



Universidade de Aveiro

Departamento de Geociências – DGEO

2018

**Deborah Horta
Arduin**

**Desenvolvimento de formulações de adobe
ativadas alcalinamente**



Universidade de Aveiro

Departamento de Geociências – DGEO

2018

**Deborah Horta
Arduin**

**Desenvolvimento de formulações de adobe
ativadas alcalinamente**

Tese apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Geológica, realizada sob a orientação científica do Doutor Fernando Rocha, Professor Catedrático do Departamento de Geociências da Universidade de Aveiro.

dedicatória

Em um momento adverso da política brasileira, meu ato de resistência é fazer ciência.

Este trabalho é dedicado às mães investigadoras, em especial às mulheres geólogas e geógrafas que fizeram parte da minha jornada acadêmica até o momento.

o júri

presidente

Prof. Doutor Jorge Manuel Pessoa Girão Medina

professor associado do Departamento de Geociências da Universidade de Aveiro

arguente

Prof. Dra. Ana Luísa Pinheiro Lomelino Velosa

professora associada do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro

orientador

Prof. Doutor Fernando Joaquim Tavares Rocha

professor catedrático do Departamento de Geociências da Universidade de Aveiro

Agradecimentos

Agradeço àqueles que viabilizaram este trabalho. A AUIP (Asociación Universitaria Iberoamericana de Postgrado) por financiar parte do mestrado com a bolsa de estudos. Ao SASUA por toda a ajuda para que eu pudesse conciliar ser trabalhadora, mãe e mestranda. Ao Prof. Dr. Jorge Medina pelo acolhimento no Departamento de Geociências, ao Prof. Dr. Fernando Rocha e à Mestre Cristiana Costa pelos ensinamentos e pela orientação. Meus sinceros agradecimentos à Eng. Cristina Sequeira, a Eng. Denise Lara Terroso do Departamento de Geociências e a Eng. Maria Carlos Figueiredo do Departamento de Engenharia Civil por viabilizarem as análises laboratoriais aqui apresentadas e por todo o apoio prestado. À Ângela Cerqueira pela ajuda, ensinamentos e companheirismo no laboratório.

Aos meus colegas do mestrado pelo companheirismo e compreensão.

Agradeço a minha família pelo apoio e incentivo, principalmente ao meu companheiro e à minha filha.

palavras-chave

Adobes, ativação alcalina, geopolímeros, construção sustentável, construção em terra, minerais argilosos.

resumo

A crescente demanda por geomateriais sustentáveis aplicados à construção suscitou nos últimos anos pesquisas em busca de materiais alternativos ao betão. Concomitantemente, houve um resgate da arquitetura em terra, dentre as quais se destaca o adobe. Os adobes são blocos de terra crua feitos a partir do solo disponível no sítio da construção, podendo ser estabilizado caso seja necessário melhorar suas características como material de construção. Tradicionalmente, os adobes eram estabilizados com a adição de elementos naturais, tais como palha ou esterco. Todavia, pode-se ainda alcançar a estabilização deste solo por via química. A ativação alcalina é um método químico que vem sendo estudado para melhorar cimentos e argamassas, utilizando fontes de sílica naturais ou recicláveis, normalmente em pH básico. O presente trabalho pretende avaliar a estabilização de diferentes formulações de adobe ativadas alcalinamente com NaOH e KOH. As ativações alcalinas foram realizadas a temperatura ambiente e avaliadas ao longo do tempo de cura (28, 60 e 90 dias) quanto à resistência mecânica e ao comportamento frente à absorção de água por capilaridade. As formulações foram confeccionadas com materiais característicos das construções tradicionais em adobe de Aveiro, buscando assim maior compatibilidade para um futuro uso da reabilitação de edifícios históricos. De forma geral, observou-se um aumento na resistência mecânica e um melhor comportamento ao interagirem com água por capilaridade, em comparação com os adobes. O êxito das formulações dependeu da interação das matérias primas com o tipo de ativador alcalino. Acredita-se que as formulações 1.1 e 3.2 aqui apresentadas podem servir de ponto de partida para outros ensaios pertinentes para testar as potencialidades destes materiais. Assim, futuramente estes podem ter aplicabilidade na reabilitação de edifícios antigos de adobe e ou na construção sustentável em adobe.

keywords

Adobes, alkaline activation, geopolymers, sustainable construction, earth construction, clay minerals .

abstract

The increasing demand for sustainable geomaterials applied to construction has raised researches for alternative materials to the concrete. Moreover, there has been a revival of the use of earth and associated building techniques among which the adobe stands out. Adobes are bricks made from the soil available at the site of construction that can be stabilized to improve its characteristics. Traditionally, adobes were stabilized with natural reinforcing materials, such as straw or manure. However, stabilization can also be achieved by chemical means. Alkaline activation is a chemical method that has been studied to improve cements and mortars using natural or recyclable silica sources, usually at basic pH. The present work evaluates the stabilization of different formulations of alkaline activated adobe with NaOH and KOH. Alkaline activations were performed at room temperature and evaluated during the curing time (28, 60 and 90 days) for mechanical resistance and water absorption by capillarity. The formulations were made with materials used in traditional adobe constructions of Aveiro, thus seeking greater compatibility for a future use for historic buildings rehabilitation. In general, an increase in mechanical strength and a better behavior when interacting with water by capillarity was observed in comparison with regular adobes. The success of the formulations depended on the interaction of raw materials with the type of alkaline activator. The formulations 1.1 and 3.2 assessed in this work can be a starting point for future works in order to enable a future use in the rehabilitation of old adobe buildings and in sustainable adobe construction. Nonetheless, further tests should be performed to assure the potential of these materials.

Índice

1. Introdução.....	1
2. Objetivos.....	3
3. Enquadramento teórico.....	4
3.1. Adobe	4
3.1.1. Definições.....	4
3.1.2. Origens do adobe	4
3.1.3. O adobe em Portugal.....	6
3.1.4. Manufatura do adobe.....	9
3.1.5. Características da terra empregada na confeção do adobe.....	11
3.1.6. Vantagens e desvantagens das construções em adobe	13
3.1.7. Estabilização	14
3.2. Geopolímeros e ativação alcalina.....	15
3.3. Adobe e Arquitetura vernacular	17
4. Materiais e Métodos	19
4.1. Materiais	20
4.1.1. Lama da Lagoa da Pateira de Fermentelos	20
4.1.1.1. Enquadramento Geográfico e Geomorfológico	20
4.1.1.2. Enquadramento Geológico.....	23
4.1.2. Areias da Quinta do Areal, Esgueira	24
4.1.3. Caulinos de Ovar	25
4.1.4. Metacaulino	27
4.1.5. Solução Alcalina	28
4.2. Metodologia	29
4.2.1. Formulação dos Adobes.....	29
4.2.2. Manufatura dos provetes de adobe	31
4.3. Ensaios de Caracterização.....	32
4.3.1. Caracterização Textural	33

4.3.2. Caracterização Mineralógica e Química Difração de Raio X (DRX) e Fluorescência de Raio X (FRX)	33
4.3.2.1. DRX Agregados não orientados.....	33
4.3.2.2. DRX Agregados orientados.....	33
4.3.2.3. FRX	34
4.3.3. Quantificação da Matéria Orgânica.....	34
4.3.4. Caracterização Mecânica.....	36
4.3.5. Caracterização Microestrutural	36
4.3.6. Absorção de água por capilaridade.....	38
5. Resultados.....	41
5.1. Caracterização da Matéria-Prima.....	41
5.1.1. Difração de Raio-X Análise Mineralógica	41
5.1.1.1. Agregados não orientados	41
5.1.1.2. Agregados orientados	43
5.1.2. Fluorescência de Raio-X Análise Química	44
5.1.3. Quantificação da matéria orgânica da Lama da Pateira	45
5.1.4. Granulometria da Areia da Quinta do Areal e da Lama da Pateira.....	46
5.2. Caracterização das Formulações.....	48
5.2.1. Absorção de água por capilaridade.....	48
5.2.1.1. Coeficiente de ganho de massa (CG)	49
5.2.1.2. Valores Assintóticos (VA).....	51
5.2.1.3. Valor Absorvido (VAbs).....	55
5.2.2. Resistência Mecânica	57
6. Discussão.....	61
6.1. Ensaio de Absorção por capilaridade.....	61
6.2. Ensaio de Resistência Mecânica	62
6.3. Limitações na metodologia e possíveis fontes de erros experimentais	63
6.3.1. Ensaio de Absorção de água por capilaridade	63

6.3.2. Ensaio de Resistência Mecânica	64
7. Resultados e Discussão das Formulações Seleccionadas	65
7.1. Características físicas das formulações	65
7.2. Análise mineralógica e química das formulações.....	66
7.3. SEM e EDS das formulações.....	70
8. Considerações Finais	73
8.1. Alterações mineralógicas e microestruturais promovidas pela ativação alcalina ..	73
8.2. Fatores que influenciam na ativação alcalina.....	73
8.2.1. Matéria-Prima	74
8.2.2. Formulações	75
Referências Bibliográficas	82

Índice de Figuras

Figura 1: Ocorrência do Adobe em Portugal, 2013 (extraído de (M. Fernandes & Tavares, 2016)).	7
Figura 2: Moldes de adobes da Quinta do Areal, Esgueira.	7
Figura 3: Moldes de adobes artesanais e em escala industrial (extraído de Rotondaro, 2011).	9
Figura 4: Esquema de perfil de solo (extraído de Neves & Faria, 2011).	12
Figura 5: Mapa de localização da matéria prima utilizada na confecção dos adobes.	19
Figura 6: Fluxograma resumo da metodologia. LP corresponde a Lama da Pateira de Fermentelos, MK o metacaulino, K o caulino e AA à areia da Quinta do Areal.	20
Figura 7: Bacias Hidrográficas do rio Cértima e do rio Águeda (extraído de Sena, 2007).	21
Figura 8: Modelo Digital de Terreno da Lagoa da Pateira e geologia envolvente, digitalizada a partir de Barbosa, 1981; Teixeira & Zbyszewski, 1976 e Barra, 1998, extraído de Sena (2007).	22
Figura 9: Aspecto filoniano do depósito de S. Vicente de Pereira Jusã (extraído de Coelho, 2006).	27
Figura 10: Pesagem do material seco para as formulações.	29
Figura 11: Formulação 1.1 na proporção 6:1.	30
Figura 12: Preparação da bancada para a confecção das formulações de adobe em laboratório.	32
Figura 13: Moldagem dos adobes e remoção da forma.	32
Figura 14: Ensaio de determinação de matéria orgânica com peróxido de hidrogénio.	36
Figura 15: Ensaio de absorção de água por capilaridade.	40
Figura 16 Difrátogramas da Areia do Areal (AA) total (a) e fração inferior a 63 micra (b).	42
Figura 17: Difrátograma do metacaulino (MK).	42
Figura 18: Difrátograma do caulino (K).	42
Figura 19: Difrátograma da Lama da Pateira (LP).	43
Figura 20: DRX dos agregados orientados do metacaulino (MK).	43

Figura 21: DRX dos agregados orientados do caulino (K).	44
Figura 22: DRX dos agregados orientados da Lama da Pateira.	44
Figura 23: Curva granulométrica da Areia do Areal (AA).	46
Figura 24: Frequência granulométrica da Areia do Areal (AA).	47
Figura 25: Curva granulométrica da Lama da Pateira de Fermentelos (LP), fração superior a 63 micra.	47
Figura 26: Frequência granulométrica Lama da Pateira (LP), onde a é a frequência da amostra total e b da fração superior à 63 micrómetros.	47
Figura 27: Coeficiente de ganho de massa para cada formulação em função do tempo.	51
Figura 28: Coeficiente de ganho de massa (g/min) para todas as formulações aos 28, 60 e 90 dias de cura	51
Figura 29: Valor assintóticos para as formulações, com adobes, NaOH e KOH, para os 28, 60 e 90 dias de cura.	52
Figura 30: Boxplot dos Valores Assintóticos com o tempo de cura para as formulações.	54
Figura 31: Variação dos Valores Assintóticos para as formulações aos 90 dias de cura.	55
Figura 32: Valor absorvido em percentagem de ganho de massa aos 90 dias de cura.	56
Figura 33: Boxplot dos resultados de Resistência Mecânica.....	58
Figura 34: Resistência Mecânica das formulações ao longo do tempo de cura.	58
Figura 35: Resistência Mecânica das formulações com água ao longo do tempo de cura.	59
Figura 36: Resistência Mecânica das formulações ativadas com NaOH ao longo do tempo de cura.....	59
Figura 37: Resistência Mecânica das formulações ativadas com KOH ao longo do tempo de cura.....	60
Figura 38: Resistência Mecânica das formulações 1.1 e 3.2 aos 28, 60, 90 e 180 dias.	64
Figura 39: Formulação 1.1 com H ₂ O, KOH e NaOH.	65

