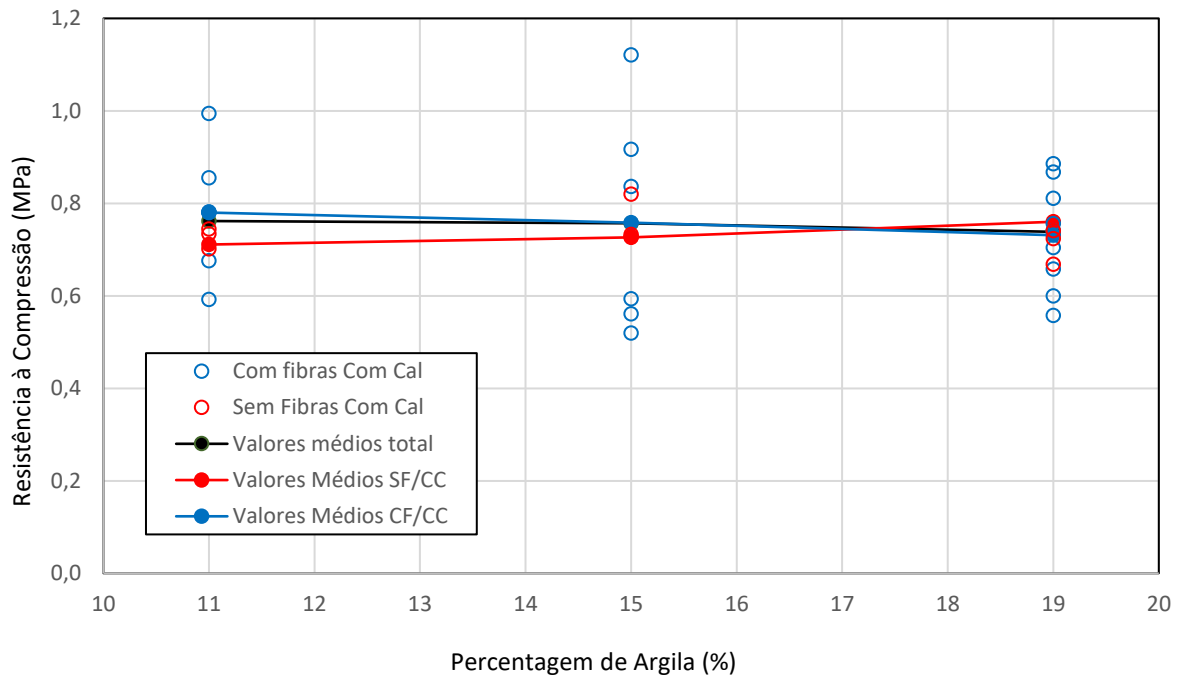


Figura 53 - Influência da percentagem de argila na resistência à compressão (mistura com cal hidráulica)

#### Massa volúmica

A Figura 54 ilustra a variação da massa volúmica com a diferença da percentagem de argila nas misturas sem cal hidráulica. Verificou-se uma diminuição da massa volúmica com o aumento da percentagem de argila. É possível, também, observar-se uma divisão dos resultados da massa volúmica das misturas sem fibras das das misturas com fibras, salientando o facto da presença das fibras contribuir para diminuição da massa volúmica.

A variação da massa volúmica com a variação da percentagem de argila nas misturas com cal hidráulica é apresentada na Figura 55. Analisando os resultados, verifica-se que se mantém a tendência verificada nas misturas sem cal hidráulica, ou seja, a diminuição da massa volúmica com o aumento da percentagem de argila na mistura. O mesmo acontece relativamente à presença ou não de fibras, onde a massa volúmica é significativamente inferior nas misturas com fibras.

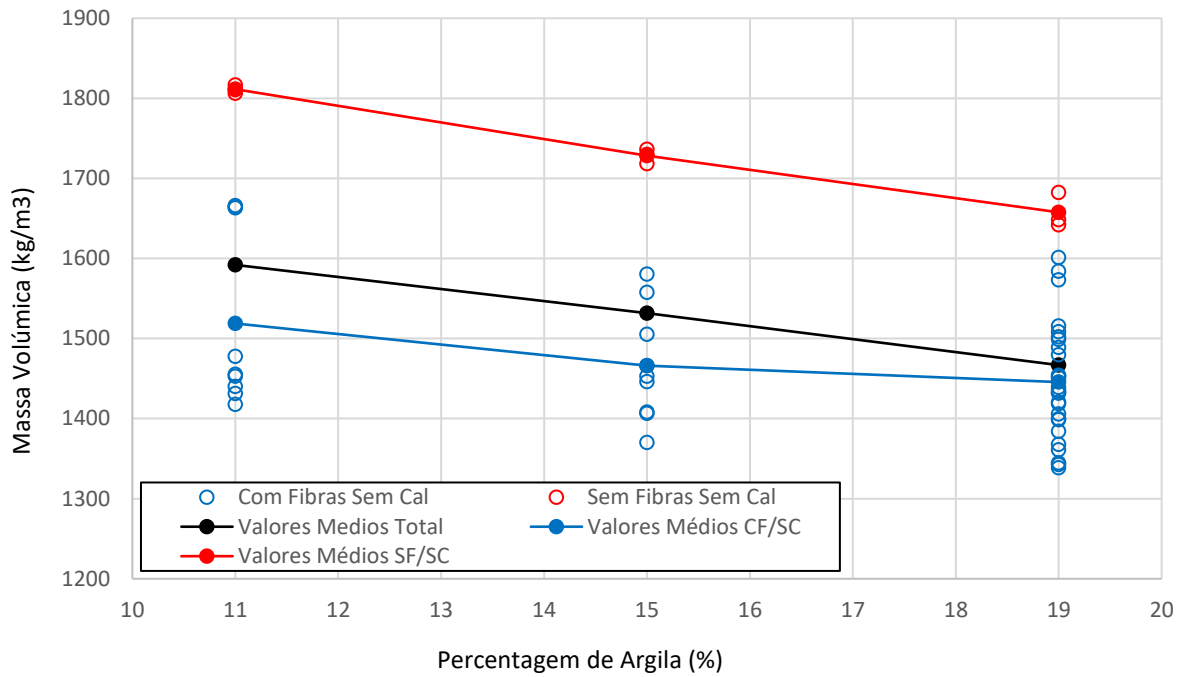


Figura 54 - Influência da porcentagem de argila na massa volúmica (mistura sem cal hidráulica)

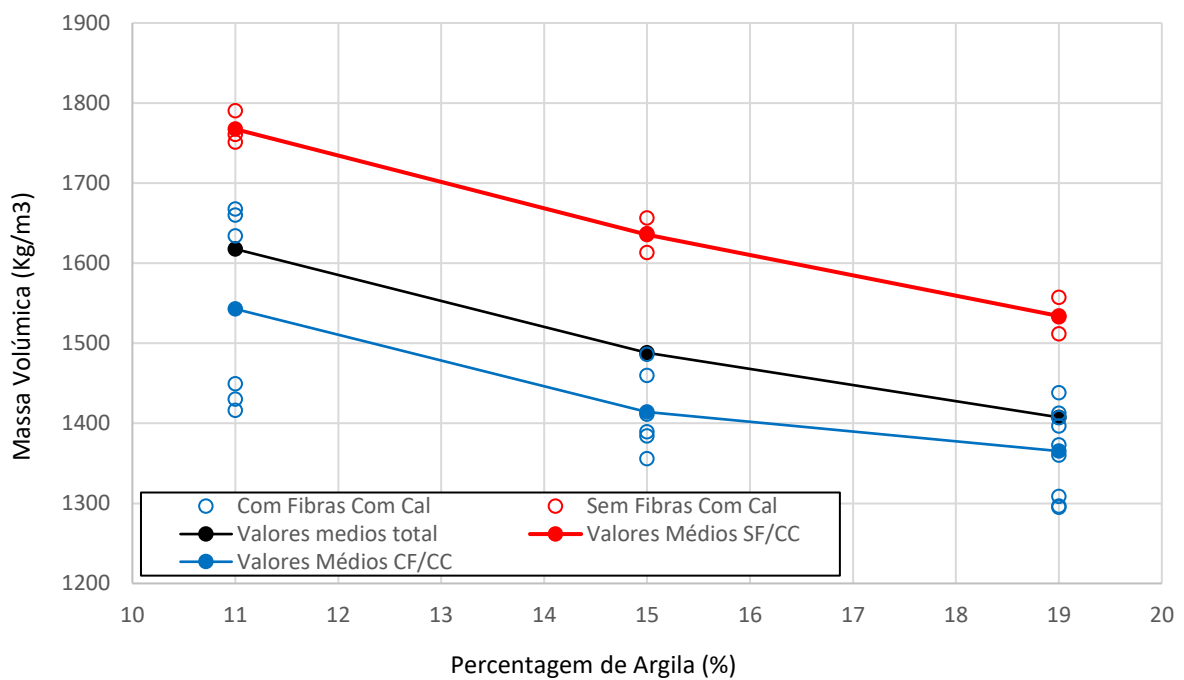


Figura 55 - Influência da porcentagem de argila na massa volúmica (mistura com cal hidráulica)

*Velocidade propagação ultrassons*

Na Figura 56 mostra resultados da relação da velocidade de propagação de ultrassons nos provetes com o aumento da porcentagem de argila nas misturas sem cal. Observando-se que não é possível identificar uma tendência clara da variação da velocidade com o aumento da porcentagem de argila.

Na Figura 57 são apresentados os resultados da velocidade de ultrassons com o aumento da percentagem de argila nas misturas com cal. Neste caso, é possível observar que a velocidade de propagação diminui ligeiramente com o aumento da percentagem de argila na mistura.

Para além disto, os valores máximos da velocidade de propagação de ultrassons nas misturas com cal, encontram-se perto dos 1400 m/s, enquanto nas misturas sem cal ultrapassam os 1500 m/s.

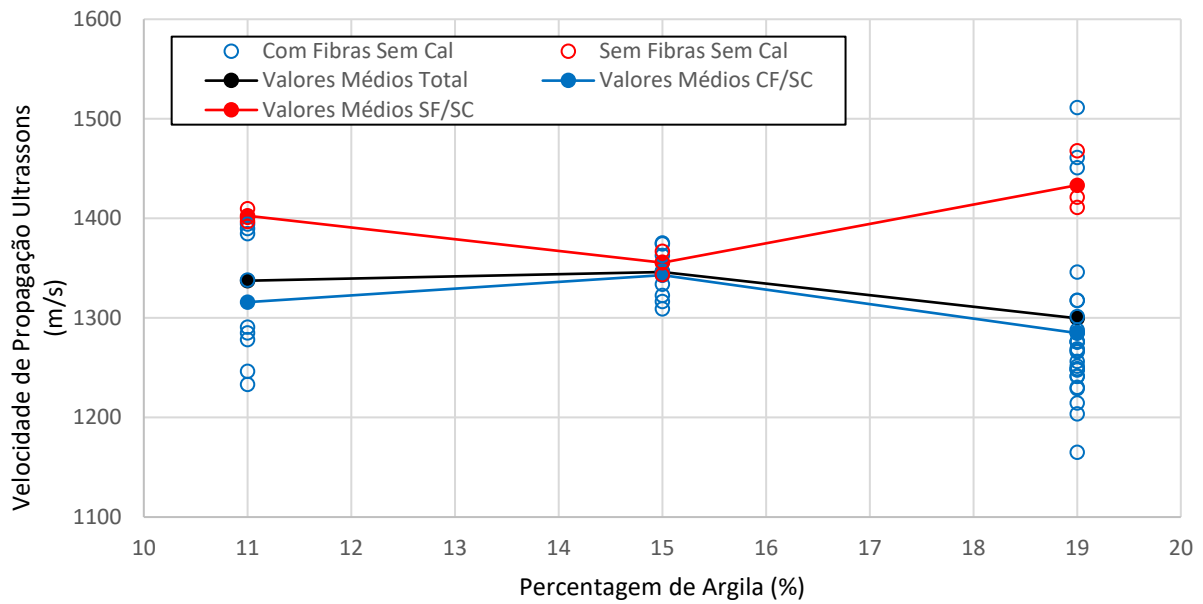


Figura 56 - Influência da percentagem de argila na velocidade de propagação ultrassons (mistura sem cal hidráulica)

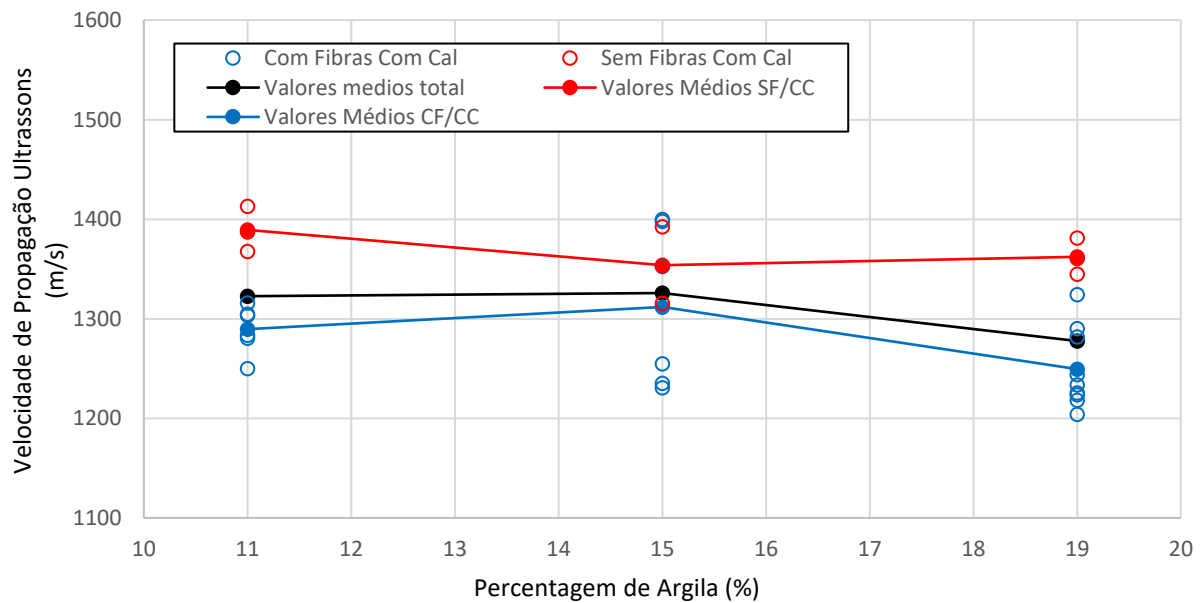


Figura 57 - Influência da percentagem de argila na velocidade de propagação ultrassons (mistura com cal hidráulica)

*Módulo de elasticidade dinâmico*

Na Figura 58, é apresentada a variação do módulo de elasticidade dinâmico com o aumento da percentagem de argila nas misturas sem cal. Não é evidente uma variação linear do módulo de elasticidade dinâmico com o aumento da percentagem de argila, sendo a dispersão dos resultados bastante elevada. Contudo, observa-se uma divisão clara entre os valores do módulo de elasticidade dinâmico das misturas com e sem fibras, sendo que as misturas sem fibras geralmente apresentam valores mais elevados. Esta propriedade, tal como já referido anteriormente, está relacionada com a massa volúmica do provete e dos resultados obtidos da medição da velocidade de propagação de ultrassons.

Na Figura 59 são expostos os resultados do módulo de elasticidade dinâmico dos provetes com a variação da percentagem de argila nas misturas com cal. É possível observar-se uma clara diminuição dos valores do módulo de elasticidade dinâmico com o aumento da percentagem de argila. Comparativamente às misturas com menor percentagem de argila (11%), as misturas de 15% e 19% de argila apresentam uma diminuição de 5% e 17%, respetivamente. Já para as misturas com fibras esta diminuição é de, respetivamente, 12% e 17%.

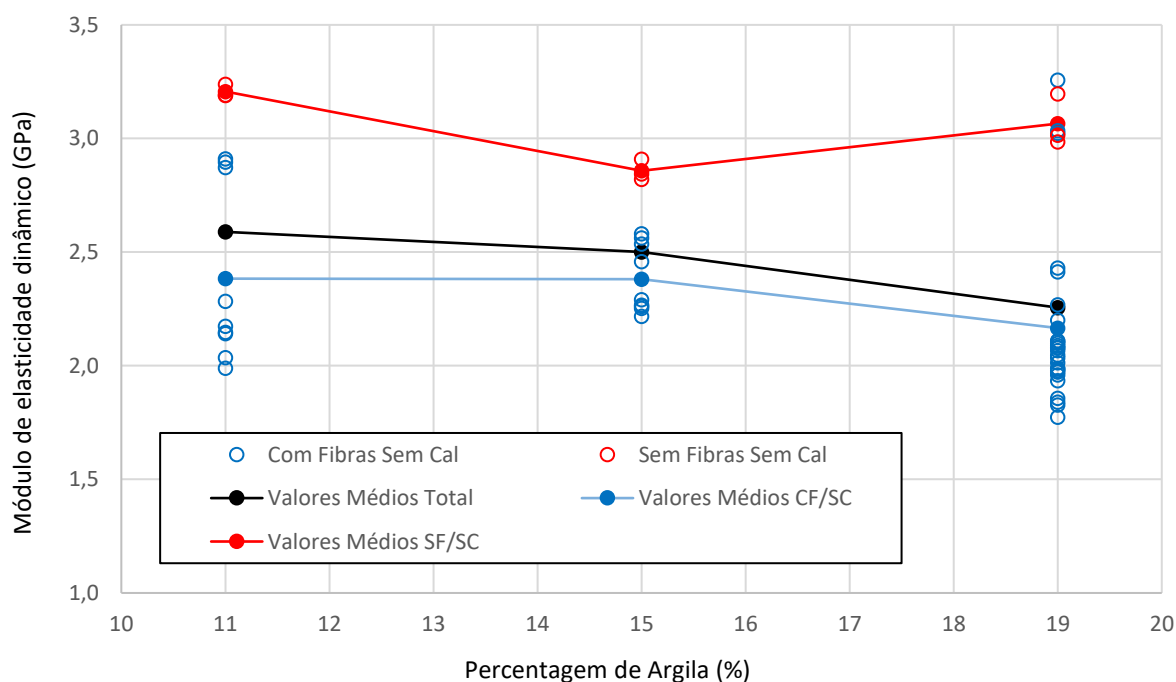


Figura 58 - Influência da percentagem de argila no módulo de elasticidade dinâmico (mistura sem cal hidráulica)

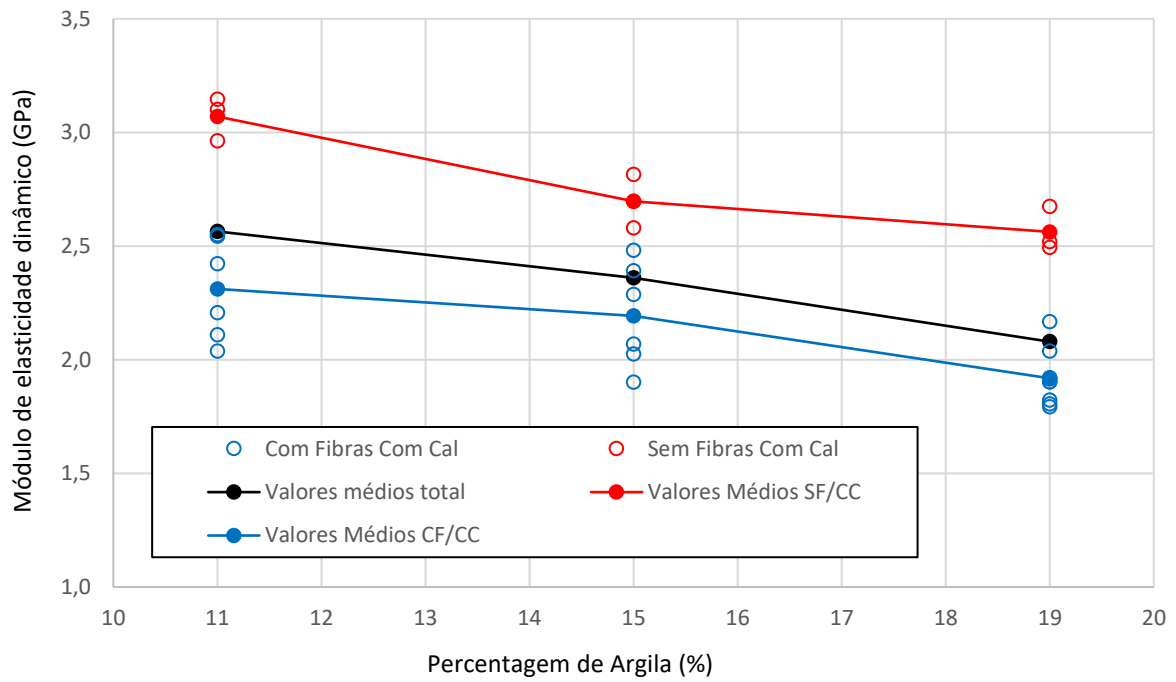


Figura 59 - Influência da porcentagem de argila no módulo de elasticidade dinâmico (mistura com cal hidráulica)

*Teor de humidade equilíbrio*

A variação do teor de humidade em equilíbrio com a variação da porcentagem de argila nas misturas sem cal é exposta na Figura 60.

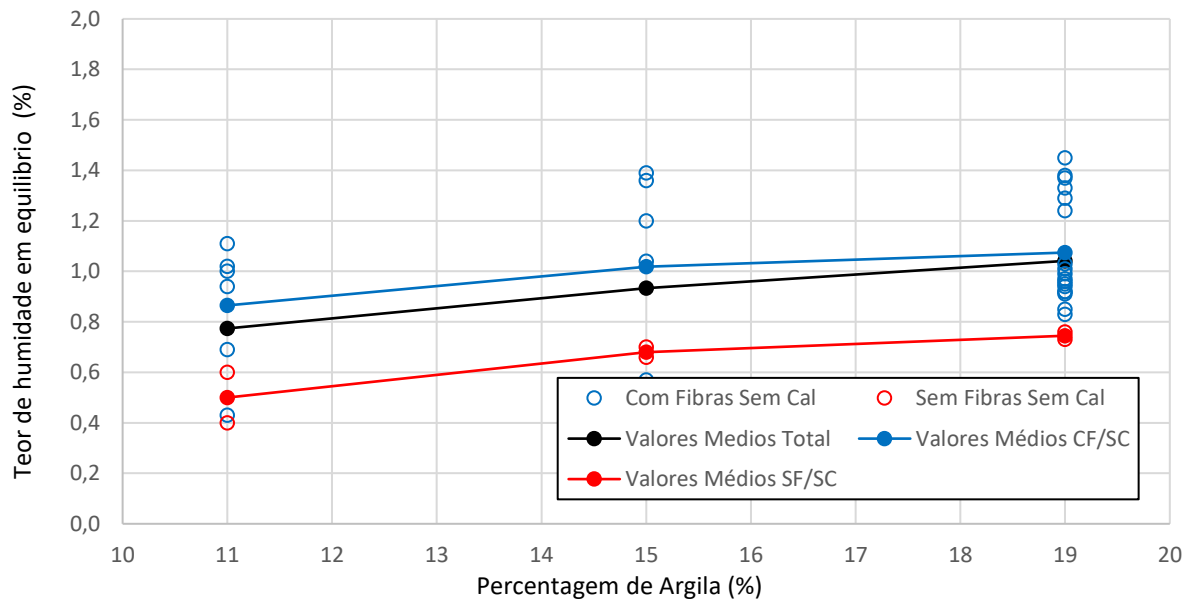


Figura 60 - Influência da porcentagem de argila no teor de humidade em equilíbrio (mistura sem cal hidráulica)



Numa primeira análise, é possível verificar-se um aumento do teor de humidade em equilíbrio nas misturas sem fibras quando há o aumento da percentagem de argila.

Na Figura 61 é apresentada a relação do teor de humidade em equilíbrio com a variação da percentagem de argila nas misturas com cal. Analisando-se os resultados verifica-se um comportamento muito similar ao apresentado no caso das misturas sem adição de cal. No cenário das misturas sem fibras confirma-se a mesma tendência. Contudo, nas misturas com adição de fibras, uma vez mais, verifica-se uma elevada dispersão dos resultados tornando inconclusivo qualquer tipo de tendência.

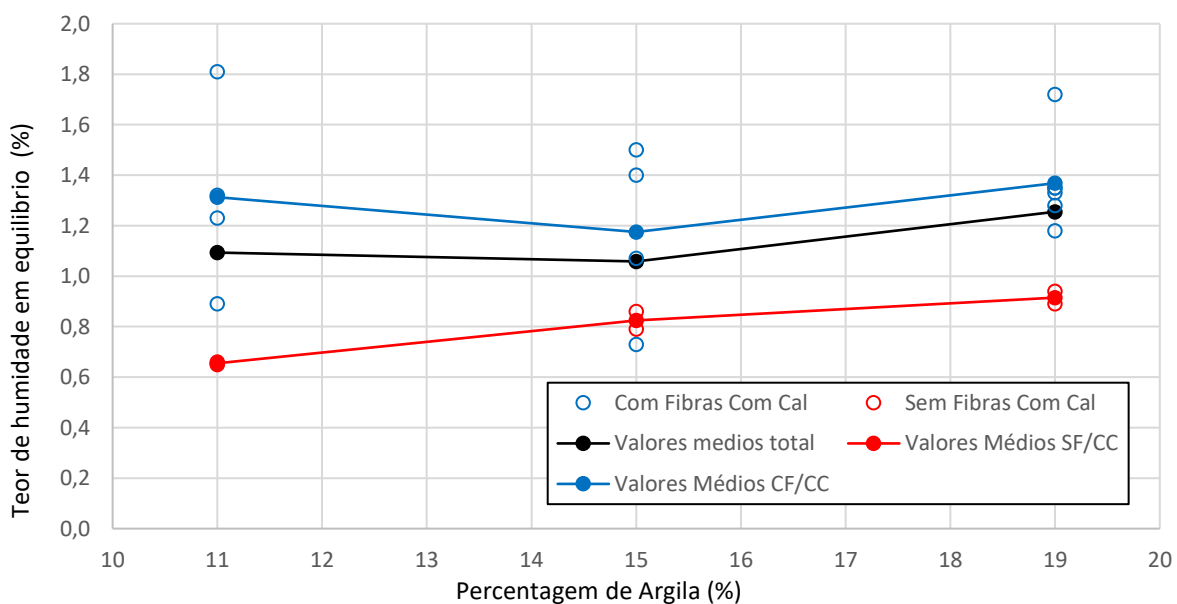


Figura 61 - Influência da percentagem de argila no teor de humidade em equilíbrio (mistura com cal hidráulica)

### Retração

Na Figura 62 pode ser observada a relação entre a retração e a percentagem de argila nas misturas sem cal hidráulica. Verifica-se um aumento da retração com o aumento da percentagem da argila na mistura o que pode ser explicado pela expansão da argila na presença de água e conseqüente retração após secagem. Neste contexto, a presença das fibras contraria o fenómeno de retração.

Na Figura 63 são apresentados os valores da retração com a variação da percentagem de argila nas misturas com cal hidráulica. Nestas misturas observa-se um comportamento igual às misturas sem cal, para ambos cenários de mistura (com e sem fibras).

Além disto, os valores da retração são maiores no caso das misturas sem cal, alcançando os 4% nas misturas sem fibras e os 2.5% nas misturas com fibras. Nas misturas com cal estes valores são ligeiramente inferiores, 3.4% nas misturas sem fibras e 2.1% nas misturas com fibras.

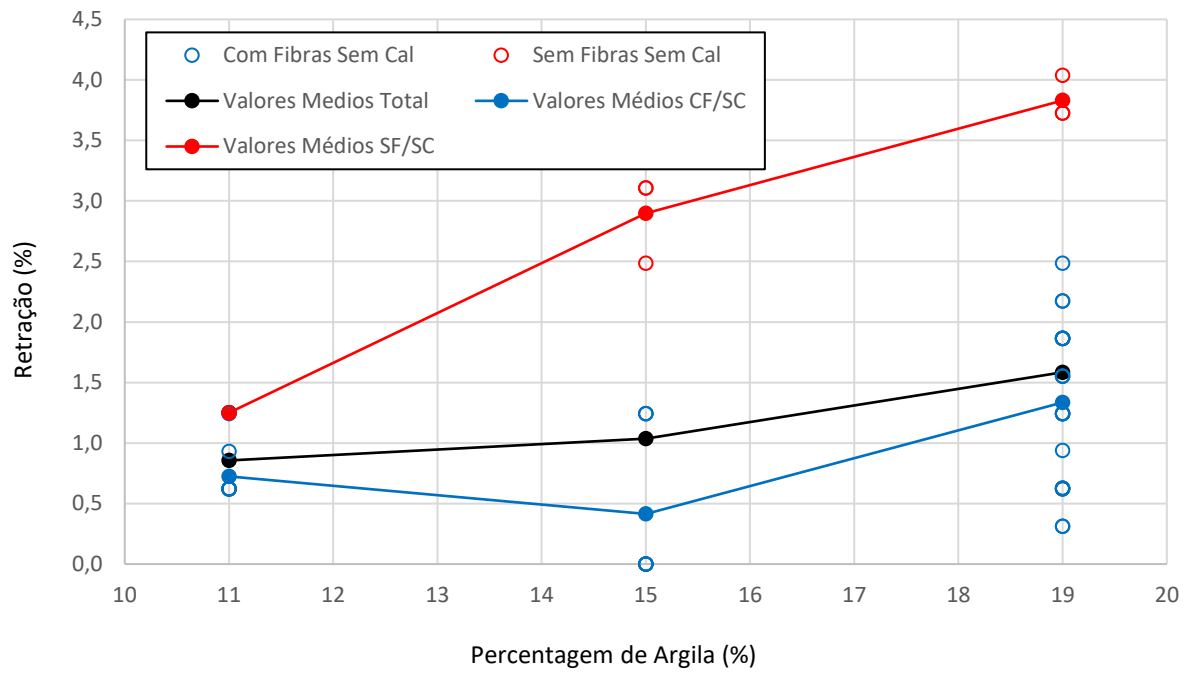


Figura 62 - Influência da porcentagem de argila na retração (mistura sem cal)