Figura 40: Formulação 3.2 com H ₂ O, KOH e NaOH	65
Figura 41: Difratoograma da amostra 1.1	67
Figura 42: Difratoogramas da formulação 3.2 aos 28 dias.	67
Figura 43: Composição química das formulações 1.1 e 3.2 aos 28, 60 e 90 dias de cura.	69
Figura 44: DRX do sal formado na ativação por NaOH na formulação 4.2.....	70
Figura 45: Imagens do SEM com EDS da formulação 1.1. com água, KOH e NaOH..	71
Figura 46: Imagens do SEM com EDS da formulação 3.2: a. com água, b. ativada com KOH; c. ativada com NaOH.	72
Figura 47: a. Comparação entre Resistência mecânica e a proporção de matéria-prima por formulação; b. Comparação entre Resistência mecânica e proporção (SiO ₂ /Al ₂ O ₃) reativa estimada.	75
Figura 48: Correlação entre a proporção de metacaulino, caulino e lama da pateira nas formulações com a resistência mecânica aos 90 dias de cura, para NaOH e KOH. ...	77
Figura 49: Correlação entre percentagem de SiO ₂ e de K ₂ O disponível em cada formulação com a resistência mecânica aos 90 dias de cura, para os ativadores NaOH e KOH.....	77
Figura 50: LOI e Resistência mecânica.....	79
Figura 51: Formulações e resultados de resistência mecânica e ensaio de absorção de água por capilaridade aos 90 dias de cura.....	80

Índice de Tabelas

Tabela 1: Análise Química da matéria prima das formulações para os elementos maiores.....	45
Tabela 2: Quantificação da matéria orgânica por perda ao rubro e por peróxido de hidrogénio.....	46
Tabela 3: Índices gráficos das curvas granulométricas da AA e da LP.	48
Tabela 4: Coeficientes de ganho de massa (g/min), com destaque para os coeficientes negativos, aos 28, 60 e 90 dias de cura.....	49
Tabela 5: Valores Assintóticos obtidos no ensaio de absorção de água por capilaridade aos 28, 60 e 90 dias, com destaque para os valores negativos.	52
Tabela 6: Valor absorvido em percentagem relativa ao peso inicial dos blocos	56
Tabela 7: Proporção $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ das matérias primas e das formulações.	74

Índice de Quadros

Quadro 1: Síntese da composição granulométrica recomendada para os adobes (mofidicada de Rotondaro, 2011).....	13
Quadro 2: Proporção fibra: terra para adobes (modificado de Rotondaro, 2011).	15
Quadro 3: Resumo das formulações dos adobes com as quantidades de material e reagentes utilizados.....	31

1. Introdução

Atualmente, existe uma preocupação crescente com o consumo e produção de materiais devido aos efeitos no meio ambiente e na economia. A construção civil é uma das indústrias com maior responsabilidade por emissões significativas de CO₂, entre outros poluentes, devido ao processo de produção dos materiais de construção, nomeadamente, do cimento (C. Costa, Cerqueira, Rocha, & Velosa, 2018). Com o aumento da conscientização ambiental, as construções em terra crua têm vindo a ser reconsideradas e utilizadas em construções modernas. De acordo com Dobson (2015), as casas em terra crua são sustentáveis, “saudáveis”, com baixa emissão de dióxido de carbono e de estética que pode ser rústica ou moderna. Estes fatores levam a um processo de industrialização e modernização dos processos construtivos em terra crua.

Define-se como construção em terra crua construções executadas com solo cru, a terra, como material de construção. De acordo com a classificação do CRATerre de 1986, a construção em terra crua pode ser classificada em: alvenarias de blocos de terra; paredes monolíticas de terra e estruturas preenchidas com terra (estruturadas) (Houben e Guillaud, 2006). Os adobes enquadram-se nas alvenarias, sendo caracterizados genericamente como blocos de terra feitos em moldes e secos ao sol.

Neste contexto, o adobe seja como técnica construtiva ou como material de construção, apresenta-se como uma alternativa viável de construção sustentável.

A arquitetura vernacular fundamenta-se em elementos e materiais de construções locais que refletem as tradições locais, materializando as condições climáticas, geológicas, económicas e culturais dos locais em que se encontram, refletindo-as nas suas construções (J. Fernandes, Mateus, & Bragança, 2016).

O carácter vernáculo do adobe dá-se pelo facto de a princípio este ser executado a partir do solo disponível no local, o que pode acarretar na necessidade de estabilizações que permitam maior resistência mecânica e à meteorização (Elert, Pardo, & Rodriguez-Navarro, 2015; C. Neves & Faria, 2011). A estabilização dos solos foi definida por Houben & Guillaud, (1994) como alterações nas propriedades sistema solo-água-ar, cujo objetivo de aprimorar as características físicas e mecânicas das construções em terra.

No caso de construções antigas, busca-se materiais que apresentem características que permitam a conservação e o restauro destas construções. Muitas vezes, patrimónios históricos também almejam a otimização dos materiais, de modo a obter

materiais eficientes que sejam compatíveis com a alvenaria em adobe, assegurando assim a reabilitação dos edifícios (C. Costa et al., 2018)

O presente trabalho visa contribuir para a otimização de técnicas construtivas sustentáveis aplicadas ao restauro e reabilitação de edifícios em adobe, através do estudo do desempenho de diferentes formulações de geomateriais. O ponto de partida é a construção em adobe, em específico a ativação alcalina de geomateriais, com vista ao desenvolvimento formulações de adobes, tentando sempre manter o princípio da compatibilidade de materiais.

A durabilidade das construções em adobe dependem não só da manutenção das mesmas, mas também da compatibilidade do material utilizado no seu restauro (F. Pacheco-Torgal & Jalali, 2012). Para garantir a compatibilidade entre o material utilizado no restauro e dos adobes implica no conhecimento das características físicas, químicas e composicionais do material a ser restaurado. Desta forma garante-se a continuidade e não alteração das características mecânicas originais.

A abordagem dos estabilizantes naturais remete às origens da estabilização empírica dos adobes C. Neves & Faria (2011). Os estudos recentes caminham para diferentes materiais, a exemplo de nativas em argamassas à base de terra apresentado em Lima e Faria (2016), e diferentes tipos de fibras consoante a disponibilidade da vegetação. Millogo, Aubert, Séré, Fabbri, & Morel, (2016) apresentam os efeitos do estrume de vaca como estabilizadores nos adobes. Há ainda uma vertente que estuda a aplicação de resíduos geológicos como estabilizadores. Huseien et al. (2018) apresentam resultados da ativação alcalina em misturas de resíduos sólidos para argamassas, alcançando bons resultados em ganhos de resistência mecânica. Os autores citam ainda a melhor performance ambiental deste produto frente ao cimento Portland, comumente utilizado em argamassas.

Neste contexto de desenvolvimento de geomateriais aplicados aos adobes, a abordagem dos geopolímeros surge da perspectiva da construção sustentável. Os geomateriais apresentam grande potencial para substituir e/ou reduzir o betão usual, mantendo suas propriedades mecânicas e levando a um menor consumo energético e libertação de CO₂ para o meio ambiente (C. Costa et al., 2018).

2. Objetivos

Este trabalho apresenta como objetivo principal contribuir para a otimização de adobes e auxiliar no desenvolvimento tecnológico de geomateriais, com o intuito de sanar algumas das patologias observadas nos adobes tradicionais da região e Aveiro, bem como evitá-los em novas construções em adobe, contribuindo assim para o desenvolvimento das técnicas construtivas sustentáveis.

Para tal, aplicou-se a ativação alcalina com hidróxido de sódio e potássio a 6 molar em 9 formulações de adobe com diferentes geomateriais, com o intuito de verificar os efeitos da ativação sobre estas novas formulações de adobe. Estes efeitos foram verificados através da avaliação das características mineralógicas, químicas, texturais, mecânicas e de interação com a água nos diferentes cenários de ativações e em três diferentes tempos de cura, 28, 60 e 90 dias.

3. Enquadramento teórico

3.1. Adobe

3.1.1. Definições

Denomina-se adobe o material de construção e técnica construtiva, uma vez que apresenta a peculiaridade de ser utilizado tanto em paredes, como em tetos e coberturas. A técnica consiste em utilizar blocos de terra crua moldados sem compactação (M. Fernandes & Tavares, 2016).

O adobe é confeccionado a partir da terra húmida, que pode ser utilizada como um barro de consistência pastosa que recheia o molde, ou ainda um barro menos pastoso que é lançado dentro de um molde de madeira (Minke, 2001). O fabrico do adobe consiste em formar blocos em moldes de madeira, secos ao sol, constituindo a cura. Os moldes são preenchidos por uma mistura com o solo do local e água, e, em alguns casos, com a adição de estabilizadores (Rotondaro, 2011). A sua aplicação é semelhante aos tijolos convencionais na alvenaria, com uma argamassa à base de terra com o objetivo de obter uma melhor interação entre os materiais, evitando fissuras e eventuais descolamentos (C. Costa et al., 2018).

3.1.2. Origens do adobe

Apesar de não haver um consenso quanto às primeiras construções em terra crua encontradas, acredita-se que estas datam da altura da sedentarização do homem, com o desenvolvimento da agricultura, há cerca de 10.000 anos (F. Pacheco-Torgal & Jalali, 2012). Dobson (2015) cita as escavações arqueológicas na Turquia de Catahyouk, uma das primeiras civilizações nómades, que exhibe construções em terra crua como tijolos e argamassas, datadas de 10.000 anos.

Na Mesopotâmia e no Antigo Egito há diversos registos do uso do adobe como material construtivo e relacionado com cerimónias e rituais sagrados de proteção à moradia, correlações com o sagrado feminino, e aplicações em templos e palácios (M. Fernandes & Tavares, 2016).

Não obstante, estes registos são observados em diversas localidades ao redor do mundo, sob a forma de construções antigas em terra que ainda hoje se encontram parcialmente preservadas. A lista do Património Mundial apresenta ocorrências de adobes e de técnicas mistas na América Sul e Caraíbas, na América do Norte e

Europa, nos estados Árabes, na África e na Ásia-Pacífico (M. Fernandes & Tavares, 2016).

A América Central, o Perú e México apresentam ruínas de construções em terra (Alexandra, 2006 in Pacheco-Torgal & Jalali, 2012) sob a forma de paredes de argila seca ao sol com fibras vegetais erguidas entre 1000 e 1500 d.C..

Neves & Faria (2011) destacam que consoante o deslocamento e processos de conquistas e colonização do homem, as técnicas de construção foram se difundindo, adaptando e organizando de acordo com as necessidades e particularidades de cada região. Segundo Dobson (2015), praticamente todos os países do mundo apresentam algum tipo de construção em terra crua, seja esta antiga ou atualmente em construção.

O primeiro uso de adobe na Europa remete a 5300 a.C., no assentamento de Sesklo, na Grécia, no qual pequenas casas construídas em fundações de pedra foram datadas (Pacheco-Torgal, 2015).

A Europa Central e do Norte apresentam também uma tradição de construção em terra, apesar das construções mais conhecidas se concentrarem na zona mediterrânea. As condições climáticas e naturais juntamente com a necessidade de fazer uso do material disponível possibilitou o desenvolvimento de diversas técnicas de construção em terra, sejam estas totalmente baseadas em terra, híbridas, com adição de madeira e plantas, ou ainda como argamassa em construções com blocos de rocha. Há registos de construções em terra que datam do Neolítico feitas de madeira e argila (técnica semelhante ao tabique) na Áustria, por exemplo (Volhard, 2015).

Na Península Ibérica, o desenvolvimento da construção em terra crua remete suas origens com os Fenícios, Cartagineses, Romanos e foram aperfeiçoadas pelos Muçulmanos, principalmente na Península Ibérica (Ribeiro, 1969 in Pacheco-Torgal & Jalali, 2012).

Textos de Plínio (23 a.C – 79 d.C) respeitante às muralhas de Cartago e Espanha que Aníbal teria construído, indicam que estas foram feitas em terra crua (Houben & Guillaud, 1989). Ocorrências de construções em terra, especificamente a taipa, ao longo da Península Ibérica que datam do período de dominação muçulmana (entre os séculos VII e XIII), sendo comuns tanto na arquitetura civil como na construção de fortificações (Bruno, 2005).

3.1.3. O adobe em Portugal

Em Portugal, muitos edifícios antigos foram erguidos com a arquitetura em terra. O trabalho de J. Fernandes et al. (2016) aponta um zoneamento das técnicas de construção consoante o território: do baixo Tejo ao Algarve predominam as construções em taipa; já a técnica do adobe predomina na zona próxima à costa entre Setúbal e Aveiro; a construção em tabique é característica da região das Beiras, Trás-os-Montes e entre o Douro e o Minho. Desta forma, a maior parte das construções em adobe situam-se na região da costa central devido à disponibilidade do material, a terra crua (solo) (Ciancio, Jaquin, & Walker, 2013).

Observam-se influências diretas trazidas do Egipto, Tunísia e da Síria, que por sua vez mesclavam-se com as próprias tradições autóctones, resultando em construções em taipa e em adobe. Torres & Macias (1995) evidenciam a ocorrência de construções no Algarve e no Alentejo em que as paredes externas eram de taipa, enquanto as paredes internas eram executadas em adobes (tijolos crus), podendo ou não ser rebocadas.