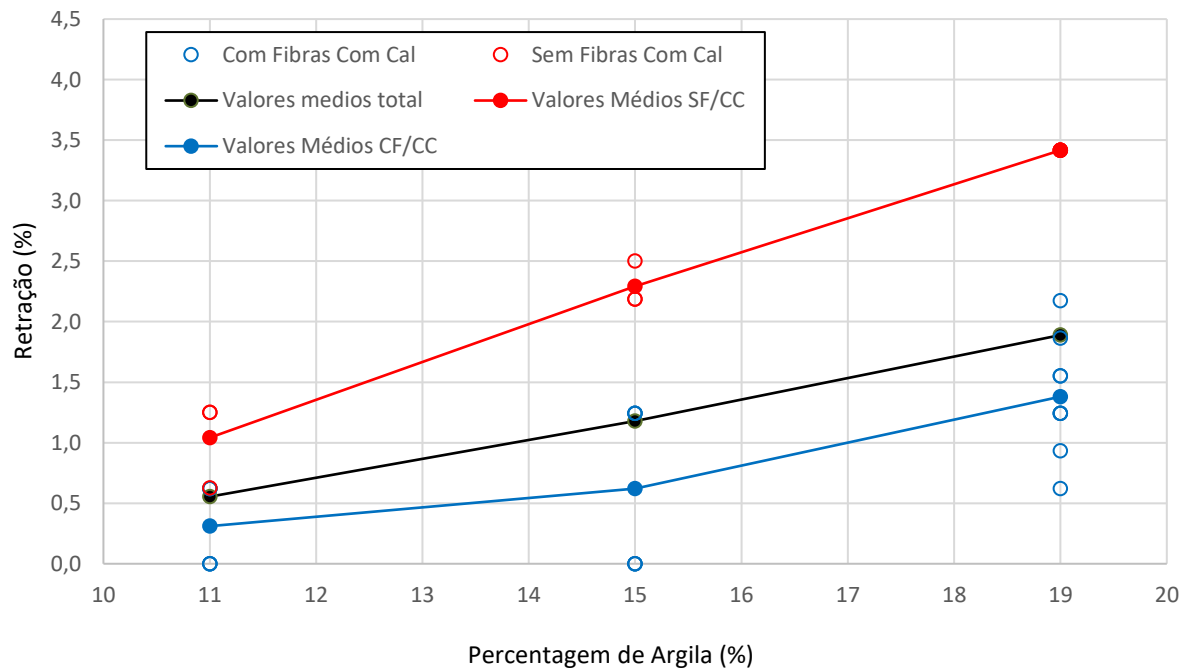


Figura 63 Influência da porcentagem de argila na retração (mistura com cal)

#### 4.2.4 Influência da adição de cal hidráulica

Na matriz de composições, foi incluída a cal hidráulica nas famílias de misturas sem fibras (S50A50, S40A60, S30A70) e também nas famílias de misturas com fibras de 4 centímetros (S50A50F15\_4, S50A50F30\_4, S50A50F45\_4, S40A60F15\_4, S40A60F45\_4, S30A70F15\_4 e S30A70F45\_4). Nesta secção são comparadas as famílias de misturas que possuem as duas versões (com e sem cal hidráulica), de modo a observar o impacto desta nas propriedades do material.

##### *Resistência à flexão*

Na Figura 64 são comparados os valores médios da resistência à flexão dos provetes com cal hidráulica e os sem cal hidráulica. Em todas estas misturas observa-se um aumento dos valores médios da resistência quando a cal é adicionada. Com a adição deste ligante, os valores médios da resistência à flexão aumentam cerca de 28%. Este aumento da resistência mecânica resulta possivelmente dos produtos de hidratação da cal hidráulica que também reage pozolanicamente com a argila das misturas.

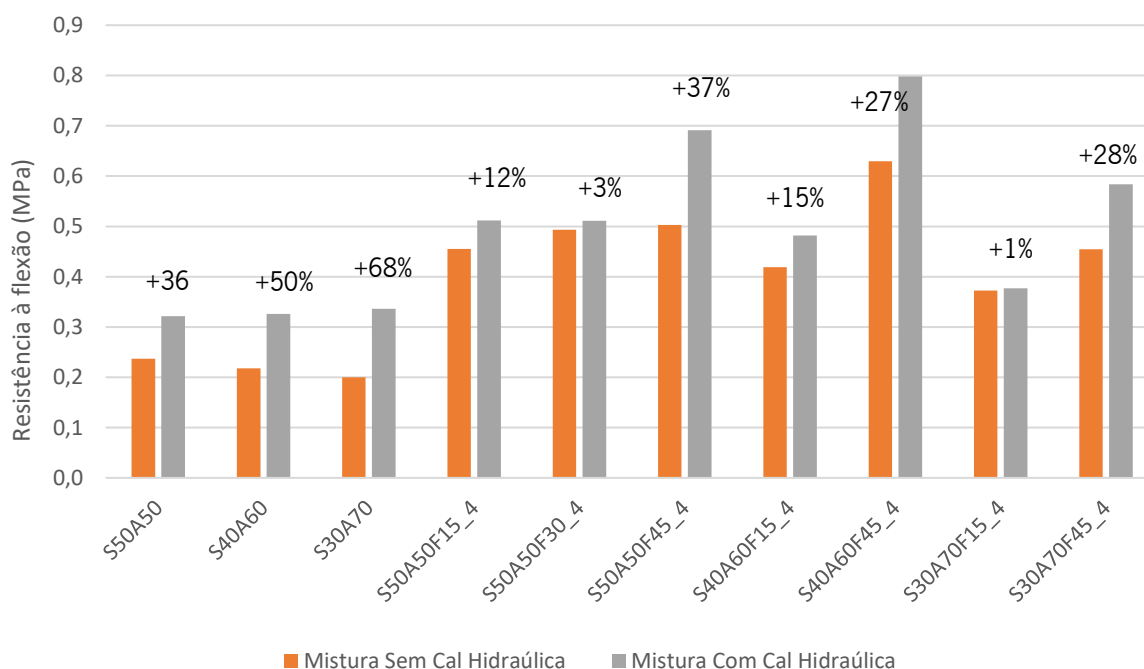


Figura 64 – Influência da cal hidráulica na resistência à flexão

##### *Resistência à compressão*

A Figura 65 é apresentada a comparação dos valores médios da resistência à compressão dos provetes com e sem cal hidráulica. Tal como nos resultados da resistência à flexão, existe uma evolução positiva

dos seus valores médios com a adição do ligante, com um aumento médio de cerca de 36%. Mais uma vez, este aumento da resistência mecânica resulta possivelmente dos produtos de hidratação da cal hidráulica que possivelmente pode também reagir pozolanicamente com a argila das misturas.

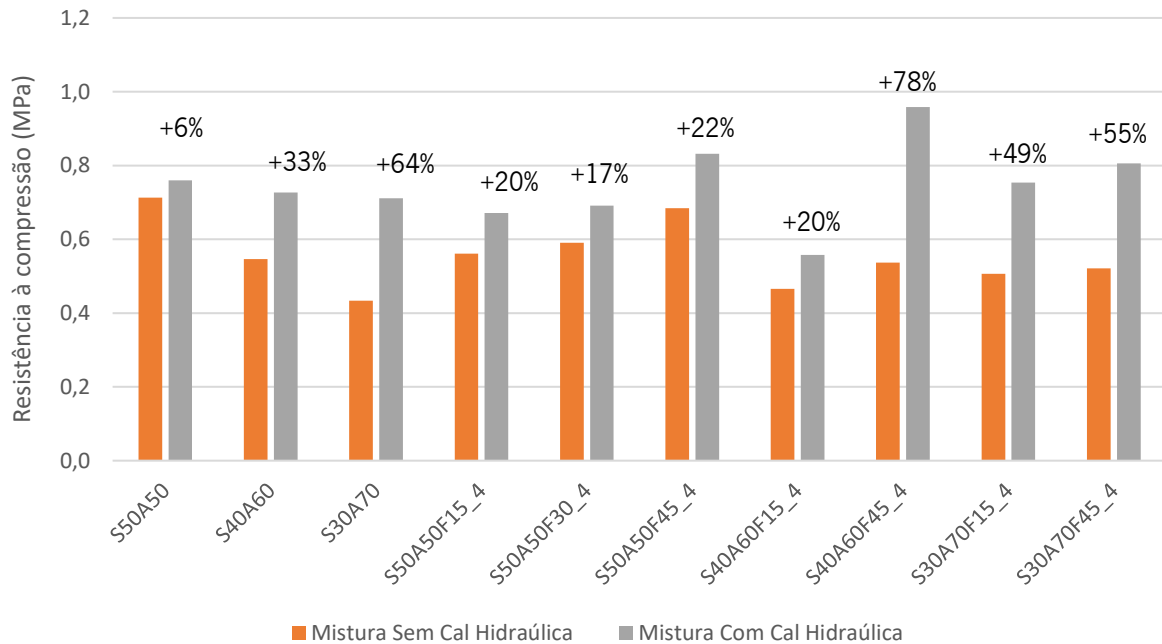


Figura 65 - Influência da cal hidráulica na resistência à compressão

#### *Massa volúmica*

Da análise da Figura 66 é possível constatar-se o efeito da adição de cal hidráulica na massa volúmica de cada tipologia de mistura. Nestes ensaios observou-se a diminuição da massa volúmica de todas as composições com a adição de cal hidráulica. Comparativamente às misturas sem cal, verificou-se uma variação média de 5% da massa volúmica nas misturas com cal hidráulica.

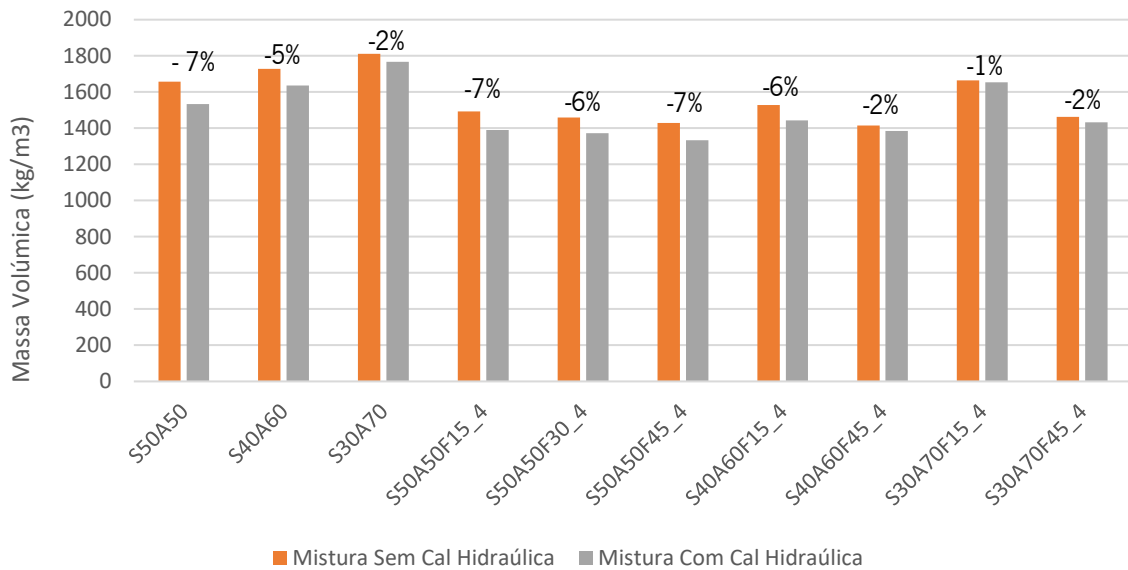


Figura 66 - Influência da cal hidráulica na massa volúmica

*Velocidade de propagação de ultrassons*

Na Figura 67 é apresentada a variação da velocidade de propagação dos ultrassons nas misturas com a adição da cal hidráulica. Ao contrário das duas propriedades discutidas anteriormente, neste caso não se observa uma influência clara da adição da cal hidráulica. Contudo nas misturas sem fibras parece ocorrer uma diminuição da velocidade com a adição da cal. Já nas misturas com fibras esta influência parece aleatória.

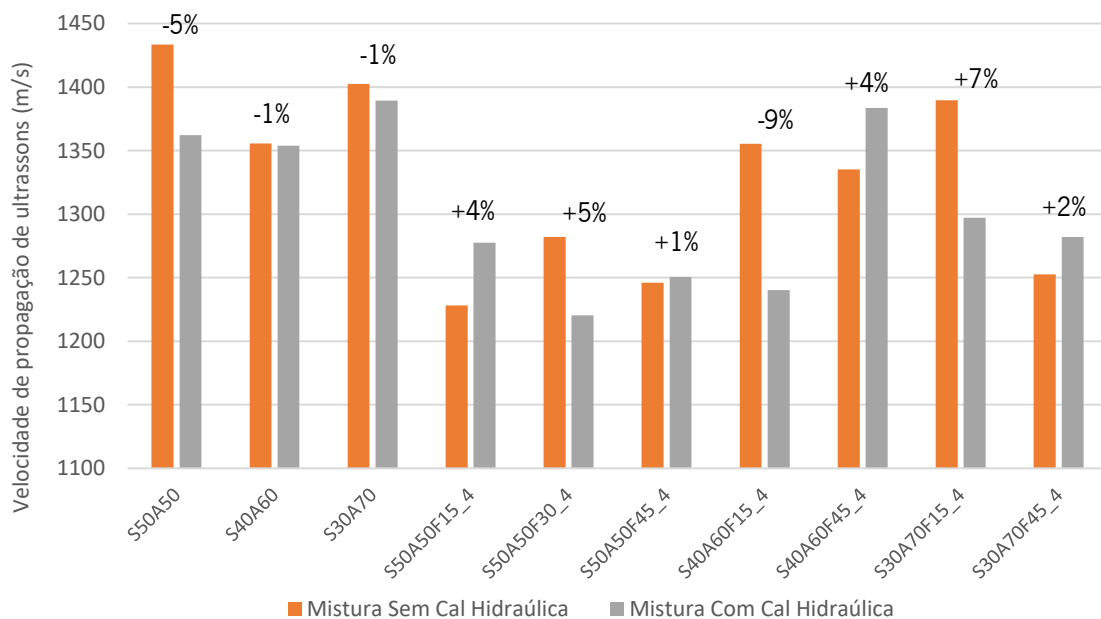


Figura 67 - Influência da cal hidráulica na velocidade de propagação de ultrassons

*Módulo de elasticidade dinâmico*

Na Figura 68 - Influência da cal hidráulica no módulo de elasticidade dinâmico são comparados os valores médios do módulo de elasticidade dinâmico dos provetes com cal hidráulica e sem cal hidráulica. Em geral, observa-se a diminuição do módulo de elasticidade quando é adicionada a cal hidráulica. Contudo nas misturas S40A60F45\_4 e S30A70F45\_4, o valor do módulo de elasticidade aumenta com adição da cal hidráulica.