C. S. Costa, Rocha, Varum, & Velosa, (2013) correlacionam a presença de solos arenosos com a aplicação de cal nos adobes, ao ser aplicado como agente estabilizante. Estes adobes com cal estão presentes nas construções em adobe no Centro e Sul de Portugal. Alguns dos edifícios datam do século XX, e encontram-se em estado razoável de conservação.

De forma generalista, o adobe acaba por não ser a técnica construtiva em terra crua predominante territorialmente em Portugal. M. Fernandes & Tavares, (2016) apontam a maior ocorrência do adobe nas bacias do Vouga e do Mondego, na região da Beira Litoral, onde há mais ocorrência de solos argilosos e arenosos. As construções em adobe acabam por desaparecer em localidades em que os solos são pouco evoluídos e onde predomina a presença de rochas. Mais ao sul e com caráter menos intenso, o adobe é encontrado na bacia hidrográfica do rio Tejo, se estendendo ao estuário do rio Sado. As autoras destacam a importância da disponibilidade de água para o desenvolvimento desta técnica construtiva. A Figura 1 ilustra a ocorrência das construções em adobe, sendo estes utilizados tanto em paredes exteriores e interiores, como também apenas nas paredes interiores, como ocorre no Alentejo e no Algarve.

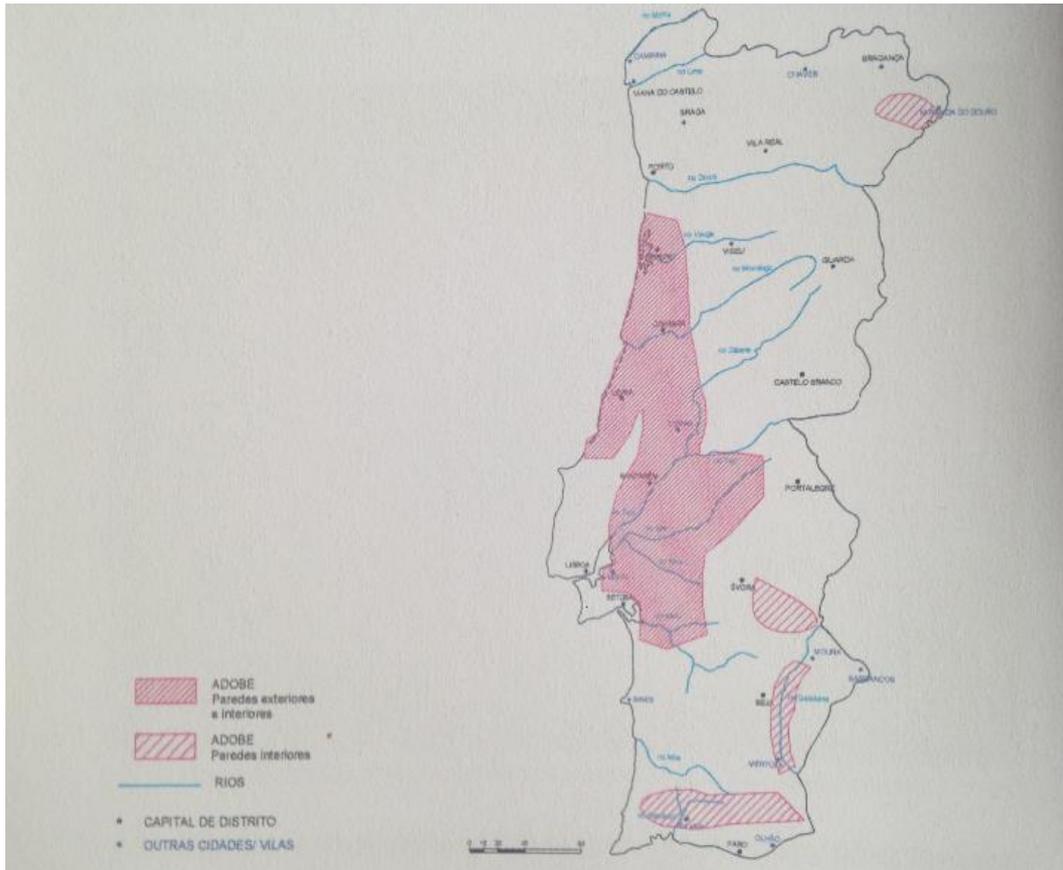


Figura 1: Ocorrência do Adobe em Portugal, 2013 (extraído de (M. Fernandes & Tavares, 2016)).

Os adobes da região da Beira Litoral chegaram a ser produzidos de forma padronizada, sendo aplicadas às paredes interiores. Os adobes apresentavam as dimensões de (0,45mx0,15mx0,12m), podendo ainda se apresentar como de $\frac{3}{4}$ para remates de aparelhos de alvenarias; ou como adobes de muro, também como adobes de parede (estruturais) com dimensões de (0,45mx0,30mx0,12m), ou ainda na variante de adobes de poço com formato curvado (M. Fernandes & Tavares, 2016). A Quinta do Areal de Manuel Duarte, em Esgueira, Aveiro, apresenta alguns destes moldes típicos dos adobes, confeccionados na região até meados da década de 1960, como ilustra a Figura 2.



Figura 2: Moldes de adobes da Quinta do Areal, Esgueira.

Em Portugal, os adobes podem ser classificados em dois tipos, a saber o “adobo”, denominação que se dá ao adobe estabilizado com cal, e os adobes de terra propriamente ditos. A cal era um estabilizador comum, sendo utilizado na zona de Aveiro nos adobes de composição muito arenosa, juntamente com as argilas. Já os adobes de terra eram confeccionados de terra argilosa e usualmente levavam na sua composição fibras vegetais, como o junco seco e a palha. No que se refere às dimensões e ao aparelho de alvenaria, observa-se uma grande diversidade dos adobes portugueses (M. Fernandes & Tavares, 2016).

Dentre os adobes portugueses feitos em molde, M. Fernandes & Tavares (2016) identificam quatro tipos de composição predominantes em Portugal: adobe de terra, cuja formulação apresenta terra e água, estabilizado com areia; adobe de “palhão”, constituído pela terra adicionado junco ou palha como estabilizante; adobe de lodo ou gramão, o qual era confeccionado já com as raízes e restos vegetais oriundos do próprio substrato que era utilizado como matéria prima; e o “adobo” que leva cal em sua composição.

No que concerne à composição, os adobes também apresentam grande diversidade, uma vez que acabam por refletir as características do local em que a terra é extraída. As autoras M. Fernandes & Tavares (2016) citam como exemplo os adobes do Vale do Cértima, por exemplo, eram executados com material extraído da Pateira de Fermentelos. Na sua composição, a lama extraída para o fabrico dos adobes já trazia consigo restos de raízes vegetais que eram aproveitadas como estabilizantes na confecção dos adobes.

De acordo com Varum, Martins, & Velosa (2005), no município de Aveiro entre 20 e 25% da construção da cidade é em adobe, e considerando o distrito de Aveiro, a percentagem sobe para 35 a 40%, dados que mostram a importância do adobe como património e sua potencialidade como método construtivo na região.

Na região de Aveiro e Ílhavo, muitos dos prédios construídos em adobe apresentam valor cultural, social e arquitetónico associados ao período da Arte Nova (Silveira et al., 2012; Tavares, Costa, & Varum, 2012). Até 1940 predomina a construção em adobe em Ílhavo e, a partir de 1960, com a influência modernista, observa-se o início do uso de betão armado e de cerâmica nas construções em adobe, caracterizando um sistema de construção misto. Por influência das indústrias cerâmicas da região, juntamente com a sazonalidade da produção do adobe, passou-se a fazer uso tijolos cerâmicos nas construções em adobe, principalmente no revestimento, com o intuito de evitar problemas do adobe com a água (Tavares, Costa, & Varum, 2012).

3.1.4. Manufatura do adobe

M. Fernandes & Tavares (2016) apresentam três variantes para os adobes como método construtivo, a saber: o adobe manual, que corresponde ao adobe fabricado apenas com as mãos, sem moldes; o adobe moldado (usual e tradicionalmente confeccionado em moldes de madeira). Estes dois primeiros tipos são classificados por Rotondaro, (2011) como adobes artesanais. A terceira variante é o adobe mecânico ou extrudido, que faz uso de processos mecânicos e industriais, seja para misturar a terra ou com a introdução de moldes múltiplos e máquinas de extrusão, produzindo adobes em escala industrial, como verifica-se na Figura 3.

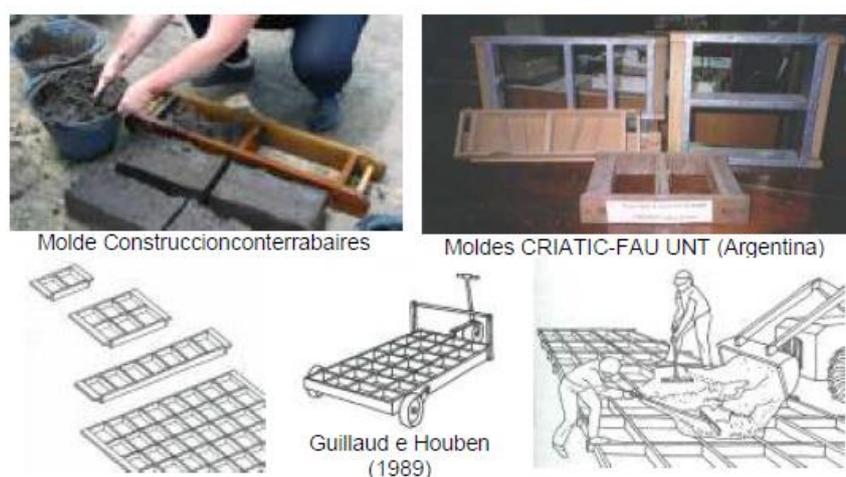


Figura 3: Moldes de adobes artesanais e em escala industrial (extraído de Rotondaro, 2011).

Segundo Houben & Guillaud (1989), a produção do adobe tem o início com a extração da terra, seguida de seu preparo e adição de estabilizadores. A posteriori, adiciona-se a água para a confecção da pasta, esta é colocada nos moldes. Após o preenchimento do molde, este é removido e os blocos são colocados para secar ao sol. Por fim, os adobes podem ser armazenados ou empregados para a construção.

A extração da terra é a primeira etapa deste processo. Na região da Beira Litoral, a terra era removida dos areais e barreiros em banqueiras, que seriam cortes nos taludes, com o auxílio de pás e picaretas. Com o aumento da demanda, o trabalho que era manual passou a ser executado por máquinas. Após a extração, a terra era colocada para arejar perder a humidade natural por evaporação (M. Fernandes & Tavares, 2016).

A preparação da terra tem início com o peneiramento da amostra para separar a fração argilosa dos seixos e pedregulhos e a fragmentação dos torrões e a limpeza da

terra seca, removendo eventuais fragmentos de vegetais e lixo. Caso faça uso de estabilizantes naturais como a palha ou o esterco, esta é a altura de prepará-los, pois devem estar secos e já fragmentados para serem adicionados à terra seca na etapa do preparo (Rotondaro, 2011).

Alguns manuais e autores apresentam testes *in situ* para avaliar a qualidade do solo, bem como a necessidade de uso de estabilizantes, a exemplo de M. Fernandes & Tavares (2016); Minke (2001); C. Neves & Faria (2011). Estes ensaios são equivalentes às caracterizações granulométricas e físicas do solo (Limite de Atterberg e índice de plasticidade). Dentre os ensaios, os mais usuais são o teste de sedimentação rápida (teste do pote), o teste da bola, o teste do rolo (também conhecido como do cordão ou cigarro), o teste da fita, o teste de exsudação, teste da resistência seca ou da pastilha, descritos em pormenores no trabalho de Neves, Faria, Rotondaro, Cevallos, & Hoffmann (2009).

Estas avaliações feitas em campo permitem determinar se o solo pode ser utilizado e se serão ou não necessárias adições de estabilizadores nesta etapa de preparação. Cabe ressaltar que em casos de produções em larga escala, recomenda-se maior rigor à caracterização do material, sendo aconselhável a execução de ensaios de laboratório para caracterização mineralógica, textural e física do material (Rotondaro, 2011).

Ao prosseguir no preparo da terra para os adobes, após a mistura dos componentes secos adiciona-se a água. A mistura da água pode ser feita manualmente ou com os pés, com auxílio de tração animal ou ainda com misturadores mecânicos. Este processo pode ser feito sobre uma superfície plana ou em recipientes, podendo levar semanas até se obter a textura desejada (Rotondaro, 2011).

Após o preparo da “terra”, segue-se ao processo de moldagem dos adobes. Os moldes são tradicionalmente feitos em madeira, sendo humedecidos antes da adição do material para evitar a aderência da mistura nas suas paredes. O adobe deve ser feito numa superfície plana, visto que o molde não tem fundo. Após a adição do material no interior do molde, a terra deve ser pressionada de forma a preenchê-lo por completo e a superfície deve ser aplainada com o auxílio de uma régua. O desmolde é feito logo a seguir e deve-se deixar um espaço entre os adobes para que este seque por igual (M. Fernandes & Tavares, 2016; Rotondaro, 2011).

Alguns moldes de madeira apresentam o interior revestido por uma chapa metálica para facilitar a remoção do adobe sem deformações. A esta chapa metálica pode ainda ser adicionado óleo para facilitar o desmolde (M. Fernandes & Tavares, 2016).

A secagem dos adobes pode ser feita ao ar livre, ou em locais em que se preservem de certa forma as condições de humidade e temperatura. Em Portugal, nos sítios de produção em série de adobes, estes são postos a secar em ensecadeiras ou telheiros. Na ausência destes sítios, são postos a secar em superfícies planas previamente preparadas com uma camada protetora de areia na base. O período de secagem é de três dias em posição horizontal, sendo virados de lado (ao cutelo) para terminar de secar (M. Fernandes & Tavares, 2016). Rotondaro (2011) descreve o período de secagem entre uma a duas semanas horizontalmente, a depender do clima local. Posteriormente, para finalizar a secagem, os adobes são colocados de lado entre 5 a 10 dias.

O armazenamento dos adobes e a cura constituem a etapa final do fabrico do adobe, não menos importante. Os adobes devem ser armazenados em locais protegidos da chuva, sob telheiros e na ausência, devem ser empilhados até 1,20m de altura e cobertos e feita uma condução da água pluvial ao redor da pilha para evitar o contato com água (Rotondaro, 2011).

Realiza-se um teste prático de resistência nos adobes após quatro semanas de cura, no qual se coloca um adobe sobre outros dois em sua extremidade, deixando um vão abaixo dele e uma pessoa senta-se em cima. Os adobes só devem ser utilizados em construções após um ano de cura, principalmente os que levam cal na composição (M. Fernandes & Tavares, 2016).

3.1.5. Características da terra empregada na confeção do adobe

A princípio, o adobe é constituído da mistura da fase sólida (terra crua) e água. A proporção de água e terra varia consoante as características da fase sólida. De acordo com o CRAterre¹, os valores médios seriam de uma proporção volumétrica composta por uma parte de água para cinco partes de terra. De acordo com Rotondaro (2011) a quantidade de água a ser adicionada também varia consoante a demanda do material seco, sendo usualmente entre 30 e 35% do volume em terra.

Um perfil de solo bem desenvolvido é composto por horizontes bem definidos. Quando se trata de um solo residual, este desenvolve-se a partir da meteorização da rocha-mãe. Portanto, o horizonte sobrejacente a ele é o mais jovem e o que mais se assemelha composicionalmente à rocha mãe, sendo denominado horizonte C ou saprólito. Acima do saprólito, desenvolve-se inicialmente o horizonte A o qual é composto por minerais alterados (secundários) do saprólito e por húmus. Conforme o

¹ Aedo, Wilfredo Carazas, Douline, Alexandre. Adobe: manual de produção. Aachen: Misereor/CRAterre, IHR Hifsferk, 2011)

perfil de solo se desenvolve, origina-se o horizonte B, no qual se concentram minerais neoformados e elementos removidos de outros horizontes subjacentes. O horizonte E pode vir a desenvolver-se entre os horizontes A e B, sendo caracterizado por remoção de argila e óxido de ferro pela água, resultando em um horizonte de coloração clara, como é possível verificar na Figura 4 (C. Neves & Faria, 2011).

O solo utilizado nas construções em terra deve ser constituído apenas por fase mineral, excluindo a matéria orgânica que possa existir no horizonte O e eventualmente no horizonte A, utilizando-se maioritariamente os horizontes B e C. O solo utilizado nos adobes pode ser constituído por partículas de granulometria e mineralogia diversa, e quanto à sua génese, ser um solo residual ou transportado (Faria, 2011; Torgal e Jalali, 2012).

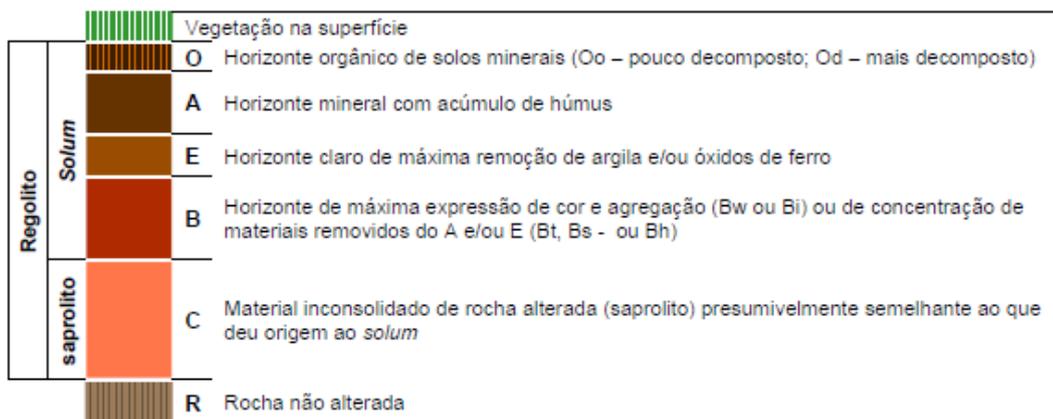


Figura 4: Esquema de perfil de solo (extraído de Neves & Faria, 2011)

No que concerne à granulometria, os solos são constituídos por partículas que variam entre argila, silte e material arenoso em diversas proporções, sendo que alguns autores estabelecem limites para a quantidade de argila. Esta restrição da quantidade de argila nos adobes é necessária porque apesar da argila ser o ligante do adobe, a capacidade de absorção de água pelos minerais argilosos expansivos acaba por aumentar o risco de ocorrência de fissuras nos blocos, para além de outras patologias após o uso dos adobes nas construções. Por outro lado, se há excesso de areia ou silte, falta coesão interna adequada, que aumenta a sua desagregação e reduz a resistência à compressão (C. Neves & Faria, 2011; F. Pacheco-Torgal & Jalali, 2012). Diversos autores apresentam proporções ideais de argila-silte-areia para a confeção dos adobes, sendo assim mais usual limitar as quantidades de argila, como demonstra o Quadro 1.

Quadro 1: Síntese da composição granulométrica recomendada para os adobes (modificada de Rotondaro, 2011).

Autores	Argila (%)	Silte (%)	Areia (%)
Doaut (1985)	15 a 18		
Barrios et al (1987)	35-45		55-65
Houben e Guillaud (1994)	5 a 29	-	-
Graham McHenry (1996)	15 a 25	-	-
NTE E 080 (SENCICO, 2000)	10 a 20	15 a 25	55 a 70
Carazas e Aedo (2002)	1 volume		2 volumes
HB 195 (2002)	10 a 40	10 a 30	30 a 75 (areia e seixos)
Proyecto Hornero (2007)	50		50

3.1.6. Vantagens e desvantagens das construções em adobe

A sustentabilidade da construção em terra e seu caráter vernacular são as principais qualidades deste método construtivo. Dentre as alvenarias em terra crua, especificamente o adobe apresenta características que o tornam sustentáveis, devido ao baixo custo energético e de produção, sua biodegradabilidade e capacidade térmica (Christoforou, Kylili, Fokaides, & Ioannou, 2016; C. Costa et al., 2018; F. Pacheco-Torgal & Jalali, 2012).

Parra-Saldivar & Batty (2006) executaram estudos térmicos em variações diurnas e sazonais em construções em adobes, que correlacionam o seu conforto térmico com o conteúdo de água presente nos adobes, bem como a capacidade em absorver e perder humidade. Christoforou, Kylili, Fokaides, & Ioannou (2016) estudaram o ciclo de vida de diferentes formulações de adobes em diferentes cenários e concluíram que a energia incorporada² nos adobes chega a ser até trinta vezes inferior à energia incorporada no fabrico de um tijolo comum (MJ/Kg), característica que corrobora para a sustentabilidade dos adobes como material de construção.

Dentre as desvantagens do adobe, pode-se citar a sua fragilidade na interação com a água e as suas patologias. Os problemas mais comuns encontrados em construções de adobe são listados por Papayianni & Pacht (2017) como rachaduras devido a sismos, fissuras verticais devido à superposição de cargas extras, embarrigamento das paredes devido às compressões por movimento de vigas ou assoalhos de madeira, decaimento de vigas, pisos e telhados, descolamento de argamassa, arranhões e perdas de material por abrasão, cristalização de sais na superfície

² A energia primária total consumida por processos diretos e indiretos associados a produtos ou serviços, desde a extração de material, fabricação, transporte e qualquer fabricação antes que o produto esteja pronto para sair do portão da fábrica (Hammond & Jones, 2011).

(eflorescência), presença de insetos, ou ainda pelo crescimento de plantas que podem destruir a alvenaria.

Nas construções em adobe na zona de Aveiro, observa-se principalmente o desgaste da fachada por interações atmosféricas (chuva, poluição, humidade e ação marinha) e de rachaduras no teto e paredes devido à redistribuição das cargas e esforços. Em muitas construções em adobe observa-se ainda a aplicação posterior de argamassas em cimento ou cal, para resolver os problemas de revestimento e interação do adobe com a água. Contudo, devido às incompatibilidades entre os dois materiais conduzem a problemas a médio prazo, que levam ao desprendimento da argamassa (Tavares et al., 2012b).

3.1.7. Estabilização

Assim como outras manufaturas, os materiais de construção em terra crua também passaram por um processo de mecanização, introdução e combinação com outros materiais, como o exemplo da cal. Empiricamente, ao adicionar elementos como a palha e a mistura de diferentes tipos de solos foram sendo executadas para melhorar a impermeabilidade e a retração, dando início ao que foi definido como estabilização (C. Neves & Faria, 2011).

A estabilização pode ser granulométrica, mecânica ou com o uso de aditivos. Na estabilização granulométrica faz-se alterações nas proporções de argila ou areia, como descrito em Rotondaro (2011). A estabilização mecânica por sua vez faz uso da compactação do solo. Este deve estar húmido, sendo a sua compressão determinada pelo ensaio Proctor normal (C. Neves & Faria, 2011).

Na estabilização por aditivos, estes podem ser naturais e, mais recentemente, os aditivos químicos (C. Neves & Faria, 2011). Minke (2001) classifica os aditivos como vegetais, animais, minerais ou sintéticos ou industrializados. Dentre os aditivos vegetais utilizam-se fibras de diversas espécies, sumo de plantas oleosas, óleo de linhaça e cola de farinha de trigo. Dentre os estabilizantes de origem animal, os mais usuais são a caseína (proteína do leite), o esterco e urina de cavalo. Dos aditivos minerais, os mais usuais são o silicato de potássio e o silicato de sódio. Já os estabilizantes industrializados mais comuns são o cimento, a cal, o gesso, a emulsão asfáltica e a baba de cupim, segundo a compilação apresentada por dos Santos (2015). A escolha dos aditivos pode ser determinada, por exemplo, a partir do índice de plasticidade, granulometria do solo (Houben & Guillaud, 1989), e pelos testes expeditos *in situ* que caracterizam o material (C. M. M. Neves et al., 2009).

No caso de estabilização com fibras, alguns autores sugerem a proporção a ser utilizada por determinação volumétrica, como se apresenta no Quadro 2.

Quadro 2: *Proporção fibra: terra para adobes (modificado de Rotondaro, 2011).*

Autores	Relação fibra:terra (em volume)
Habiterra (1995)	1 : 6
Carazas e Aedo (2002)	1 : 10
Proyecto Hornero (2007)	1:4; 1:5; 1:6

De acordo com Elert et al. (2015), as argilas atuam como ligantes nos adobes, entretanto, os minerais argilosos também são os responsáveis pelas principais patologias observadas nas construções em adobe. Isto deve-se às características que os minerais argilosos possuem de se expandir ou se contrair com a variação do teor de água, oriundas de sua cristalografia, levando ao surgimento de fissuras e reduzindo a sua resistência mecânica.

3.2. Geopolímeros e ativação alcalina

Desde 1930 a ativação alcalina de aluminossilicatos vem sendo utilizada na confecção de zeólitos, sendo adicionados à formulação do cimento Portland (Davidovits, 2015). Os geopolímeros foram descritos por Joseph Davidovits em 1978. Atualmente são definidos como materiais denominados aluminossilicatos tridimensionais, em fase amorfa a semi-amorfa que têm sua gênese a partir da reação de geopolimerização (Xu & Van Deventer, 2000).

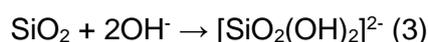
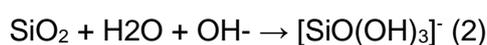
A reação de geopolimerização por sua vez, envolve reações químicas entre óxidos de alumínio (Al^{3+} com coordenação IV-V) com silicatos sob condições alcalinas (Xu & Van Deventer, 2000).