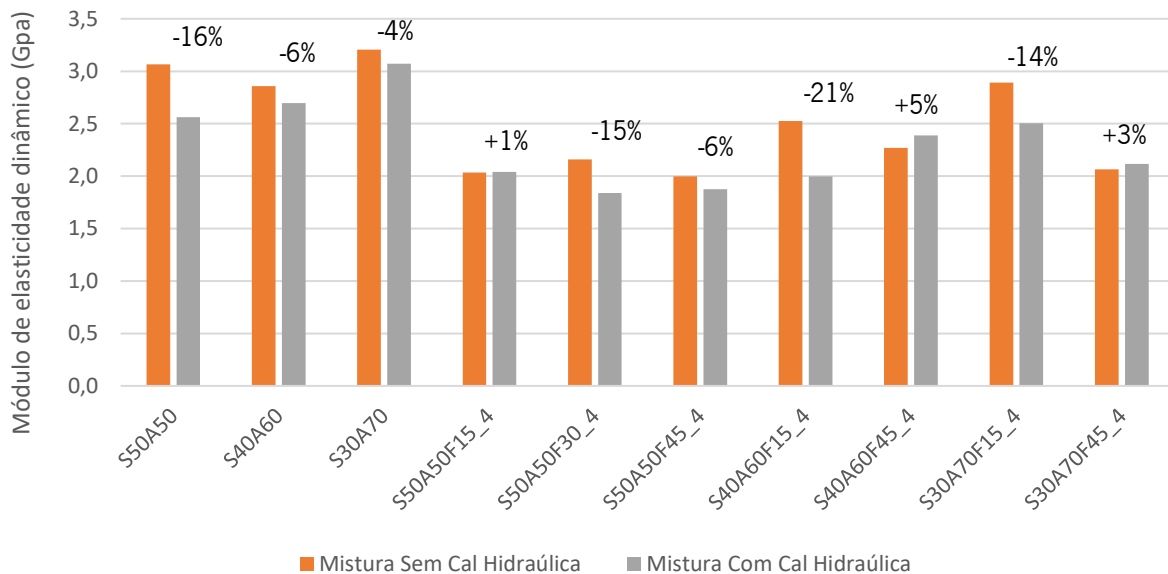


Figura 68 - Influência da cal hidráulica no módulo de elasticidade dinâmico

*Teor de humidade em equilíbrio*

Na análise da Figura 69 é possível verificar o comportamento do teor de humidade dos provetes em equilíbrio com a adição da cal hidráulica. Analisando-se os resultados verifica-se um aumento do teor de humidade em equilíbrio. Comparativamente às misturas sem cal, verificou-se uma variação média de 35% do teor de humidade em equilíbrio nas misturas com cal hidráulica.

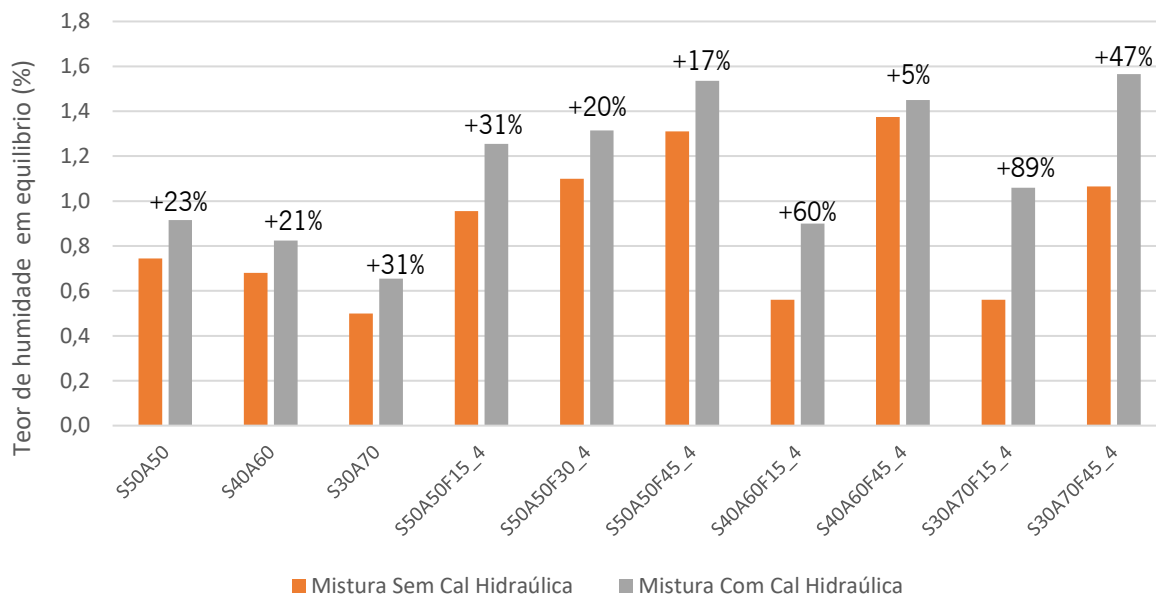


Figura 69 - Influência da cal hidráulica no teor de humidade em equilíbrio

### Retração

A comparação da retração média dos provetes com e sem cal hidráulica apresenta-se na Figura 70.

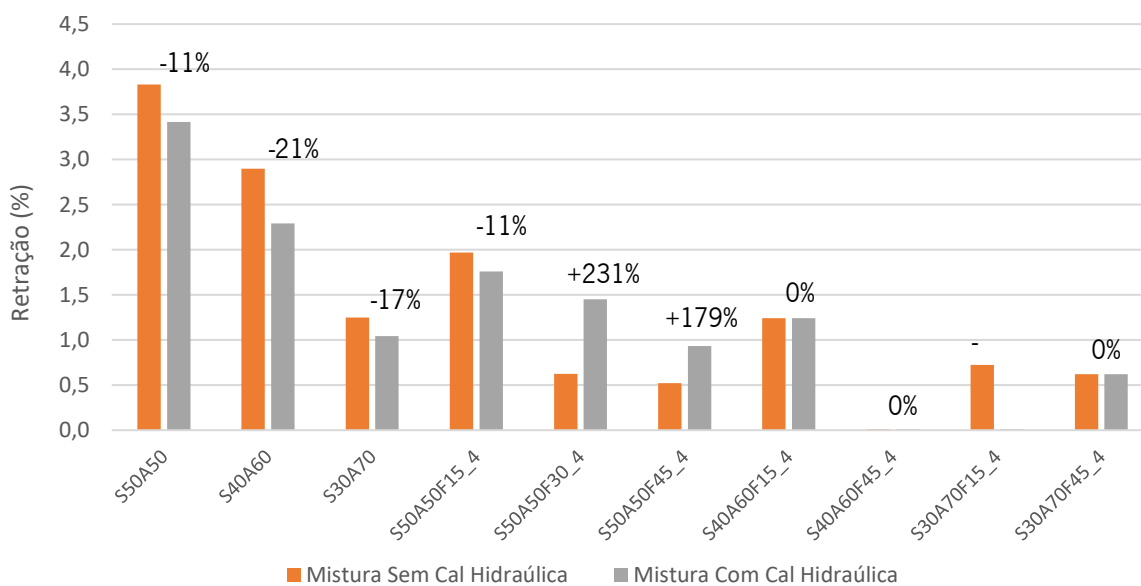


Figura 70 - Influência da cal hidráulica na retração

Nas misturas sem adição de fibras, existe uma diminuição da retração com a adição da cal. Com a incorporação de fibras, a variação dos valores médios da retração não apresenta um comportamento consistente, uma vez que em geral se obtêm valores muito baixos desta propriedade. situação para qual o método de ensaio não tem precisão suficiente.

#### 4.2.5 Influência da massa volúmica

##### *Resistência à flexão*

A Figura 71 ilustra a variação da resistência de à flexão com a variação da massa volúmica. Analisando-se os resultados, é possível observar uma tendência negativa dos valores da resistência com o aumento da massa volúmica. Este comportamento confirma as relações anteriormente analisadas, pois fatores como o aumento da quantidade de fibras, a adição da cal hidráulica e o aumento da percentagem de argila levaram à diminuição da massa volúmica da mistura e também melhoraram os resultados da resistência à flexão.

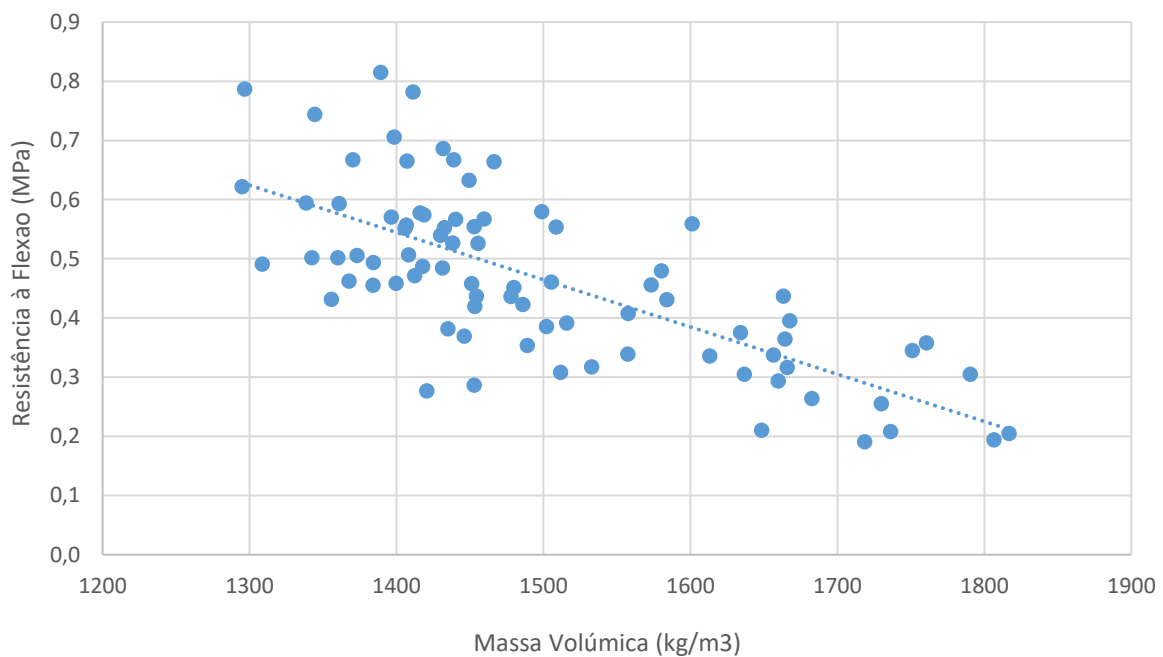


Figura 71 - Influência da massa volúmica na resistência à flexão

##### *Resistência à compressão*

A Figura 72 ilustra a comparação dos valores da resistência à compressão dos provetes com o aumento da massa volúmica. Analisando-se os resultados, não é possível verificar uma variação linear dos valores da resistência com o aumento da massa volúmica.



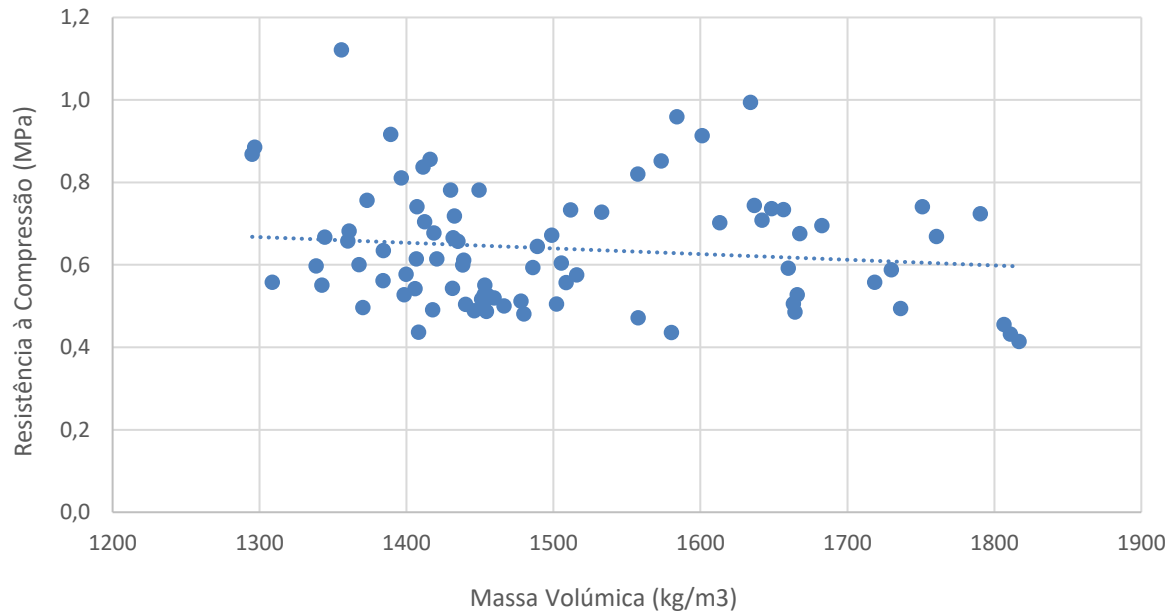


Figura 72 - Influência da massa volúmica na resistência à compressão

#### *Velocidade de propagação de ultrassons*

Da análise da Figura 73 é possível verificar os resultados da medição da velocidade de propagação de ultrassons com o aumento da massa volúmica. Observando-se os dados obtidos é possível reparar numa tendência de aumento da velocidade medida quando a massa volúmica aumenta.

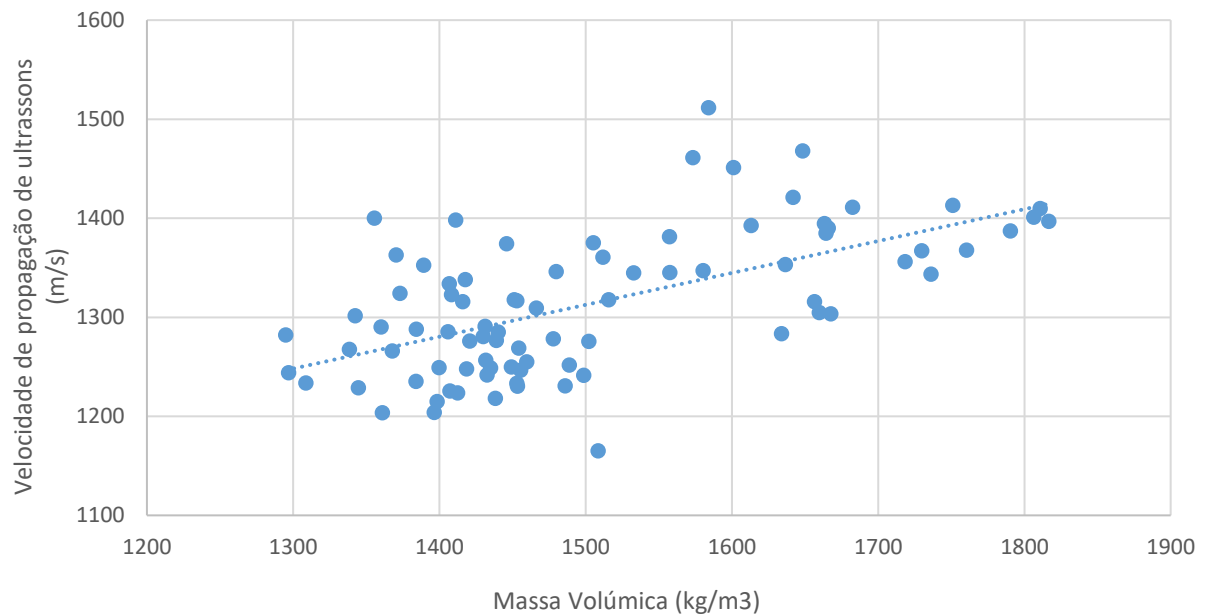


Figura 73 - Influência da massa volúmica na velocidade de propagação de ultrassons

*Módulo de elasticidade dinâmico*

Pela observação da Figura 74, é evidente o aumento do módulo de elasticidade dinâmico com o aumento da massa volúmica da mistura. Esta tendência está relacionada com o comportamento observado na variação da velocidade de propagação de ultrassons, pois o módulo de elasticidade dinâmico depende da velocidade de propagação de ultrassons e da massa volúmica. Ou seja, com o aumento da massa volúmica e o aumento da velocidade de propagação de ultrassons, o módulo de elasticidade dinâmico também vai aumentar.

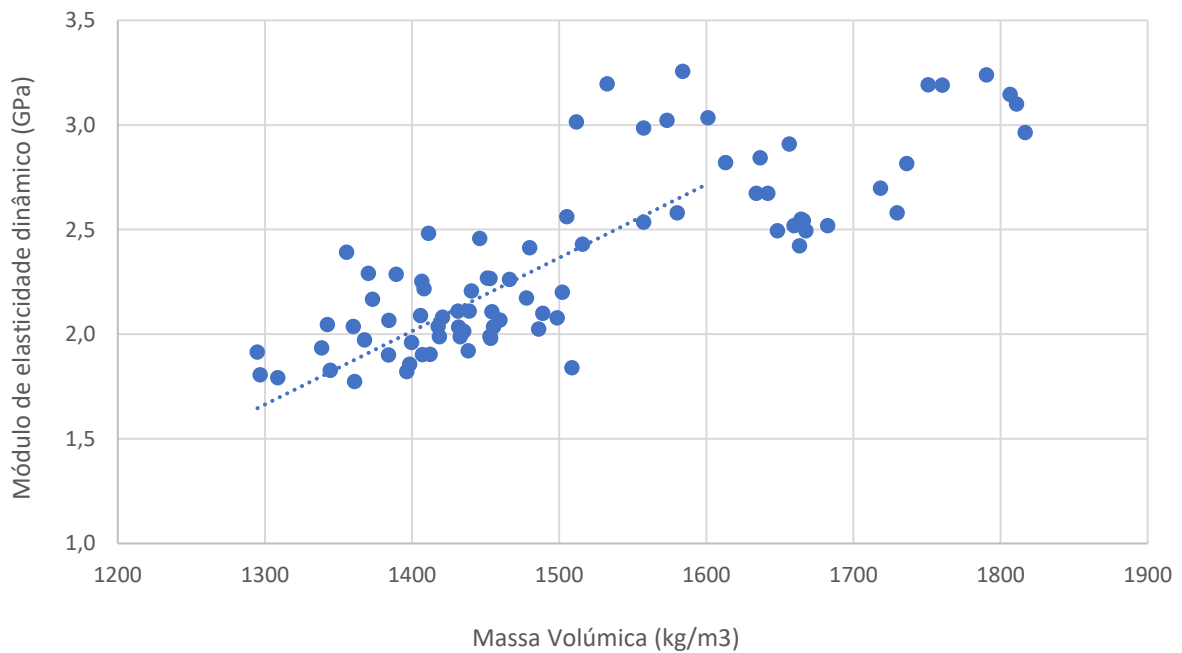


Figura 74 - Influência da massa volúmica no módulo de elasticidade dinâmico

*Teor de humidade em equilíbrio*

Na Figura 67 é apresentada a variação do teor de humidade em equilíbrio com o aumento da massa volúmica. Analisando-se os dados é possível verificar uma diminuição do valor teor de humidade em equilíbrio com o aumento da massa volúmica.

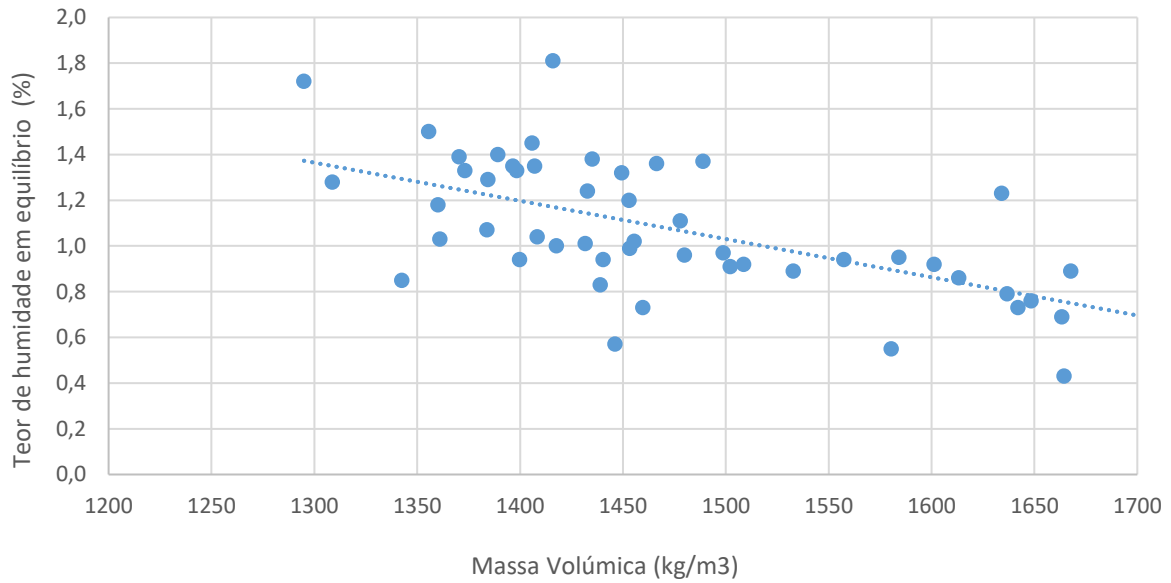


Figura 75 - Influência da massa volúmica no teor de humidade em equilíbrio

### Retração

Na Figura 76 é possível observar a variação da retração com o aumento da massa volúmica. Tal como na comparação do teor de humidade em equilíbrio, não é possível encontrar uma relação na variação da retração dos provetes com o aumento da massa volúmica.

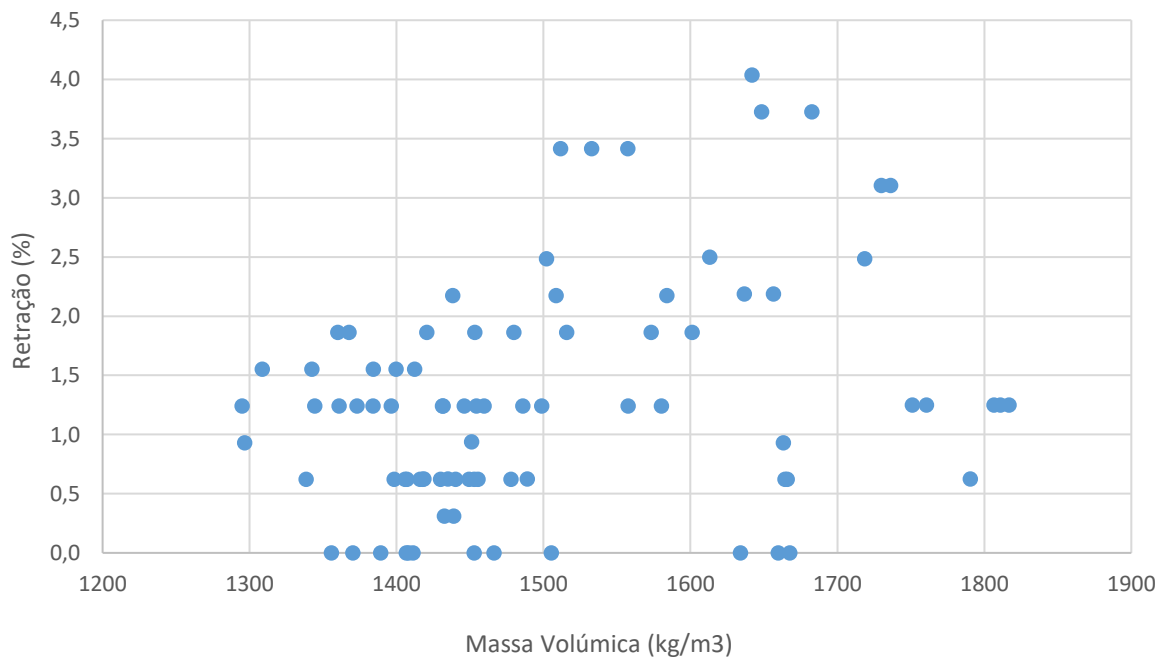


Figura 76 - Influência da massa volúmica na retração

### 4.3 Discussão geral dos resultados

Na Tabela 15, são apresentados os resultados da análise influência das variáveis de composição nas propriedades da mistura. Analisando-se a variação da quantidade de fibras nas misturas verificou-se uma forte influência nas propriedades destas. À exceção da resistência à compressão, todas as propriedades foram afetadas por esta variável. O aumento da quantidade de fibras traduziu-se no aumento do valor médio da resistência e do teor de humidade em equilíbrio e na diminuição do efeito da retração e da massa volúmica.

No que diz respeito à variação devido ao comprimento das fibras, não se verificou o mesmo comportamento observado na variação da quantidade de fibras. Apenas a resistência à flexão mostrou uma tendência clara nos resultados, sendo possível observar um aumento desta com o aumento do comprimento das fibras. Nas restantes propriedades, os resultados apresentados não foram suficientemente coesos levando a crer que o comprimento das fibras não tenha impacto nas restantes propriedades.

No caso da variação da percentagem de argila, à exceção da velocidade de propagação de ultrassons, todas as propriedades restantes apresentaram uma tendência com o aumento da percentagem de argila. Nos valores da resistência à flexão das misturas verificou-se uma ligeira alteração no seu comportamento pelo que a influência da argila nesta propriedade foi avaliada como pouco influente. Os valores da resistência à compressão e do teor de humidade em equilíbrio apenas apresentaram uma forte influência no caso das misturas sem adição de cal hidráulica, pois com a adição desta os resultados não apresentaram alteração do seu comportamento. No caso do módulo de elasticidade dinâmico, verificou-se um comportamento oposto ao da resistência à compressão e do teor de humidade, pois constatou-se uma forte influência nas misturas quando a cal é adicionada à mistura. O maior impacto da variação da percentagem de argila foi observado nos valores da massa volúmica, sendo clara a diminuição desta com o aumento da percentagem de argila, e nos valores da retração, com o aumento deste comportamento relacionado com o aumento da percentagem de argila.

Tabela 15 –Influência das variáveis de composição nas propriedades da mistura

Variáveis Propriedades	Quantidade de Fibras	Comprimento de Fibras	Porcentagem de Argila	Presença de Cal Hidráulica	Massa Volúmica
Resistência à flexão	+++	-	+	+++	+++
Resistência à compressão	-	++	++	+++	-
Massa Volúmica	+++	-	+++	++	
Velocidade de Propagação Ultrassons	+	-	-	-	+++
Módulo de elasticidade dinâmico	++	-	++	+	+++
Teor de humidade em equilíbrio	+++	-	++	+++	-
Retração	+++	-	+++	+	-

Legenda: - Não Influente; + Pouco Influente; ++ Influente; +++ Muito Influente

A adição de cal hidráulica nas misturas apresenta uma forte influência nas suas propriedades. Os valores da resistência mecânica, tal como os valores do teor de humidade em equilíbrio sofreram um grande aumento com adição da cal hidráulica. No caso da massa volúmica verifica-se uma diminuição na ordem dos 4,5% quando a cal é adicionada à composição. O módulo de elasticidade apresenta um comportamento geral nas misturas ensaiadas, contudo existem alguns casos onde apresentam um comportamento oposto do geralmente apresentado. No caso da retração e da velocidade de propagação de ultrassons, observa-se uma tendência negativa nas misturas sem fibras, contudo quando as fibras são adicionadas os comportamentos aparentam ser algo aleatórios.

Por fim, com a variação da massa volúmica verificam-se dois tipos de comportamento distintos. No caso da resistência à flexão, da velocidade de propagação de ultrassons e do módulo de elasticidade dinâmico são apresentadas tendências claras com o aumento da massa volúmica. Contudo, nas restantes propriedades não é visível qualquer tipo de relação do aumento da massa volúmica com os resultados apresentados.

## 5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Neste capítulo são apresentadas as principais conclusões da presente dissertação, relativamente aos principais resultados e comportamentos analisados, nomeadamente o comportamento mecânico das diferentes composições, e avaliação das variáveis nas misturas. Para além disto, são apresentadas as principais ideias no que diz respeito ao desenvolvimento de trabalhos futuros

### 5.1 Conclusões

O trabalho realizado focou-se no estudo de diferentes composições à base de solo argiloso e fibras que assegurem as propriedades mecânicas mínimas e baixos níveis de retração com vista ao desenvolvimento de um painel de revestimento interior. Numa fase inicial deste estudo, foi realizada uma caracterização dos materiais utilizados para no desenvolvimento das misturas. No caso do solo argiloso foi realizada uma análise dos limites de consistência e, tal como na areia utilizada, efetuado um estudo granulométrico. Observou-se que o solo argiloso utilizado apresentava uma elevada percentagem de argila, sendo necessária a sua correção. Foram utilizadas três percentagens de areia diferentes de modo a avaliar a sua influência nas misturas. Durante a caracterização das fibras de lã, foi também possível concluir que este tipo de fibras apresenta um elevado teor de humidade em equilíbrio, evidenciando as suas capacidades higroscópicas.

Depois de realizada a caracterização dos materiais, foi elaborada a matriz de misturas, onde foram planeadas 28 misturas diferentes com o objetivo, mais tarde, de avaliar o comportamento das suas variáveis.

No procedimento de mistura, foi possível comprovar que com o aumento da quantidade de fibras mais complexo seria o processo de mistura dos materiais devido ao elevado volume de fibras comparativamente aos agregados granulares. Com este aumento, verificou-se também, durante a mistura uma maior interação das fibras entre si, levando à criação de aglomerados de fibras, dificultando ainda mais este processo.

Depois dos 28 dias de cura, na câmara climática, foi possível verificar, sem auxílio de nenhum equipamento, a retração nos provetes de algumas misturas.

A realização dos ensaios aos provetes prismáticos nesta dissertação foi fundamental para a avaliação do comportamento/desempenho das diferentes misturas. Foram avaliadas laboratorialmente as propriedades mecânicas dos provetes (resistência à flexão e resistência à compressão), a velocidade de

propagação de ultrassons, o módulo de elasticidade dinâmico, a retração e por fim o teor de humidade em equilíbrio. As principais conclusões a retirar dos ensaios laboratoriais estão relacionados a adição de fibras nas misturas, verificando-se um aumento geral da resistência à flexão comparativamente às misturas sem fibras. Além disto, essa tendência manteve-se com o aumento da quantidade de fibras adicionadas às misturas. A retração foi, também, uma das propriedades mais influenciadas com a introdução das fibras, verificando-se a sua diminuição acentuada à medida que a quantidade de fibras era aumentada, concluindo um papel retardador da retração por parte das fibras.

Por fim, também observada uma tendência no comportamento da massa volúmica, verificando-se a sua diminuição com o aumento da quantidade de fibras.