De acordo com Davidovits (1994) in Davidovits (2015), os geopolímeros constituem a fase precursora dos zeólitos, e requerem condições de síntese semelhantes apesar da velocidade de cristalização ser mais rápida. O produto final nos geopolímeros consiste em um aluminossilicato hidratado em gel, decorrente da dissolução dos aluminossilicatos em meio alcalino (Xu & Van Deventer, 2000). Outros autores como Rees et al (2007) descrevem a formação dos geopolímeros para síntese de zeólitos como um gel amorfo resultante de uma série de reações de despolimerização e repolimerização, catalisadas pela presença de OH^- .

O OH^- catalisa a dissolução de Si^{4+} e Al^{3+} , além de elevar o pH o suficiente para as reações de condensação. A solubilidade da sílica ocorre em pH abaixo de 3 e acima de 11, porém o meio ácido não favorece a cristalização de formas estáveis. Já o pH alcalino permite a formação de hidratos estáveis que aumentam as propriedades cimentícias do material. O Al^{3+} apresenta comportamento semelhante ao da sílica, porém, o pH alcalino favorece a formação do $\text{Al}(\text{OH})_4^-$, que por sua vez reage com a sílica livre no sistema e favorece a polimerização, originando os géis (Garcia-Lodeiro, Palomo, & Fernández-Jiménez, 2015).

No decorrer da reação em meio alcalino, a ordem estrutural do gel amorfo aumenta, dando origem a proto núcleos, que dão sequência a produção de zeólitos. Os autores supracitados ainda destacam que os cimentos ativados alcalinamente apresentam propriedades térmicas, mecânicas e químicas superiores aos cimentos tipo Portland, com menor produção de CO_2 envolvida no seu fabrico.

De acordo com a revisão apresentada por Severo, Costa, Bezerra, Menezes & Neves (2013), a ativação alcalina apresenta quatro etapas descritas na literatura, a saber: dissolução, coagulação, condensação e endurecimento da estrutura. Durante a fase de dissolução da sílica ocorre a quebra de ligações covalentes Si-O-Si e Al-O-Si, promovidas pelo aumento do pH da solução. As equações de dissolução são:



A seguir, estes grupos são conduzidos a uma fase coloidal e os produtos desta reação acumulam-se, dando origem à etapa de coagulação. Esta coagulação leva a uma terceira etapa em que se gera uma estrutura condensada que pode evoluir para uma etapa de cristalização (Severo et al., 2013).

Durante a condensação ocorrem reações de substituição nucleofílicas em que os produtos das reações de dissolução (1) e (2). Estes passam a se ligar por atração das hidroxilas do $[\text{SiO}(\text{OH})_3]^-$ e dos íons de alumínio do $[\text{Al}(\text{OH})_4]^-$, originando um complexo intermediário. Por fim, as hidroxilas do complexo intermediário condensam-se, originando uma espécie de aluminossilicato e liberando uma molécula de água. O produto final é um polímero amorfo de alta resistência mecânica, que varia consoante os catiões envolvidos na ativação e ao material (Severo et al., 2013).

A ativação alcalina vem sendo estudada como método de tratamento alternativo para construção em terra crua, buscando resultados que melhorem principalmente a resistência mecânica e a resistência à água nos adobes. Para além de melhorar estas características nos adobes, estes estudos apresentam como objetivos evitar ou sanar patologias existentes nas construções tradicionais em adobe (Elert et al., 2015).

Os ativadores alcalinos podem ser cátions ou hidróxidos de metais alcalinos, sendo os mais estudados os de sódio e de potássio. Dois tipos de ativadores são normalmente utilizados que são soluções de hidróxido alcalinos, como NaOH e KOH, que não adicionam sílica ao sistema, apenas alteram o pH do meio e inserem cátions. O outro tipo de ativador utilizado são misturas de soluções de silicato alcalino e hidróxido alcalino, que adicionam sílica ao sistema, como o silicato de sódio ($n\text{SiO}_2\text{Na}_2\text{O}$). As soluções que levam silicato normalmente aceleram a reação geopolimérica pelo fato de introduzirem sílica livre no sistema, que reagem com a alumina livre (Severo et al., 2013).

3.3. Adobe e Arquitetura vernacular

A arquitetura vernacular fundamenta-se em elementos e materiais de construções locais que refletem as tradições locais, executadas pelas próprias famílias, comunidades ou auto-construtores. Desta forma, a construção encontra-se suscetível a uma pluralidade de condições – climáticas, geológicas, económicas e culturais. Desta forma, muitas gerações estiveram envolvidas nas adaptações das técnicas às características regionais e às tecnologias dominadas (J. Fernandes et al., 2016).

Em Portugal, o uso dos materiais construtivos locais caracterizam a arquitetura vernacular. De forma geral, está intimamente relacionada com a geologia. Ou seja, onde há pedra, constrói-se com pedra. Quando a rocha se torna escassa, utiliza-se a terra, seja no adobe ou no tijolo cozido, madeira ou ainda outros materiais vegetais (Oliveira e Galhano, 1992 in J. Fernandes et al., 2016). As escavações na Bacia Mediterrânica evidenciam que as diferenças nos processos construtivos adotados se relacionam diretamente com o material disponível para executá-las. De forma geral, observa-se a Norte, o granito e o xisto e a Sul, a terra e o barro (Oliveira, Marat-Mendes, & Pinho, 2015).

A arquitetura vernacular depende, portanto, do meio em que será construída, pois faz uso dos materiais disponíveis na natureza e pode ou não fazer uso de algumas tecnologias (Ramos, 2015). A Carta do Património Vernacular Construído (ICOMOS,

1999)³ define quais são as características que uma construção deve apresentar para ser caracterizada como arquitetura vernacular, dentre as quais pode-se citar: reflete um modo de construção da comunidade; possui caráter regional conectado ao território em que se encontra inserida; apresenta coerência de estilo, forma e aparência, e faz uso de estilos arquitetônicos previamente estabelecidos; a sabedoria tradicional do projeto e da construção é usualmente transmitido de maneira informal; é uma resposta direta às demandas sociais e ambientais; e faz uso de técnicas tradicionais de construção.

Em Espanha, especificamente em Córdoba, Alhambra, Generalife e Albacín, a tradição da construção em terra foi considerada pela UNESCO património cultural da humanidade (Jiménez Delgado & Guerrero, 2007).

³ Carta de Património Vernáculo Construído, assinada no México em 1999, disponível em: http://www.esicomos.org/Nueva_carpeta/info_VERNACULA.htm

4. Materiais e Métodos

O material selecionado como matéria-prima das formulações desenvolvidas neste trabalho têm origem na zona de Aveiro, e com exceção do metacaulino comercial (MK), eram utilizados nos adobes da região. A Areia do Areal (AA) de Esgueira, Aveiro; a Lama da Pateira de Fermentelos (LP), proveniente da lagoa homónima, situada zona de Águeda/Aveiro/Oliveira do Bairro e o caulino (K) de São Vicente Pereira Jusã, Ovar, explorado pela empresa Motamineral – Minerais Industriais SA, como demonstra o mapa da Figura 5.

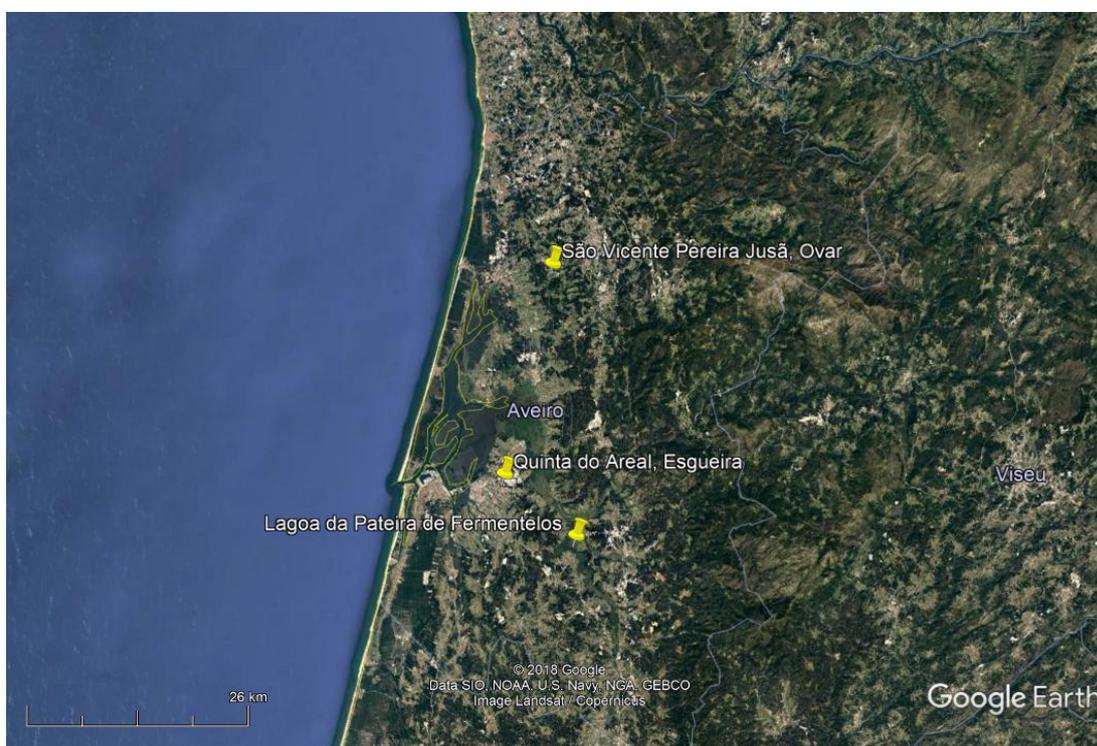


Figura 5: Mapa de localização da matéria-prima utilizada na confecção dos adobes.

A Figura 6 resume os procedimentos desta pesquisa. Primeiramente caracterizou-se a matéria-prima dos adobes. A seguir foram executadas 9 formulações a partir destas matérias-primas, sendo feitas sempre uma formulação com água e as outras duas com ativação alcalina a partir do hidróxido de sódio (NaOH) e do hidróxido de potássio (KOH) a 6 molar. Após a confecção dos adobes e remoção dos moldes, os provetes foram submetidos a ensaios de resistência mecânica e absorção de água por capilaridade após os tempos de cura de 28, 60 e 90 dias.

A partir dos resultados, caracterizou-se química e mineralogicamente as formulações com melhor desempenho, bem como foram obtidas imagens no SEM.

Para além dos materiais retirados de depósitos, neste capítulo serão expostos os demais materiais utilizados no preparo e análise dos provetes de adobes.

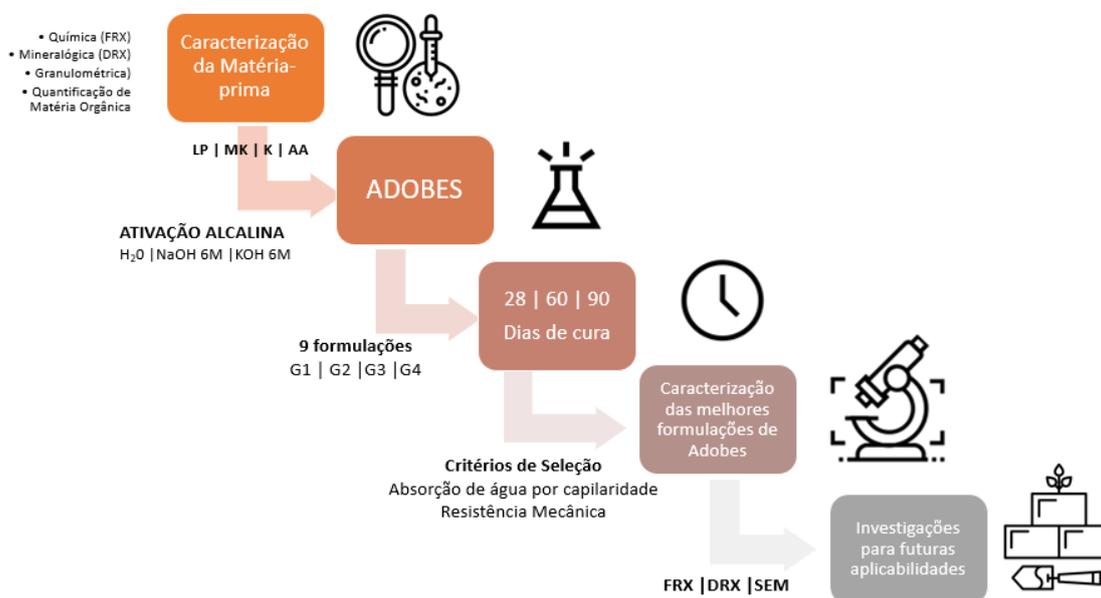


Figura 6: Fluxograma resumo da metodologia. LP corresponde a Lama da Pateira de Fermentelos, MK o metacaulino, K o caulino e AA à areia da Quinta do Areal.