No que diz respeito à variação do comprimento das fibras, verificou-se que esta não apresenta um grande impacto nas propriedades das misturas, não sendo o comportamento claro.

Com a variação da percentagem de argila nas misturas também se verificou um conjunto de comportamentos nas diferentes propriedades. Verificou-se um aumento da retração com o aumento da percentagem de argila nas misturas, associado às reações de expansibilidade e retração associados à presença de água na sua matriz. A massa volúmica sofreu uma diminuição com o aumento da percentagem de argila devido às diferentes razões solo argiloso/areia.

Por fim, a adição da cal nas misturas também influenciou as propriedades avaliadas. Registou-se um claro aumento das resistências mecânicas das misturas e também um aumento do teor de humidade em equilíbrio.

Atualmente existe apenas uma norma alemã (DIN 18948:2018-12) que visa este tipo de material, não existindo ainda uma norma ou especificação portuguesa que clarifique os requisitos mínimos para estes painéis. Com base, nos requisitos mínimos exigidos na norma DIN 18948:2018-12 e nos comportamentos avaliados no programa de ensaios apenas a mistura S40A60L10F45\_4 (40% de solo, 60% de areia, 10% de ligante e 45% de fibras de lã de ovelha com 4 cm) seria aprovada, apresentando o valor mínimo aceitável da resistência à flexão. Relativamente à massa volúmica esta mistura pertenceria à classe 1.4 ( $1210\text{kg/m}^3$ -  $1400\text{kg/m}^3$ ). Desta forma, esta seria a mistura mais indicada para avançar no processo de desenvolvimento dos painéis de revestimento.

Para uma melhor comparação e conclusão dos resultados obtidos, seria necessário o acesso a mais informação sobre as propriedades por parte dos fabricantes deste tipo de painéis. No entanto devido à incapacidade de obtenção desta informação, não foi possível comparar todas as propriedades das misturas desenvolvidas com outras soluções construtivas existentes.

## 5.2 Trabalhos futuros

Considerando que este trabalho consiste numa primeira fase do desenvolvimento dos painéis à base de solo argiloso e fibras naturais, confirma-se que ainda há uma série de tarefas a realizar no futuro. De seguida, é apresentada uma lista das possíveis tarefas a executar que se acham importantes para o desenvolvimento deste material:

- Definição e estudo de novas composições de misturas com outros tipos de fibras;
- Definição e estudo de maiores quantidades de fibras nas misturas;
- Reprodução das misturas com as fibras de lã não lavadas;
- Realização de ensaios térmicos e higrotérmicos;
- Realização de ensaios acústicos de modo a perceber o potencial da relação solo argiloso-fibras naturais na acústica dos edifícios;
- Realização de ensaios de resistência ao fogo;
- Estudo da lã de ovelha como um resíduo.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ahmad Wani, I., & ul Rehman Kumar, R. (2021). Experimental investigation on using sheep wool as fiber reinforcement in concrete giving increment in overall strength. *Materials Today: Proceedings*, 45, 4405–4409. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.11.938>
- Bergaya, F., & Lagaly, G. (2013). General Introduction. In *Developments in Clay Science* (Vol. 5, pp. 1–19).
- Bergaya, F., Lagaly, G., & Vayer, M. (2006). Chapter 12.10 Cation and Anion Exchange. In *Handbook of*
- Bernardo, A. (2022). *Linho* . <https://www.saberfazer.org/research/2017/7/6/Macerar-o-Linho>. Visitado: 31-10-2022
- Borlea (Mureșan), S. I., Tiuc, A.-E., Nemeș, O., Vermeșan, H., & Vasile, O. (2020). Innovative Use of Sheep Wool for Obtaining Materials with Improved Sound-Absorbing Properties. *Materials*, 13(3), 694. <https://doi.org/10.3390/ma13030694>
- Bruand, A., & Tessier, D. (2000). Water retention properties of the clay in soils developed on clayey sediments: significance of parent material and soil history. *European Journal of Soil Science*, 51(4), 679–688. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2389.2000.00338.x>
- Caven, B., Redl, B., & Bechtold, T. (2019). An investigation into the possible antibacterial properties of wool fibers. *Textile Research Journal*, 89(4), 510–516.
- CLAYTEC GmbH & Co. KG. (2022). *Claytec - Building with Clay* . [https://www.claytec.de/en/products/clay-drybuilding/heavy-clayboards-lemix\\_pid209](https://www.claytec.de/en/products/clay-drybuilding/heavy-clayboards-lemix_pid209). Visitado: 31-10-2022
- Cotesi. (2016). *Sisal*. <https://www.cotesi.com/index.php?id=28&fam=1&subfam=3&pid=30>. Visitado: 31-10-2022
- de Marco, N. (2021). *Canhamo: Tudo o que você quis saber e ninguém te contou*. <https://blogdescalada.com/canhamo-tudo-o-que-voce-quis-saber-e-ninguem-te-contou/>. Visitado: 31-10-2022
- de Souza, E. (2010). *Gente de fibra*. <http://revistagloborural.globo.com/revista/common/0,,EMI183007-18283,00-GENTE+DE+FIBRA.html>. Visitado: 31-10-2022
- Diaconu, L. I., Plian, D., Rujanu, M., & Groll, L. (2017). Clay – Ecological Natural Binder. *Procedia Engineering*, 181, 391–395.
- Eires, R., Cardoso, C., & Camões, A. (2014). *Argamassas de terra e cal reforçadas com fibras naturais*.

- Gelana, D., Kebede, G., & Feleke, L. (2019). Investigation on Effects of Sheep Wool fiber on Properties of C-25 Concrete. *Saudi Journal of Civil Engineering*, 03(06), 156–183. <https://doi.org/10.36348/sjce.2019.v03i06.001>
- Ghasemi, M., & Sharifi, M. (2021). Effects of layer-charge distribution on swelling behavior of mixed-layer illite-montmorillonite clays: A molecular dynamics simulation study. *Journal of Molecular Liquids*, 335, 116188. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2021.116188>
- Giada, G., Caponetto, R., & Nocera, F. (2019). Hygrothermal Properties of Raw Earth Materials: A Literature Review. *Sustainability*, 11(19), 5342. <https://doi.org/10.3390/su11195342>
- Gomes, M. I., Faria, P., & Gomes, J. (2021). Melhoria da qualidade do ar interior através da utilização de argamassas ecoeficientes. In *Discussões Efetivas sobre a Sustentabilidade* (pp. 50–65). Atena Editora.
- Gowthaman, S., Nakashima, K., & Kawasaki, S. (2018). A state-of-the-art review on soil reinforcement technology using natural plant fiber materials: Past findings, present trends and future directions. *Materials*, 11(4), 553.
- Goyal, A., Sharma, V., Upadhyay, N., Gill, S., & Sihag, M. (2014). Flax and flaxseed oil: an ancient medicine & modern functional food. *Journal of food science and technology*, 51(9), 1633-1653.
- Grim, R. E. and Kodama, . Hideomi (2022, August 17). *clay mineral*. *Encyclopedia Britannica*. <https://www.britannica.com/science/clay-mineral>
- Guggenheim, S.J., & Martin, R.T. (1995). Definition of Clay and Clay Mineral: Joint Report of the Aipea Nomenclature and CMS Nomenclature Committees. *Clays and Clay Minerals*, 43, 255-256.
- Guichon, N. (2019). *Linho* . <https://Naraguichontextil.Wordpress.Com/2019/04/10/Conheca-Mais-Sobre-as-Fibras-Naturais-Linho/>. Visitado: 31-10-2022
- Haigh, S. K., Vardanega, P. J., & Bolton, M. D. (2013). The plastic limit of clays. *Géotechnique*,
- Hearle, J. W. S. (2002). Physical properties of wool. In W. S. Simpson & G. H. Crawshaw (Eds.), *Wool: Science and Technology*.
- Hegyí, A., Bulacu, C., Szilágyi, H., Lăzărescu, A.-V., Meişă, V., Vizureanu, P., & Sandu, M. (2021). Improving Indoor Air Quality by Using Sheep Wool Thermal Insulation. *Materials*, 14(9), 2443. <https://doi.org/10.3390/ma14092443>
- IPQ. (1969). *NP-143:1969 - Limites de Consistência*.
- Kome, G. K., Enang, R. K., Tabi, F. O., & Yerima, B. P. K. (2019). Influence of Clay Minerals on Some Soil Fertility Attributes: A Review. *Open Journal of Soil Science*, 09(09), 155–188. <https://doi.org/10.4236/ojss.2019.99010>

- Kumar Thota, S., Duc Cao, T., & Vahedifard, F. (2021). Poisson's ratio characteristic curve of unsaturated soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 147(1)-
- Kumari, N., & Mohan, C. (2021). Basics of Clay Minerals and Their Characteristic Properties. In *Clay and Clay Minerals*. IntechOpen.
- Lagaly, G. (2006). Chapter 5 Colloid Clay Science. In *Handbook of Clay Science* (pp. 141–245).
- LNEC. (1966). *Solos: Análise Granulométrica. Especificação LNEC 196*, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.
- Lusa. (2022). *Empresa de casal alemão no Alentejo quer transformar lã em fertilizantes biológicos*. <https://odigital.sapo.pt/empresa-de-casal-alemao-no-alentejo-quer-transformar-la-em-fertilizantes-biologicos/>. Visitado: 31-10-2022
- Maia, C., Veiga, M. do R., & de Brito, J. (2018). *Desempenho de argamassas com incorporação de fibras naturais: contribuição para o comportamento à fissuração*.
- Marketing Agropress. (2022). *1ª Expo Internacional de Cânhamo e Cannabis chega a Portugal este fim-de-semana*. <http://www.agronegocios.eu/noticias/1-expo-internacional-de-canhamo-e-cannabis-chega-a-portugal/>. Visitado: 31-10-2022
- Marques, A. I., Morais, J., Morais, P., Veiga, M. do R., Santos, C., Candeias, P., & Ferreira, J. G. (2020). Modulus of elasticity of mortars: Static and dynamic analyses. *Construction and Building Materials*, 232, 117216. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117216>
- Merrick, N. C. (1998). *Measurement of density and medullation in wool*.
- Meshram, K., Singh, N., & Jain, P. K. (2021). Estimation of swelling characteristics of expansive soils with influence of clay mineralogy. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B – Soil & Plant Science*, 71(3), 202–207. <https://doi.org/10.1080/09064710.2021.1872696>
- Moraes, M. (2021). *Solo Argiloso: Descubra como Aumentar a Produtividade!* <https://agropos.com.br/solo-argiloso/>. Visitado: 31-10-2022
- Nadziakiewicz, Kehoe, & Micek. (2019). Physico-Chemical Properties of Clay Minerals and Their Use as a Health Promoting Feed Additive. *Animals*, 9(10), 714. <https://doi.org/10.3390/ani9100714>
- Nordin, C. (2020). *22 Uses Of Soil – Functions, Rolls, And Benefits Of Soil*. <https://www.soilground.com/what-is-soil/uses-of-soil/>. Visitado: 31-10-2022
- Pereira, E. (2021). *Humidade no interior dos edifícios: Estudo de Casos*.
- Popescu, C., & Wortmann, F.-J. (2010). Wool - Structure, Mechanical Properties and Technical Products based on Animal Fibres. In *Industrial Applications of Natural Fibres* (pp. 255–266). John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/9780470660324.ch12>

- Porto Editora. (2022). *Argila*. [https://www.infopedia.pt/\\$argila](https://www.infopedia.pt/$argila). Visitado: 31-10-2022
- Priceram. (2022). *Tijolo Térmico e Acústico*. <https://preceram.pt/termico/#tijolo-30-19-29>. Visitado: 31-10-2022
- Ramakrishnan, S., Loganayagan, S., Kowshika, G., Ramprakash, C., & Aruneshwaran, M. (2021). Adobe blocks reinforced with natural fibres: A review. *Materials Today: Proceedings*, 45, 6493-6499.
- Ramesh, M. (2018). Hemp, jute, banana, kenaf, ramie, sisal fibers. In *Handbook of Properties of Textile and Technical Fibres* (pp. 301–325). Elsevier.
- Redação Pensamento Verde. (2016). *Alunos desenvolvem tinta sustentável usando terra e cola*. <https://www.pensamentoverde.com.br/sustentabilidade/alunos-desenvolvem-tinta-sustentavel-usando-terra-e-cola/>. Visitado: 31-10-2022
- Robert, U., Etuk, S., Agbasi, O., & Umoren, G. (2020). Comparison of clay soils of different colors existing under the same conditions in a location. *Imam Journal of Applied Sciences*, 5(2), 68. [https://doi.org/10.4103/ijas.ijas\\_35\\_19](https://doi.org/10.4103/ijas.ijas_35_19)
- Santos, V., Martins, Â., Silvestre, M., Silva, S., & Azevedo, J. (2019). A história da lã: da domesticação à atualidade. *História Da Ciência e Ensino: Construindo Interfaces*, 20, 65–76.
- Shubbar, A. A., Sadique, M., Kot, P., & Atherton, W. (2019). Future of clay-based construction materials –A review. *Construction and Building Materials*, 210, 172–187.
- Singh, N. B. (2022). Clays and Clay Minerals in the Construction Industry. *Minerals*, 12(3), 301.
- Stuart, I. M., Schneider, A. M., & Turner, T. R. (1989). Perception of the Heat of Sorption of Wool. *Textile Research Journal*, 59(6), 324–329.
- Tan, X., Liu, F., Hu, L., Reed, A. H., Furukawa, Y., & Zhang, G. (2017). Evaluation of the particle sizes of four clay minerals. *Applied Clay Science*, 135, 313–324. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2016.10.012>
- Tertre, E., Hubert, F., Bruzac, S., Pacreau, M., Ferrage, E., & Prêt, D. (2013). Ion-exchange reactions on clay minerals coupled with advection/dispersion processes. Application to Na<sup>+</sup>/Ca<sup>2+</sup> exchange on vermiculite: Reactive-transport modeling, batch and stirred flow-through reactor experiments. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 112, 1–19. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2013.02.028>
- Tierrafino B.V. (2022). *Tierrafino*. <http://www.tierrafino.com/>. Visitado: 31-10-2022
- Tuzcu, T. M. (2007). *Hygro-Thermal Properties of Sheep Wool Insulation*.
- Wikipedia. (2021). *Sisal*. <https://pt.wikipedia.org/wiki/Sisal>. Visitado: 31-10-2022
- Yusuf, M., Ahmad, A., Shahid, M., Khan, M. I., Khan, S. A., Manzoor, N., & Mohammad, F. (2012). Assessment of colorimetric, antibacterial and antifungal properties of woollen yarn dyed with the extract

of the leaves of henna (*Lawsonia inermis*). *Journal of Cleaner Production*, 27, 42–50.  
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.01.005>

Zuraida, N., Sopyan, I., & Zahurin, H. (2011). Effect of fiber length variations on mechanical and physical properties of coir fiber Reinforced Cement-Albumen Composite (CFRCC). *IJUM Engineering Journal*, 12(1), 65-77.

## ANEXOS

### Anexo 1: Ficha técnica Cal Hidráulica Secil

FICHA TÉCNICA

# NATURAL LIME NHL 5

NHL 5 – CAL HIDRÁULICA NATURAL

**1. DESCRIÇÃO**

A **Secil NATURAL LIME NHL 5** é uma cal hidráulica natural, ligante hidráulico constituído por silicatos e aluminatos de cálcio e hidróxido de cálcio, obtida por cozedura de calcário margoso, seguida de moagem. A **Secil NATURAL LIME NHL 5** é classificada como NHL 5 segundo a NP EN 459-1.

A **Secil NATURAL LIME NHL 5** é um ligante singular, pois além da presa hidráulica, apresenta também presa por aérea, obtida por carbonatação com CO<sub>2</sub> atmosférico.

**2. DOMÍNIO DE UTILIZAÇÃO**

Na fabricação de argamassas, como único ligante ou em mistura com outros ligantes hidráulicos ou aéreos, conferindo-lhes trabalhabilidade e flexibilidade, reduzindo significativamente a retração das argamassas hidráulicas (p.ex. argamassas de alvenaria, argamassa de reboco e argamassa de pavimentos).

Na fabricação de argamassas de reabilitação, como único ligante, em execução de rebocos exteriores e interiores sobre suportes antigos. Em diferentes utilizações de engenharia civil, tais como, tratamento de solos.

**3. CARACTERÍSTICAS DO PRODUTO**

Características Químicas	Valor	Norma
Cal disponível Ca(OH) <sub>2</sub>	≥ 15,0 %	EN 459-1
Sulfato	≤ 2,0 %	EN 459-1
Características Físicas	Valor	Norma
Cor	Beje	-
Água livre	≤ 2,0 %	EN 459-1
Baridade	0,65 ± 0,05 kg/dm <sup>3</sup>	-
Densidade	2,7 g/cm <sup>3</sup>	-
Finura	90 µm ≤ 15,0 % 200 µm ≤ 2,0 %	EN 459-1

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

FICHA TÉCNICA

# NATURAL LIME NHL 5

NHL 5 – CAL HIDRÁULICA NATURAL

**SECIL TEK**  
DÁ FORMA ÀS IDEIAS

Expansibilidade	≤ 2,0 mm	EN 459-1
Penetração	> 10 mm e < 50 mm	EN 459-1
Teor de ar	≤ 5,0 %	EN 459-1
Tempo de presa Início Fim	> 1 h ≤ 15 h	EN 459-1
<b>Características Mecânicas</b>	<b>Valor</b>	<b>Norma</b>
Resistência à compressão (28dias)	≥ 5,0 e ≤ 15,0 MPa	EN 459-1

## 4. APLICAÇÃO

### a) Fabricação de argamassas

A dosagem de **Secil NATURAL LIME NHL 5** numa argamassa deve adequar-se ao fim a que se destina, ver exemplos no ponto 5.

Misturar previamente a **Secil NATURAL LIME NHL 5** com o agregado e posteriormente adicionar água na quantidade adequada de forma a obter uma boa trabalhabilidade.

### b) Restrições

Não aplicar argamassas a temperaturas inferiores a 5 °C e superiores a 30 °C, evitando a aplicação em situações de elevada exposição solar e/ou sob ventos fortes.

Não utilizar argamassas amolentadas ou que tenham iniciado a sua presa.

Evitar a secagem rápida das argamassas, regando o suporte, 1 a 2 horas antes da aplicação e voltando a regar logo que a argamassa se apresente suficientemente resistente. Repetir a rega 1, 2 e 7 dias depois.

### c) Tratamento de Solos

A adição de **Secil NATURAL LIME NHL 5** a solos argilosos e húmidos permite a sua estabilização, melhorando a sua resistência

A **Secil NATURAL LIME NHL 5** pode também ser adicionada em solos argilosos e húmidos com necessidade de Ca(OH)<sub>2</sub> aos que utilizam a cal hidráulica HL 5.

Para mais informação sobre os procedimentos consultar os documentos e vídeos disponíveis em [www.secilargamassa.pt](http://www.secilargamassa.pt), bem como, contactar com os nossos serviços comerciais.

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](mailto:comercial.seciltek@secil.pt)



[seciltek.com](http://seciltek.com)

FICHA TÉCNICA

# NATURAL LIME NHL 5

NHL 5 – CAL HIDRÁULICA NATURAL

**SECIL TEK**  
DÁ FORMA ÀS IDEIAS

## 5. TRAÇOS RECOMENDADOS

TRAÇOS DE ARGAMASSA RECOMENDADOS	MATÉRIAS PRIMAS (VOLUME)				ÁGUA % peso do total	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (MPa)			MÓDULO DE ELASTICIDADE (MPa) 28 dias
	NHL 5	Sílica fina (< 0,6 mm)	Sílica fina (< 1,2 mm)	Sílica de rio (< 4,0 mm)		7 dias	28 dias	90 dias	
Argamassa de alvenaria (ligante:agregado) = (1:2)	1	-	1	1	13,5	0,8	2,8	3,7	6900
Argamassa de revestimento (ligante:agregado) = (1:3)	1	-	1,5	1,5	14,2	0,4	1,0	1,7	3300
Argamassa de revestimento (ligante:agregado) = (1:4)	1	-	2	2	14,7	0,2	0,6	0,8	2170
Argamassa de pavimento (ligante:agregado) = (1:3)	1	-	-	3	12,0	0,6	2,5	3,6	4500

## 6. EMBALAGEM E VALIDADE

### Embalagem

Sacos de papel de 25 kg em paletes plastificadas; Granel para utilização em sistema de silo.

### Validade

12 meses desde que permaneçam inalteradas as condições da embalagem originais e em condições de armazenagem ao abrigo de temperaturas extremas e da humidade.

## 7. HIGIENE E SEGURANÇA

(NÃO DISPENSA A CONSULTA DA FICHA DE SEGURANÇA DO PRODUTO)

- Provoca irritação da pele;
- Provoca danos graves nos olhos;
- Pode provocar irritação respiratória;
- Manter fora do alcance das crianças;
- Usar luvas de proteção/ vestuário de proteção/ proteção ocular/ proteção facial;
- Evitar respirar poeiras/ vapores.

SECIL MARTINGANÇA, SA.

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

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




seciltek.com



FICHA TÉCNICA

# NATURAL LIME NHL 5

NHL 5 – CAL HIDRÁULICA NATURAL





**SECIL NATURAL LIME NHL 5**  
EN 459-1:2011  
Certificado: 1328-CPR-0215  
Cal Hidráulica Natural – NHL 5  
Declaração de desempenho DOP.14003

*Estando as condições de aplicação dos nossos produtos fora do nosso alcance não nos responsabilizamos pela sua incorrecta utilização. É dever do cliente verificar a idoneidade do produto para o fim previsto. Em qualquer caso a nossa responsabilidade está limitada ao valor da mercadoria por nós fornecida. A informação constante da presente ficha pode ser alterada sem aviso prévio. Em caso de dúvida, e se pretender esclarecimentos complementares solicitamos o contacto com os nossos serviços técnicos.*

Revisão de maio de 2019  
FT.14003.01

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

## 6 APÊNDICE

Resultados velocidade de propagação de ultrassons.

Mistura	S50A5 0	S40A6 0	S30A7 0	S50A50F15_ 2	S50A50F30_ 2	S50A50F45_ 2	S50A50F15_ 4
Provete A	1457	1376	1400	1445	1247	1301	1212
	1494	1361	1397	1445	1247	1307	1245
	1459	1397	1395	1456	1261	1293	1138
	1451	1357	1408	1455	1256	1284	1212
	1459	1373	1395	1463	1275	1290	1135
	1451	1347	1404	1469	1246	1288	1124
	1494	1347	1401	1447	1227	1284	1139
	1477	1331	1382	1465	1246	1281	1139
	1467	1339	1394	1422	1250	1281	1143
	1469	1332	1391	1443	1244	1270	1143
Provete B	1418	1357	1394	1473	1270	1249	1348
	1412	1352	1404	1457	1275	1238	1351
	1408	1361	1421	1453	1285	1233	1343
	1421	1358	1386	1455	1288	1222	1346
	1422	1350	1385	1463	1272	1215	1332
	1411	1336	1388	1471	1266	1244	1319
	1417	1412	1388	1464	1277	1227	1319
	1416	1382	1400	1460	1280	1223	1356
	1401	1388	1431	1463	1265	1223	1334
	1383	1375	1413	1451	1262	1215	1320
Provete C	1427	1329	1410	1504	1298	1189	1209
	1413	1334	1417	1544	1301	1197	1181
	1430	1351	1407	1518	1299	1210	1223
	1421	1351	1413	1505	1306	1199	1228
	1427	1352	1429	1509	1302	1193	1164
	1432	1361	1425	1502	1318	1210	1275
	1417	1336	1401	1504	1297	1208	1237
	1411	1342	1401	1502	1297	1232	1311
	1426	1363	1388	1514	1286	1205	1279
	1408	1315	1407	1512	1311	1192	1196
Media A	1467,8	1356	1396,7	1451	1249,9	1287,9	1163
Media B	1410,9	1367,1	1401	1461	1274	1228,9	1336,8
Media C	1421,2	1343,4	1409,8	1511,4	1301,5	1203,5	1230,3
<b>Média</b>	<b>1433</b>	<b>1356</b>	<b>1403</b>	<b>1474</b>	<b>1275</b>	<b>1240</b>	<b>1243</b>
Desvio Padrão	27,9	21,5	13,1	29,1	23,5	37,7	81,2
Valor Máx	1494	1412	1431	1544	1318	1307	1356
Valor Min.	1383	1315	1382	1422	1227	1189	1124
Coef. De Variação	2	2	1	2	2	3	7

Resultados velocidade de propagação de ultrassons (Continuação).

Mistura	S50A50F3 0_4	S50A50F4 5_4	S50A50F1 5_6	S50A50F3 0_6	S50A50F4 5_6	S40A60F1 5_4	S40A60F3 0_4
Provete A	1237	1204	1284	1260	1236	1337	1321
	1224	1229	1296	1260	1208	1342	1323
	1217	1242	1276	1247	1210	1354	1308
	1325	1242	1286	1233	1220	1343	1307
	1334	1248	1262	1247	1199	1351	1325
	1286	1254	1269	1238	1234	1352	1313
	1292	1266	1270	1247	1215	1341	1321
	1292	1244	1286	1238	1227	1345	1323
	1292	1196	1273	1235	1220	1341	1314
	1267	1292	1255	1209	1178	1364	1311
Provete B	1333	1263	1285	1297	1166	1330	1389
	1333	1292	1282	1278	1299	1352	1359
	1338	1232	1267	1281	1298	1355	1379
	1334	1224	1271	1267	1285	1332	1385
	1333	1244	1298	1252	1277	1348	1362
	1321	1242	1279	1276	1235	1346	1355
	1342	1243	1292	1257	1283	1323	1378
	1307	1241	1273	1247	1277	1343	1389
	1288	1261	1264	1272	1263	1357	1371
	1248	1236	1248	1262	1291	1364	1385
Provete C	1247	1220	1359	1258	1270	1385	1313
	1257	1268	1355	1263	1263	1376	1329
	1259	1237	1345	1247	1270	1402	1320
	1246	1256	1339	1267	1287	1364	1323
	1242	1238	1336	1262	1298	1357	1309
	1245	1261	1330	1257	1302	1371	1326
	1255	1245	1331	1262	1299	1391	1331
	1251	1253	1356	1259	1279	1372	1337
	1262	1257	1337	1242	1313	1373	1331
	1252	1252	1373	1248	1271	1351	1308
Media A	1276,6	1241,7	1275,7	1241,4	1214,7	1347	1316,6
Media B	1317,7	1247,8	1275,9	1268,9	1267,4	1345	1375,2
Media C	1251,6	1248,7	1346,1	1256,5	1285,2	1374,2	1322,7
<b>Média</b>	<b>1282</b>	<b>1246</b>	<b>1299</b>	<b>1256</b>	<b>1256</b>	<b>1355</b>	<b>1338</b>
Desvio Padrão	39,4	20,7	36,2	17,0	40,2	18,2	28,5
Valor Máx	1342	1292	1373	1297	1313	1402	1389
Valor Min.	1217	1196	1248	1209	1166	1323	1307
Coef. de Variação	3	2	3	1	3	1	2

Resultados velocidade de propagação de ultrassons (Continuação).

Mistura	S40A60F45 _4	S30A70F15 _4	S30A70F30 _4	S30A70F45 _4	S50A50L 10	S40A60L 10	S30A70L 10
Provete A	1306	1386	1277	1245	1381	1385	1330
	1315	1379	1284	1248	1337	1371	1357
	1329	1377	1292	1244	1342	1351	1337
	1308	1391	1281	1286	1364	1371	1351
	1309	1382	1298	1246	1336	1358	1383
	1308	1399	1281	1238	1334	1370	1357
	1277	1381	1289	1251	1336	1358	1382
	1309	1386	1289	1237	1341	1313	1369
	1316	1372	1277	1229	1359	1333	1405
	1314	1394	1283	1241	1318	1323	1406
Provete B	1347	1388	1277	1238	1352	1308	1416
	1321	1389	1292	1219	1366	1337	1411
	1320	1386	1283	1236	1381	1317	1405
	1315	1366	1294	1229	1365	1329	1432
	1337	1385	1290	1235	1363	1309	1411
	1323	1388	1286	1246	1372	1323	1401
	1340	1382	1291	1237	1351	1320	1401
	1294	1420	1301	1241	1381	1320	1439
	1359	1388	1301	1229	1336	1302	1407
	1383	1407	1294	1223	1340	1292	1407
Provete C	1377	1383	1337	1286	1400	1394	1395
	1379	1411	1342	1213	1371	1411	1385
	1364	1401	1330	1286	1391	1410	1393
	1385	1390	1329	1283	1375	1388	1371
	1379	1402	1350	1277	1389	1383	1382
	1376	1399	1336	1283	1381	1382	1416
	1359	1376	1352	1289	1362	1402	1376
	1366	1411	1331	1276	1401	1402	1369
	1329	1400	1343	1297	1378	1365	1379
	1315	1371	1330	1293	1364	1388	1406
Media A	1309,1	1384,7	1285,1	1246,5	1344,8	1353,3	1367,7
Media B	1333,9	1389,9	1290,9	1233,3	1360,7	1315,7	1413
Media C	1362,9	1394,4	1338	1278,3	1381,2	1392,5	1387,2
<b>Média</b>	<b>1335</b>	<b>1390</b>	<b>1305</b>	<b>1253</b>	<b>1362</b>	<b>1354</b>	<b>1389</b>
Desvio Padrão	30,3	12,7	25,2	25,3	21,6	36,1	26,3
Valor Máx	1385	1420	1352	1297	1401	1411	1439
Valor Min.	1277	1366	1277	1213	1318	1292	1330
Coef. De Variação	2	1	2	2	2	3	2

Resultados velocidade de propagação de ultrassons (conclusão).