4.1. Materiais

4.1.1. Lama da Lagoa da Pateira de Fermentelos

4.1.1.1. Enquadramento Geográfico e Geomorfológico

A Pateira de Fermentelos é uma lagoa do Baixo Vouga que se situa no distrito de Aveiro, e abrange os concelhos de Águeda, Aveiro e Oliveira do Bairro. Corresponde ao extremo norte da bacia hidrográfica do rio Cértima, afluente esquerdo do rio Águeda, que por sua vez é afluente da margem esquerda do rio Vouga (AGRI-PRO AMBIENTE, 2015), conforme demonstra a Figura 7.

A Lagoa da Pateira de Fermentelos é considerada a maior lagoa natural da Península Ibérica. Encontra-se a montante da confluência dos rios Cértima e Águeda, a cerca de 20Km da linha de costa, a jusante da Ponte de Requeixo. A lagoa desenvolve-se nos últimos 4 Km do rio Cértima, sendo este o principal responsável por sua alimentação e caudal. Apresenta área de superfície e profundidade variável ao longo do ano, sendo

que no verão há uma intensa redução no espelho d'água atribuído a uma redução no caudal de água subterrânea na época de seca e à descida do nível de base do Rio Águeda, o que favorece o escoamento da lagoa. Assim sendo, a lagoa da Pateira atinge seu máximo de 5Km² nas épocas de cheia. Sua envolvente é maioritariamente composta por áreas agrícolas e florestas. Desde o ano de 1985, a lagoa é alvo de campanhas de dragagens, visto que há um processo de assoreamento e erosão que converge para o desaparecimento da lagoa (AGRI-PRO AMBIENTE, 2015).

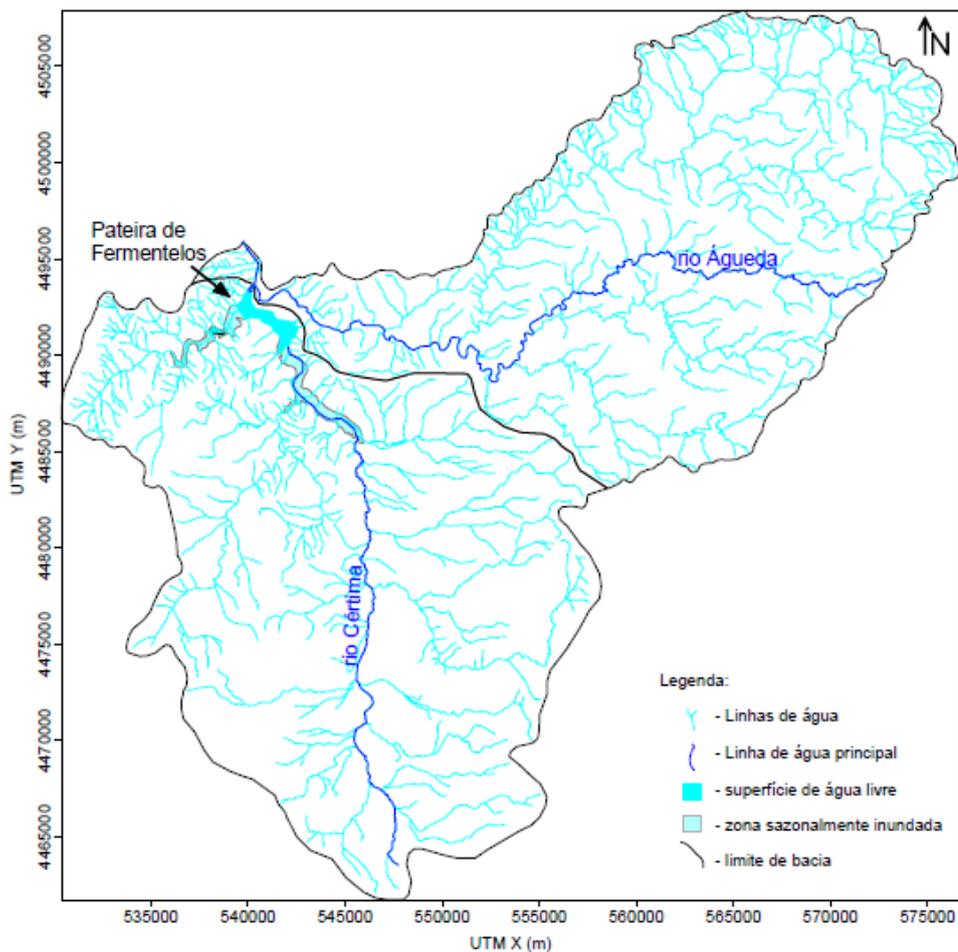


Figura 7: Bacias Hidrográficas do rio Cértima e do rio Águeda (extraído de Sena, 2007).

De acordo com Sena (2007), a lagoa de Fermentelos passou por um processo histórico de formação que compreende condicionantes naturais e antrópicas. Sua configuração atual tem origem provável na Idade Média, em que a ação conjugada das cheias do rio Cértima e o acúmulo de sedimentos do rio Águeda levou à formação da lagoa. Posteriormente, as dragagens e as recolhas do moliço (na altura utilizados como adubo para os terrenos agrícolas situados na planície aluvial do Cértima) contribuíram para a sua configuração e manutenção do aporte de água e sedimentos.

Atualmente, com o cessar da recolha do moliço aliados ao uso e ocupação do solo na região, como por exemplo o uso de fertilizante artificiais nas áreas agrícolas, e também com as condicionantes naturais de aporte de água, sedimentos e nutrientes, a lagoa transformou-se em um pântano.

A zona do Baixo Vouga é caracterizada por elevações de topo aplanado de baixa altitude, usualmente cobertas por terraços fluviais e marinhos do Quaternário. A rede hidrográfica foi responsável pela erosão dos terraços Quaternários, expondo nas vertentes e nos fundos dos vales as unidades Cretácicas a oeste da lagoa e sedimentos Triássicos à leste, pela ação dos rios Cértima, Águeda e Vouga, como demonstra a Figura 8 (Sena, 2007).

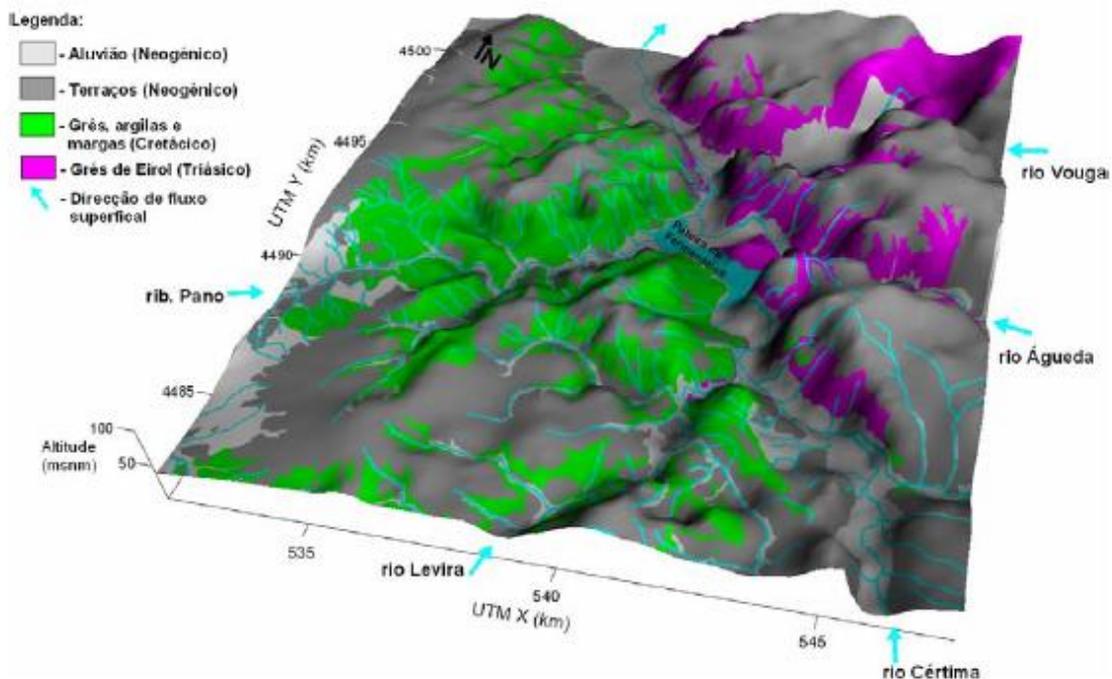


Figura 8: Modelo Digital de Terreno da Lagoa da Pateira e geologia envolvente, digitalizada a partir de Barbosa, 1981; Teixeira & Zbyszewski, 1976 e Barra, 1998, extraído de Sena (2007).

Nas vertentes dos arenitos Triássicos, na zona de Espinhel, observa-se um relevo escarpado e íngreme que exhibe contato direto com a lagoa através de uma estreita faixa aluvial. Já a vertente Cretácica da Zona do Requeixo, o relevo é suave, com linhas d'água entalhadas que desembocam na ribeira do Pano. A altitude varia entre 55m e 77m (Sena, 2007).

Segundo Sena (2007), a zona de Fermentelos exhibe a menor declividade (2%), onde os vales do rio Cértima e Pano exibem o fundo aplainado e parcialmente assoreado, que dão origem a uma área pantanosa argilosa que se encontra inundada na época húmida.

4.1.1.2. Enquadramento Geológico

Kullberg et al. (2006) situam o desenvolvimento da Bacia Lusitânica durante o Mesozóico, na Margem Ocidental Ibérica (MOI), no contexto tectono-estrutural da abertura da Pangeia e formação do Atlântico Norte. O estiramento crustal progressivo levou a rotura crustal e conseqüente separação da Ibéria do continente Norte-Americano, que culminou na oceanização no final do Cretácico Inferior. De acordo com Dias & Ribeiro (1995), o embasamento da bacia pertence ao Maciço Hespérico, sendo constituído pelas unidades da Zona de Ossa Morena (ZOM) e provavelmente também da Zona Sul Portuguesa (Ribeiro et al., 1979 in Kullberg et al., 2006).

Trata-se de uma bacia intracratónica tipo rift não vulcânica, cujo eixo principal apresenta cerca de 200Km na direção NNW-SSE e o eixo perpendicular apresenta 100Km de extensão, perfazendo uma extensão de 20.000 Km². A evolução tectónica da Bacia Lusitânica esteve condicionada por falhas tardi-orogénicas pós-variscas, entre 300 e 280 Ma. Como resultado deste episódio, observam-se as falhas de desligamento esquerdo de direção aproximada NNE-SSW a NE-SW, para além de falhas de orientação N-S, a saber a falha Porto-Tomar e NW-SE, que refletem uma intensa compartimentação da bacia, delimitando setores (Ribeiro et al., 1999 in Kullberg et al., 2006).

O modelo de desenvolvimento da Bacia Lusitânica deu-se ao longo de quatro episódios de rifting, a saber: Triássico-Sinemuriano, Pliensbaquiano-Oxfordiano, Kimeridgiano-Berrasiano Inferior, Berrasiano Superior-Aptiano Superior. Com base em variações de fácies e espessura das unidades litostratigráficas do Jurássico Inferior, adota-se aqui a divisão da Bacia Lusitânica apresentada por Rocha & Soares (1984) in Kullberg et al. (2006), que compartimentam a Bacia em três sectores, a saber: Setentrional (delimitado pela Falha de Aveiro a norte e pela Falha de Nazaré ao sul), Central (Falha de Nazaré e Falha de Montejunto-Arrife a sul) e Meridional (a sul da Falha Montejunto - Arrife, com expressiva sedimentação do Jurássico Superior e Cretácico Inferior, até a Falha da Arrábida, a sul) (Kullberg et al., 2006).

O bordo norte da Bacia Lusitânica foi raramente inundado durante o Mesozóico, sendo predominantemente constituída por sedimentos detríticos continentais que refletem curtos períodos de transgressão marinha Mesozóicas (Sena, 2007).

A Lagoa da Pateira de Fermentelos tem a sua génese associada à Bacia do Rio Vouga, Cenozóica, que assenta sobre os sedimentos Mesozóicos do setor Setentrional da Bacia Lusitânica. Segundo Barbosa (1981) in Sena (2007), o Baixo Vouga é caracterizado por extensas planícies aluviais e areias marinhas e eólicas do

Quaternário. Com a regressão gradual quaternária, o rebaixamento do nível de base do Rio Vouga conduziu ao encaixe da rede hidrográfica e consequente erosão dos terraços e exposição dos sedimentos Mesozóicos.

Dinis (2006) aponta que a Lagoa de Fermentelos se originou no Pliocénico, num sistema fluvial deprimido, que a partir do Holocénico, tem sua evolução associada à formação da Ria de Aveiro. Neste período, a ria era um sistema laguna-ilha barreira, e o local onde hoje é a Pateira de Fermentelos era um golfo no qual confluíam as águas dos rios Vouga, Águeda e Cértima. A redução da influência marinha bem como o progressivo assoreamento da laguna culminou no isolamento progressivo da Lagoa de Fermentelos. Portanto, a lagoa pode ser considerada um dos braços da ria de Aveiro que se estendia para o interior. A tectónica da bacia conduziu a um basculamento para SW, que juntamente com a sedimentação controlada pelas variações do nível do mar e o aporte fluvial, resultando na conformação dos atuais limites da lagoa.