Mistura	S50A50L10F15_4	S50A50L10F30_4	S50A50L10F45_4	S40A60L10F15_4	S40A60L10F45_4	S30A70L10F15_4	S30A70L10F45_4
Provete A	1250	1253	1224	1260	1369	1304	1308
	1244	1218	1209	1248	1355	1286	1292
	1263	1258	1236	1263	1359	1298	1320
	1299	1233	1231	1246	1355	1299	1303
	1302	1225	1230	1268	1336	1311	1310
	1317	1241	1217	1259	1348	1305	1337
	1304	1205	1209	1258	1346	1299	1307
	1304	1222	1210	1275	1358	1291	1309
	1292	1231	1243	1247	1352	1311	1342
	1328	1251	1247	1224	1347	1331	1330
Provete B	1211	1224	1233	1233	1333	1288	1299
	1228	1219	1238	1246	1329	1233	1305
	1248	1226	1237	1215	1358	1308	1304
	1232	1235	1228	1233	1359	1329	1288
	1204	1210	1227	1240	1417	1299	1286
	1219	1241	1234	1227	1406	1358	1272
	1224	1237	1247	1196	1422	1309	1252
	1228	1196	1213	1241	1457	1301	1264
	1188	1236	1296	1235	1460	1326	1268
	1199	1213	1286	1241	1439	1297	1267
Provete C	1323	1203	1288	1223	1445	1311	1261
	1319	1218	1303	1223	1406	1302	1261
	1352	1201	1292	1235	1397	1287	1232
	1309	1208	1279	1237	1426	1271	1223
	1332	1194	1277	1243	1389	1286	1248
	1315	1215	1269	1245	1382	1268	1242
	1350	1204	1283	1231	1389	1279	1262
	1340	1196	1296	1240	1390	1265	1267
	1320	1195	1272	1237	1395	1282	1260
	1282	1206	1261	1239	1381	1283	1243
Media A	1290,	1233,7	1225,6	1254,8	1352,5	1303,5	1315,8
Media B	1218,	1223,7	1243,9	1230,7	1398	1304,8	1280,5
Media C	1324,	1204	1282	1235,3	1400	1283,4	1249,9
<b>Média</b>	<b>1278</b>	<b>1220</b>	<b>1251</b>	<b>1240</b>	<b>1384</b>	<b>1297</b>	<b>1282</b>
Desvio Padrão	50,1	18,2	30,0	16,2	37,6	23,2	31,7
Valor Máx	1352	1258	1303	1275	1460	1358	1342
Valor Min.	1188	1194	1209	1196	1329	1233	1223
Coef. De Variação	4	1	2	1	3	2	2

## Medições dos comprimentos dos provetes

Mistura	Provete	Comprimento Provete (mm)	Mistura	Provete	Comprimento Provete (mm)
S50A50	A	155	S30A70F15_4	A	160
	B	155		B	160
	C	154,5		C	159,5
S40A60	A	157	S30A70F30_4	A	160
	B	156		B	159
	C	156		C	160
S30A70	A	158	S30A70F45_4	A	160
	B	158		B	160
	C	158		C	160
S50A50F15_2	A	158	S50A50L10	A	155,5
	B	158		B	155,5
	C	157,5		C	155,5
S50A50F30_2	A	158,5	S40A60L10	A	156,5
	B	158		B	156,5
	C	158,5		C	156
S50A50F45_2	A	158,5	S30A70L10	A	158
	B	159		B	158
	C	159		C	159
S50A50F15_4	A	157,5	S50A50L10F15_4	A	158
	B	158		B	157,5
	C	158		C	159
S50A50F30_4	A	159,5	S50A50L10F30_4	A	158,5
	B	158,5		B	158,5
	C	159		C	159
S50A50F45_4	A	159,5	S50A50L10F45_4	A	160
	B	159		B	159,5
	C	159		C	159
S50A50F15_6	A	157	S40A60L10F15_4	A	159
	B	158		B	159
	C	158		C	159
S50A50F30_6	A	159	S40A60L10F45_4	A	160
	B	159		B	160
	C	159		C	160
S50A50F45_6	A	160	S30A70L10F15_4	A	160
	B	160		B	160
	C	160		C	160
S40A60F15_4	A	159	S30A70L10F45_4	A	160
	B	159		B	160
	C	159		C	160
S40A60F30_4	A	160			
	B	160			
	C	160			
S40A60F45_4	A	160			
	B	160			
	C	160			

## Massa volúmicas dos Provetes

Mistura	Massa Volumica (kg/m <sup>3</sup> )		
	Provete A	Provete B	Provete C
S50A50	1648	1683	1642
S40A60	1719	1730	1736
S30A70	1817	1807	1811
S50A50F15_2	1601	1573	1584
S50A50F30_2	1400	1368	1343
S50A50F45_2	1384	1345	1361
S50A50F15_4	1509	1516	1453
S50A50F30_4	1439	1451	1489
S50A50F45_4	1433	1419	1435
S50A50F15_6	1502	1421	1480
S50A50F30_6	1499	1454	1432
S50A50F45_6	1398	1339	1406
S40A60F15_4	1580	1558	1446
S40A60F30_4	1453	1505	1408
S40A60F45_4	1466	1407	1370
S30A70F15_4	1664	1666	1663
S30A70F30_4	1440	1431	1418
S30A70F45_4	1456	1453	1478
S50A50L10	1533	1512	1557
S40A60L10	1637	1656	1613
S30A70L10	1761	1751	1790
S50A50L10F15_4	1360	1438	1373
S50A50L10F30_4	1309	1412	1396
S50A50L10F45_4	1407	1297	1295
S40A60L10F15_4	1460	1486	1384
S40A60L10F45_4	1389	1411	1356
S30A70L10F15_4	1668	1660	1634
S30A70L10F45_4	1416	1430	1449

## Valores do teor de humidade em equilíbrio

Mistura	Amostra	Peso Cápsula (g)	Peso Cápsula + Amostra Antes (g)	Peso Cápsula + Amostra Depois	Massa de água (g)	Teor de Humidade em
S50A50	A	10.68	47.85	47.57	0.28	0.76
	B	10.70	54.47	54.15	0.32	0.73
S40A60	A	10.81	50.56	50.28	0.28	0.70
	B	11.63	51.10	50.84	0.26	0.66
S30A70	A	10.85	52.57	52.33	0.25	0.60
	B	10.41	51.17	51.00	0.16	0.40
S50A50F15_2	A	8.85	51.00	50.62	0.38	0.92
	B	10.08	50.66	50.28	0.38	0.95
S50A50F30_2	A	7.65	46.15	45.80	0.36	0.94
	B	10.91	54.46	54.09	0.37	0.85
S50A50F45_2	A	10.47	49.59	49.09	0.50	1.29
	B	10.67	55.72	55.25	0.46	1.03
S50A50F15_4	A	10.57	58.20	57.76	0.43	0.92
	B	11.87	55.22	54.80	0.42	0.99
S50A50F30_4	A	9.74	51.31	50.97	0.34	0.83
	B	9.63	51.46	50.89	0.57	1.37
S50A50F45_4	A	10.77	56.50	55.94	0.56	1.24
	B	10.88	52.82	52.25	0.57	1.38
S50A50F15_6	A	10.82	56.44	56.03	0.41	0.91
	B	10.68	51.67	51.28	0.39	0.96
S50A50F30_6	A	10.83	54.69	54.27	0.42	0.97
	B	11.06	52.14	51.73	0.41	1.01
S50A50F45_6	A	7.65	44.62	44.14	0.49	1.33
	B	10.91	50.70	50.13	0.57	1.45
S40A60F15_4	A	10.47	55.63	55.38	0.25	0.55
	B	10.67	54.77	54.52	0.25	0.57
S40A60F30_4	A	10.57	52.91	52.41	0.50	1.20
	B	11.87	54.08	53.65	0.43	1.04
S40A60F45_4	A	9.74	54.54	53.94	0.60	1.36
	B	9.63	50.37	49.81	0.56	1.39
S30A70F15_4	A	10.77	55.52	55.33	0.19	0.43
	B	10.88	53.83	53.54	0.29	0.69
S30A70F30_4	A	10.82	49.17	48.81	0.36	0.94
	B	10.68	53.89	53.46	0.43	1.00
S30A70F45_4	A	10.83	50.10	49.71	0.40	1.02
	B	11.06	50.18	49.75	0.43	1.11
S50A50L10	A	7.56	47.93	47.58	0.36	0.89
	B	11.83	52.61	52.23	0.38	0.94
S40A60L10	A	10.88	50.35	50.04	0.31	0.79
	B	11.14	50.11	49.77	0.33	0.86
S30A70L10	A	7.65	45.97	45.72	0.25	0.66
	B	10.91	49.63	49.38	0.25	0.65
S50A50L10F15_4	A	10.47	52.71	52.22	0.49	1.18
	B	10.67	56.00	55.40	0.59	1.33
S50A50L10F30_4	A	10.57	51.53	51.01	0.52	1.28
	B	11.87	51.99	51.45	0.53	1.35
S50A50L10F45_4	A	9.74	54.40	53.81	0.60	1.35
	B	9.63	48.37	47.72	0.66	1.72
S40A60L10F15_4	A	10.77	50.99	50.70	0.29	0.73
	B	10.88	49.30	48.89	0.41	1.07
S40A60L10F45_4	A	10.82	53.36	52.77	0.59	1.40
	B	10.68	52.95	52.32	0.63	1.50
S30A70L10F15_4	A	10.83	50.91	50.56	0.35	0.89
	B	11.06	51.38	50.89	0.49	1.23
S30A70L10F45_4	A	11.83	48.35	47.70	0.65	1.81
	B	11.14	57.34	56.74	0.60	1.32



Valores dos Ensaio de Resistência à Flexão, Resistência à compressão e retração

Mistura	Flexão	Compressão		Retração (%)
	Tensão(N/mm <sup>2</sup> )	Tensão(N/mm <sup>2</sup> )		
S50A50	0,21	0,78	0,74	3,73
		0,69		
	0,26	0,67	0,70	3,73
		0,72		
		0,68	0,71	4,04
		0,74		
S40A60	0,19	0,57	0,56	2,48
		0,54		
	0,26	0,59	0,59	3,11
		0,58		
	0,21	0,45	0,49	3,11
		0,54		
S30A70	0,21	0,41	0,41	1,25
	0,19	0,43	0,46	1,25
		0,48		
		0,43	0,43	1,25
S50A50F15_2	0,56	0,93	0,91	1,86
		0,90		
	0,46	0,94	0,85	1,86
		0,76		
	0,43	0,94	0,96	2,17
		0,97		
S50A50F30_2	0,46	0,41	0,58	1,55
		0,74		
	0,46	0,65	0,60	1,86
		0,55		
	0,50	0,53	0,55	1,55
		0,57		
S50A50F45_2	0,49	0,68	0,63	1,55
		0,59		
	0,74	0,74	0,67	1,24
		0,59		
	0,59	0,60	0,68	1,24
		0,76		
S50A50F15_4	0,55	0,56	0,56	2,17
	0,39	0,57	0,58	1,86
		0,58		
	0,42	0,54	0,55	1,86
		0,56		

Valores dos Ensaios de Resistência à Flexão, Resistência à compressão e retração (continuação)

Mistura	Flexão	Compressão		Retração (%)
	Tensão(N/mm <sup>2</sup> )	Tensão(N/mm <sup>2</sup> )		
S50A50F30_4	0,67	0,56	0,61	0,31
		0,67		
	0,46	0,52	0,52	0,94
		0,52		
0,35	0,70	0,64	0,62	
	0,59			
S50A50F45_4	0,55	0,73	0,72	0,31
		0,71		
	0,57	0,58	0,68	0,62
		0,77		
0,38	0,67	0,66	0,62	
	0,65			
S50A50F15_6	0,39	0,54	0,50	2,48
		0,47		
	0,28	0,75	0,61	1,86
		0,48		
0,45	0,56	0,48	1,86	
	0,40			
S50A50F30_6	0,58	0,58	0,67	1,24
		0,76		
	0,44	0,51	0,49	1,24
		0,46		
0,69	0,57	0,67	1,24	
	0,76			
S50A50F45_6	0,71	0,53	0,53	0,62
		0,52		
	0,59	0,53	0,60	0,62
		0,67		
0,55	0,54	0,54	0,62	
S40A60F15_4	0,48	0,41	0,44	1,24
		0,46		
	0,41	0,51	0,47	1,24
		0,43		
0,37	0,35	0,49	1,24	
	0,63			
S40A60F30_4	0,55	0,54	0,51	0,00
		0,48		
	0,46	0,66	0,60	0,00
		0,54		
0,51	0,38	0,44	0,00	
	0,49			

Valores dos Ensaio de Resistência à Flexão, Resistência à compressão e retração (continuação)

Mistura	Flexão	Compressão		Retração (%)
	Tensão(N/mm <sup>2</sup> )	Tensão(N/mm <sup>2</sup> )		
S40A60F45_4	0,66	0,49	0,50	0,00
		0,51		
	0,56	0,52	0,61	0,00
		0,71		
	0,67	0,53	0,50	0,00
		0,46		
S30A70F15_4	0,36	0,47	0,49	0,62
		0,50		
	0,32	0,51	0,53	0,62
		0,55		
	0,44	0,45	0,51	0,93
		0,56		
S30A70F30_4	0,57	0,46	0,50	0,62
		0,55		
	0,48	0,56	0,54	1,24
		0,52		
	0,49	0,48	0,49	0,62
		0,50		
S30A70F45_4	0,53	0,56	0,52	0,62
		0,49		
	0,40	0,47	0,53	0,62
		0,58		
	0,44	0,53	0,51	0,62
		0,50		
S50A50L10	0,32	0,73	0,73	3,42
		0,73		
	0,31	0,64	0,73	3,42
		0,82		
	0,34	0,75	0,82	3,42
		0,88		
S40A60L10	0,30	0,70	0,74	2,19
		0,79		
	0,34	0,71	0,73	2,19
		0,76		
	0,34	0,69	0,70	2,50
		0,72		
S30A70L10	0,36	0,68	0,67	1,25
		0,66		
	0,35	0,77	0,74	1,25
		0,71		
	0,31	0,69	0,72	0,62
		0,76		

Valores dos Ensaio de Resistência à Flexão, Resistência à compressão e retração (conclusão)

Mistura	Flexão	Compressão		Retração (%)
	Tensão(N/mm <sup>2</sup> )	Tensão(N/mm <sup>2</sup> )		
S50A50L10F15_4	0,50	0,75	0,66	1,86
		0,57		
	0,53	0,66	0,60	2,17
		0,54		
	0,51	0,81	0,76	1,24
		0,71		
S50A50L10F30_4	0,49	0,59	0,56	1,55
		0,53		
	0,47	0,63	0,70	1,55
		0,78		
	0,57	0,78	0,81	1,24
		0,84		
S50A50L10F45_4	0,67	0,78	0,74	0,62
		0,70		
	0,79	0,89	0,89	0,93
		0,88		
	0,62	0,83	0,87	1,24
		0,90		
S40A60L10F15_4	0,57	0,47	0,52	1,24
		0,57		
	0,42	0,59	0,59	1,24
	0,46	0,53	0,56	1,24
		0,59		
S40A60L10F45_4	0,81	0,83	0,92	0,00
		1,00		
	0,78	0,86	0,84	0,00
		0,81		
		0,97	1,12	0,00
		1,27		
S30A70L10F15_4	0,40	0,68	0,68	0,00
	0,36	0,58	0,59	0,00
		0,61		
	0,38	0,54	0,99	0,00
		1,44		
S30A70L10F45_4	0,58	0,75	0,86	0,62
		0,96		
	0,54	0,75	0,78	0,62
		0,82		
	0,63	0,83	0,78	0,62
		0,73		