O material coletado para a confeção dos adobes consiste nos depósitos atuais nos bordos da lagoa, sendo constituído por sedimentos argilo-siltosos castanho avermelhados.

4.1.2. Areias da Quinta do Areal, Esgueira

Esgueira é uma freguesia de Aveiro, tradicional por fornecer areia e adobes para as construções de aldeias e vilas.

Segundo a Carta Geológica de Portugal⁴ (1:500.000), Esgueira situa-se sobre as coberturas Cenozóicas. De acordo com Teixeira e Zbyszewski (1976) in Benta (2007), encontram-se inseridos na Unidade Plio-pleistocénica, na qual ocorrem de forma mais extensa os Depósitos de Praias Antigas e, de forma mais restrita, os Depósitos de Terraços Fluviais.

Os Depósitos de Praias Antigas são constituídos por areias finas ou grosseiras e cascalheiras de cores claras, contendo calhaus rolados, dispostos em leitos que podem atingir espessura significativa. De acordo com Benta (2007), estes depósitos são explorados como materiais de construção, sob a forma de agregados e base granulares para fins rodoviários, com destaque para seu uso nos tradicionais adobes da região.

De acordo com informações da Junta de Freguesia de Esgueira, desde meados do século XIX até meados do século XX, os areais da região, como os da Quinta do Areal, juntamente com os próprios adobes confeccionados na zona, eram transportados

⁴ LNEG geoportal, disponível em <http://geoportal.lneg.pt/> acesso em 02/10/2018.

em carros de bois até à Ribeirinha de Esgueira, a partir de onde seguiam por toda a zona ribeirinha, de Mira até Ovar.⁵

Atualmente, a Quinta do Areal funciona como um haras, entretanto mantém as construções em adobe, bem como os moldes utilizados na confeção dos mesmos. Neste local, ocorrem visitas e oficinas de confeção de adobes promovidas pela Associação Centro da Terra⁶.

4.1.3. Caulinos de Ovar

O depósito de caulino de São Vicente Pereira Jusã ocorre no concelho de Ovar. Estes caulinos encontram-se inseridos no contexto tectono-estrutural da faixa metamórfica Espinho-Abergaria-a-Velha. Do ponto de vista geológico regional, faixa metamórfica supracitada é descrita como setor da faixa de cisalhamento denominada genericamente de Porto-Tomar, de direção geral NNW–SSE, que se estende desde os arredores do Porto até Tomar. Esta faixa engloba unidades tectonoestratigráficas, de idade Proterozóica média-superior a Paleozóica média-superior, constituindo a Zona de Ossa-Morena (ZOM) do Terreno Autóctone Ibérico inserido na Cadeia Varisca Ibérica. A faixa de cisalhamento de Porto–Tomar contacta a oriente com a Zona Centro Ibérica (ZCI). O setor Espinho-Abergaria-a-Velha compreende unidades parautóctones e autóctones da ZOM, bem como duas unidades alóctones (Chamiñe, Gama Pereira, Fonseca, Noronha, & de Sousa Lemos, 2003).

Segundo Rocha (1993), a área situada entre o Sul de Espinho e Aveiro é relativamente aplanada, sendo composta por aluviões atuais, areias de duna e de praia, integrando a Bacia Sedimentar de Aveiro. Em diversas localidades afloram rochas granitóides e filonianas, sendo estes registos dos eventos tectono-magmáticos ante e sin variscos, e também de eventos posteriores (Chamiñe et al., 2003; Coelho, Chamiñe, Gomes, Fonseca, & Rocha, 2009).

Os depósitos de caulino de Ovar são descritos na literatura desde 1914, no trabalho de Souza Brandão (1914), sendo concessão da empresa Vista Alegre, para fabrico de porcelana (Coelho et al., 2009).

Diversos estudos sobre a génese e alterações do depósito de caulino de S. Vicente de Pereira Jusã, a exemplo dos trabalhos de Gomes (1990), Miranda et al. (1998) Bobos et al., (2001). Os autores concluíram que houve contribuição de fluídos hidrotermais de

⁵ Disponível em <http://www.jf-esgueira.pt/site/index.php/a-freguesia/lugares-e-patrimonio/areais>, acesso em 20/09/2018.

⁶ Disponível em <http://www.centrodatterra.org/pt/actividades/oficinas/index.html>, acesso em 24/10/2018.

origem metamórfica, associadas à zona de cisalhamento dúctil, no processo de alteração, que se deu em dois períodos. Um primeiro hidrotermal, caracterizado por uma alteração do tipo greisen (quartzo+moscovite e quartzo+turmalina), em um processo sin- a pós-fase D2 varisca. O segundo período foi caracterizado como supergénico, sobreimposto a uma alteração pós-greisenização e expresso pela associação caulinite ± illite, com uma transição da caulinite até haloisite-7Å (Coelho et al., 2009).

O depósito de São Vicente Pereira Jusã pertence ao Grupo de S. Vicente de Pereira Jusã, o qual inclui os depósitos de São Martinho da Gândara e do Outeiro. O depósito de caulino é estimado em uma área de 11Km², sendo que esta área aplanada se encontra coberta maioritariamente por aluviões e depósitos fluviais Plio-pleistocénicos arenoconglomeráticos (Coelho et al., 2009).

De acordo com Coelho et al. (2009), a exploração dos caulinos de S. Vicente de Pereira Jusã localiza-se no topo de uma extensa plataforma aplanada, entre as cotas de 100 a 150m. Esta superfície encontra-se no último patamar de contato da plataforma litoral com o Relevo Marginal definido por Araújo (1991) in Coelho et al. (2009) como o substrato altamente metamorizado, composto por micaxistos, gnaisses e migmatitos, estando incluídas na Unidade de Lourosa.

Segundo Ribeiro (1995) in Velho, Miranda, & Cerdeira (2016), no bordo NW da ZOM, ocorrem no domínio autóctone três unidades, a saber: Unidade de Lourosa, Unidade de Espinho e Unidade de Arada. Na Unidade de Lourosa, especificamente no migmatito, ocorre o depósito de caulino de São Vicente de Pereira Jusã.

De acordo com Chaminé et al. (2003), o membro inferior da Unidade de Lourosa é constituído por migmatitos, nos quais se constata a presença de corpos lenticulares com orientação NW-SE de ortognaisses biotíticos e gnaisses granitóides. Já o membro superior é composto por rochas metassedimentares, a saber micaxistos biotíticos, por vezes com granadas, intrudidas por gnaisses granitóides. Estas intrusões apresentam forma lenticular, estando muitas vezes migmatizadas, e apresentam um alinhamento NW-SE. As intrusões são descritas na literatura como granitos de grão médio a grosseiro, com intrusões de naturezas feldspáticas, quartzosas e pegmatíticas, e com uma certa tendência para constituírem granitóides gnáissicos. Observa-se que a caulinação segue um alinhamento NE-SW, coincidente com a orientação da família de fracturas mais comum na região, que permite a circulação de fluidos e consequentemente, facilita o processo de caulinação.

Coelho et al. (2009) descrevem uma intensa rede de fracturas que contribui significativamente para a alta taxa de circulação de fluidos hidrotermais e meteóricos. Ocorrem filões de quartzo (greisen) e pegmatíticos e, junto destas lineações, é que ocorre o processo de alteração da rocha migmatítica, originando o caulino ali explorado, como se pode verificar na Figura 9.



Figura 9: Aspecto filoniano do depósito de S. Vicente de Pereira Jusã (extraído de Coelho, 2006).

4.1.4. Metacaulino

O metacaulino (MK) é produzido a partir do caulino oriundo de depósitos de elevada pureza a partir da reação de calcinação, usualmente entre 650 e 800 °C. Na calcinação, ao aquecer a matéria-prima, o argilomineral caulinite sofre desoxidação, que conduz a uma quebra parcial ou total da estrutura cristalina. Esta fase transicional amorfa apresenta alta reatividade.

No que se refere à temperatura, Sabir (2001) indica que temperaturas inferiores a 700°C, a reatividade do metacaulino produzido é menor. Quando submetido a temperaturas superiores a 850°C observa-se queda na reatividade por recristalização. Atualmente, como alternativa, já há produção de pozolanas a partir da calcinação de depósitos de baixo grau, a exemplo de argilas cauliníticas e solos lateríticos (Almenares et al., 2017; Sabir, 2001)

O metacaulino é utilizado como material pozolânico na confecção de cimento, uma vez que é fonte de sílica reativa que, ao reagir com o hidróxido de cálcio na presença de água, dá origem aos silicatos de cálcio hidratados. O uso de metacaulinos confere aos cimentos e argamassas maior resistência mecânica e durabilidade, além de uma redução na emissão de CO₂ ao longo do processo de confecção, pois exige temperaturas menores (Sabir, 2001).

O metacaulino utilizado na confecção dos provetes foi o ARGICAL-M 1200S que é obtido por micronização e calcinação de uma argila caulínica da bacia Charentes (França). ARGICAL-M 1200S é um silicato de alumínio desidroxilado, a sua fórmula geral é Al₂O₃.2SiO₂. É um material amorfo não cristalizado, constituído de partículas lamelares. Quimicamente, é constituído por: SiO₂: 55 %, Fe₂O₃: 1,8 %, Al₂O₃: 39 %, TiO₂ : 1,5 %, K₂O + Na₂O : 1,0 % CaO + MgO : 0,6 % (AGS Mineraux, 2008).

4.1.5. Solução Alcalina

De acordo com os trabalhos de Elert et al. (2015) que faz uso de soluções alcalinas a 5M e de Huseien et al. (2018) utiliza soluções alcalinas a 6M preparadas com 24 horas de antecedência para ativação alcalina em argamassas. Azevedo, Strecker, & Lombardi (2018) utilizam NaOH a 8M para produzir geopolímeros a partir de metacaulinos. Desta forma, optou-se por executar a ativação alcalina a 6 M, tanto para o hidróxido de sódio como para o hidróxido de potássio.

4.2. Metodologia

4.2.1. Formulação dos Adobes

Para a execução do presente trabalho, determinou-se à priori 4 formulações básicas para os adobes, nomeadamente os grupos 1,2, 3 e 4 (Quadro 3). Em todos os grupos foram executadas três formulações, sendo uma com água e outras duas ativadas alcalinamente. Estabeleceu-se utilizar a princípio 1 Kg de água para a formulação de água, 1 Kg de NaOH 6M para a ativação sódica e 1Kg de KOH 6M para a ativação potássica. Porém, no decorrer do preparo das misturas, foram necessários alguns ajustes quantitativos para permitir a moldagem e desmoldagem dos adobes.

Os adobes dos grupos 1 e 4 apresentam as componentes de terra tradicionalmente encontradas nos adobes da zona de Aveiro, enquanto as formulações dos grupos 2 e 3 levam a areia do areal juntamente com componentes argilosas derivadas de depósitos de caulino, no caso dos caulinos de Ovar e o metacaulino comercial, com o intuito de comparar a performance da componente argilosa nas diferentes formulações aqui apresentadas.

Inicialmente, preparou-se a parte sólida dos adobes em sacos plásticos transparentes. Os materiais foram pesados ou estimados volumetricamente, sendo ensacados e misturados por agitação manual, conforme Figura 10.

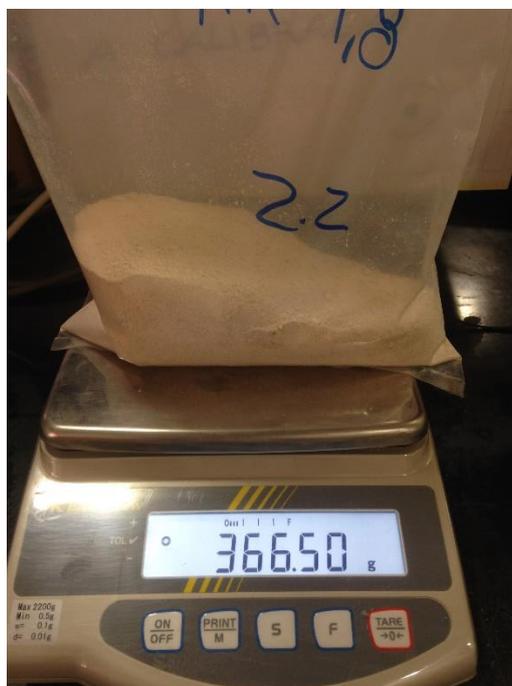


Figura 10: Pesagem do material seco para as formulações.

Posteriormente, foram despejados em recipientes plásticos de 5 litros e adicionou-se a parte líquida, o reagente (água desionizada ou estabilizante) gradativamente aos secos, com o auxílio de um agitador mecânico e uma espátula.

A formulação do Grupo 1 contém apenas a lama da Pateira de Fermentelos (LP) com adição de fibras vegetais (palha) em proporção 6:1 (Rotondaro, 2011). A proporção foi determinada visualmente com o auxílio de uma régua, com o ensacamento da lama, como é possível verificar na Figura 11.



Figura 11: Formulação 1.1 na proporção 6:1.

O grupo 2 das formulações contém areia do areal (AA) e metacaulino comercial (MK) em duas proporções, a saber: 80% AA e 20%MK (Formulação 2.1) e 60% AA e 40% MK (Formulação 2.2).

O grupo 3 apresenta AA e o caulino (K) também em duas proporções: 80% de AA e 20% de K na Formulação 3.1 e 60% de AA e 40% de K na Formulação 3.2.

O grupo 4 por sua vez é composto por 4 formulações distintas, a saber: a formulação 4.1, composta por AA (80%), LP (10%) e MK (10%); a formulação 4.2 por AA (80%), LP (10%) e K (10%); a formulação 4.3 por AA (60%), LP (20%) e MK (20%) e a formulação 4.4 por AA (60%), LP (20%) e K (20%).

O Quadro 3 sintetiza as formulações executadas, bem como os pormenores quantitativos utilizados na confeção dos adobes.

Quadro 3: Resumo das formulações dos adobes com as quantidades de material e reagentes utilizados

		Materiais	Quantidade de material por formulação	Soluções (33% volume)	Quantidade de reagente por formulação de 3 Kg
Lama da Pateira	1.1	Lama	3 kg de lama	H ₂ O	1.280 g
		Adição de fibras 10%		NaOH(6M)	1000 g
				KOH (6M)	1000 g
Areia + Metacaulino	2.1	Areia	2,400 Kg	H ₂ O	1000 g
		Metacaulino Comercial 20%	0,600 Kg	NaOH(6M)	1000 g
				KOH (6M)	1000 g
	2.2	Areia	1,800 Kg	H ₂ O	1000 g
		Metacaulino Comercial 40%	1,200Kg	NaOH(6M)	1500 g
				KOH (6M)	1750 g
Areia + Caulino	3.1	Areia	2,400 Kg	H ₂ O	1000 g
		Caulino 20%	0,600 Kg	NaOH(6M)	764,24 g
				KOH (6M)	673,08 g
	3.2	Areia	1,800 Kg	H ₂ O	1000 g
		Caulino 40%	1,200Kg	NaOH(6M)	1000 g
				KOH (6M)	1000 g
Mistura	4.1	Areia	2,400 Kg	H ₂ O	1000 g
		Lama (10%)	0,300 Kg	NaOH(6M)	1000 g
		Metacaulino (10%)	0,300 Kg	KOH (6M)	1000 g
	4.2	Areia	2,400 Kg	H ₂ O	794 Kg
		Lama (10%)	0,300 Kg	NaOH(6M)	1000 g
		Caulino (10%)	0,300 Kg	KOH (6M)	1000g
	4.3	Areia	1,800 Kg	H ₂ O	1250 g
		Lama (20%)	0,600 Kg	NaOH(6M)	1150 g
		Metacaulino (20%)	0,600 Kg	KOH (6M)	1218,4 g
	4.4	Areia	1,800 Kg	H ₂ O	1000 g
		Lama (20%)	0,600 Kg	NaOH(6M)	1,087 g
		Caulino (20%)	0,600 Kg	KOH (6M)	1000 g

4.2.2. Manufatura dos provetes de adobe

No Laboratório de Materiais do Departamento de Geociências da Universidade de Aveiro desenvolveu-se a manufatura dos corpos de prova dos adobes. Para tal, foi encomendado um molde de adobe feito em madeira, para que as dimensões dos corpos de prova fossem de 0,04 m X 0,04 m x 0,04 m. Apesar dos adobes apresentarem tradicionalmente dimensões em forma de paralelogramas, as dimensões cúbicas e reduzidas dos adobes foram escolhidas de forma a permitir a realização dos ensaios pretendidos, nomeadamente resistência mecânica e absorção de água por capilaridade, bem como facilitar a replicabilidade do número elevado de adobes pretendidos para este estudo.

Assim sendo, os adobes foram confeccionados em moldes de madeira sem fundo, os quais permitiam executar até 40 cubos de adobe, por formulação preparada. Os moldes foram posicionados sobre as bancadas do laboratório, previamente revestidas por plástico e untadas com parafina (glicerol) para evitar a aderência do material nas paredes do molde de madeira, como demonstra a Figura 12.

Após a mistura dos componentes secos em sacos plásticos, as soluções alcalinas foram adicionadas em béqueres, de plásticos com capacidade para 5 litros, com o auxílio de um agitador mecânico e uma espátula. Após a completa homogeneização da mistura, esta foi despejada nos moldes de madeira, sem compactação. O molde de

madeira foi removido, dependendo das formulações, 2 a 3 dias após a confecção, como se pode verificar na Figura 13.



Figura 12: Preparação da bancada para a confecção das formulações de adobe em laboratório.



Figura 13: Moldagem dos adobes e remoção da forma.

4.3. Ensaio de Caracterização

Neste capítulo são descritos os procedimentos laboratoriais utilizados na caracterização do material. A matéria-prima dos adobes foi caracterizada textural, química, mineralogicamente e com quantificação da matéria orgânica. Já os adobes foram submetidos também aos ensaios de resistência mecânica, absorção de água por capilaridade e analisados no SEM.

4.3.1. Caracterização Textural

O material utilizado na confecção dos adobes foi caracterizado texturalmente por peneiramento por via seca. O peneiramento a seco é realizado com a série de peneiros que segue a normativa do LNEC E196-66 para análise de amostras de solo para a construção da curva granulométrica. O peneiramento por via húmida é utilizado para separar a fração <63 µm das amostras.

4.3.2. Caracterização Mineralógica e Química | Difração de Raio X (DRX) e Fluorescência de Raio X (FRX)

Os estudos mineralógicos e químicos da matéria-prima dos adobes foram realizados nas frações <63 µm (fina) por Difração de Raios X (XRD) e fluorescência de raio-X (XRF), bem como na amostra total. Os adobes também foram submetidos à caracterização mineralógica e química após secagem em estufa com temperatura máxima de 50°C e moagem no moinho de argolas.

4.3.2.1. DRX | Agregados não orientados

A Difração de Raio-X consiste em caracterizar os arranjos cristalinos das argilas através a emissão de feixes de luz (Lei de Bragg). As medições de DRX serão realizadas no equipamento Philips PW 3050 e X 'Pert PW 3040/60 com radiação Cu K α . As varreduras são realizadas entre 2 ° e 60 ° (pó não orientado). Neste método, a partir da variação da incidência dos feixes de luz, obtêm-se diagramas que refletem os planos reticulares dos cristais, sendo, por isso, possível caracterizar cada mineral.

Para a análise da fração inferior a 0,063 mm, cerca de 1g de amostra foi previamente desagregada, e colocada no porta-amostras standard de alumínio, de base móvel, do difractor de Raios-X, comprimindo levemente o pó, de modo a não ser conferida uma orientação preferencial aos cristais.

4.3.2.2. DRX | Agregados orientados

Para verificar os minerais argilosos presentes nas amostras foi executada a confecção das lâminas com agregados orientados. Selecionou-se cerca de 1g de amostra da LP, MK e K em 50ml de água. Foram adicionadas 6 gotas do desfloculante hexametáfosfato de sódio a 1% a cada amostra, para promover a dispersão de partículas. As amostras foram levadas ao ultrassons por 1 minuto, a uma amplitude de 60. Pela Lei de Stokes, após o repouso, a amostra separa por sedimentação a fração superior a 2 micrómetros da inferior que permanece em suspensão. Com o auxílio de uma pipeta, a amostra em suspensão foi colocada sobre a lâmina de vidro, de modo a

recobri-la por completo e orientar os agregados. Após a secagem, a amostra é levada a análise por DRX ao natural, com glicerol e aquecida aos 500°C na mufla.

4.3.2.3. FRX

A composição química das amostras é avaliada através da espectrometria de fluorescência de raios-X (FRX) usando um XRF Panalytical AXIOS PW4400 / 40. A Perda-ao-Rubro (LOI) é obtida aquecendo 1 g da amostra a 1.000°C durante 1 h no forno.

A FRX é um método analítico não destrutivo que determina a composição química multi-elementar nos materiais. Permite detectar concentrações até poucas partes por milhão (ppm), sendo destinada a elementos maiores, menores e traço de elementos com número atômico maior que 9 (Gomes, 1998 in Terroso 2005). Os materiais podem ser analisados no estado maciço, líquido, em pó (pastilhas prensadas ou pérolas fundidas) ou outras formas. A FRX não é um método analítico absoluto, sendo a concentração de um elemento determinada a partir da comparação com a radiação emitida pelo mesmo elemento, em concentrações conhecidas, numa amostra padrão. Desta forma, são obtidas as curvas de calibração no método do padrão interno. O equipamento Panalytical analisa as amostras em pastilhas prensadas ou fundidas, dependendo do material que se pretende analisar (Terroso, 2005).

O procedimento experimental para a execução da pastilha prensada consiste em pesar cerca 10,0g de amostra previamente moída (fração inferior a 50 micrometros), adiciona-se o aglutinante Moviol a 2%, sendo devidamente homogeneizados com o auxílio de uma vareta de vidro. O pó é colocado no molde standard da prensa em ambas as faces da pastilha, sendo submetida a uma compressão de até 15 toneladas de força durante 30 segundos, com a pressão retirada gradativamente através da abertura lenta da válvula da prensa.

4.3.3. Quantificação da Matéria Orgânica

A determinação do conteúdo em matéria orgânica presente na amostra da Lama da Pateira foi determinada a partir de duas metodologias, por perda ao rubro e por reação com peróxido de hidrogénio (H₂O₂).

A importância da determinação do conteúdo de matéria orgânica nas amostras reside nas substâncias húmicas (SHs), as quais perfazem a maior parte do conteúdo da matéria orgânica. As SHs são compostos de elevado peso molecular, sintetizados a partir de reações bióticas e abióticas no solo. São constituídas por três frações, a saber a humina (insolúvel em alcalis e ácido), ácidos húmicos e ácidos fúlvicos. Se

diferenciam dos demais biopolímeros presentes no solo devido às suas estruturas mais complexas e à longa persistência (Stevenson, 1994 in Ebeling, Anjos, Pereira, Valladares, & Pérez, 2013).

De acordo com (Pérez, Rigo, & Marques, 2015) os húmus são os colóides orgânicos que conferem cargas negativas ao solo através da dissociação dos radicais COOH e OH, contribuindo para a capacidade de troca catiónica. Assim sendo, os húmus têm a capacidade de se ligar aos cátions metálicos como complexos, estejam estes adsorvidos nas argilas ou livres. A quantificação do conteúdo de matéria orgânica auxilia na compreensão das trocas e reações químicas que o material a ser analisado pode apresentar nas formulações.

A determinação da matéria orgânica por perda ao rubro (PR%) foi realizada de acordo com o protocolo do Laboratório de Materiais do Departamento de Geociências da Universidade de Aveiro. Este método baseia-se em determinar por diferença de peso após a combustão. Durante o ensaio, a calcinação leva a perda da matéria orgânica, da água intersticial, de carbonatos e elementos voláteis. Pesa-se 5g de amostra seca em uma balança de precisão e coloca-a secar em uma estufa a 120°C por 24 horas, removendo assim a água. Retira-se a amostra da estufa e coloca no exsiccador até atingir a temperatura ambiente, pesando-a novamente (P1). A amostra é então introduzida em uma mufla com temperatura a 500°C durante 4 horas. Ao fim das 4 horas, retira-se a amostra e coloca-se no exsiccador até atingir a temperatura ambiente, pesando-a novamente (P2). Assim sendo, obtém-se a Perda ao Rubro (%) através da diferença de peso antes e após a combustão, de acordo com a Equação 1:

Equação 1: Conteúdo total de Matéria Orgânica (MO).

$$PR(\%) = \frac{P1 - P2}{P1} * 100$$

A quantificação de matéria orgânica na amostra foi também realizada através da reação de oxidação com adição de peróxido de hidrogénio (H₂O₂) de acordo com (Mikutta, Kleber, Kaiser, & Jahn, 2005). Pesou-se 5g de amostra seca em um copo de 250ml (P1 = peso do copo + amostra) e adicionou-se o peróxido de hidrogénio até cobrir toda a amostra. Na hotte, em uma placa de aquecimento a 50°C e em agitação constante, observou-se a reação de oxidação pela efervescência, como é possível verificar na Figura 14. Ao longo do processo, adicionou-se H₂O₂, mantendo o aquecimento e agitação até que não se observasse mais efervescência ou pela perda de coloração da amostra de solo, ambos indicadores do fim da reação. Por fim, retira-se o copo com a amostra e coloca-se na estufa a 50°C para amostra secar. Quando seca, pesa-se novamente (P2), obtendo-se pela diferença de peso (tal como descrito

na Equação 1) a quantidade de matéria orgânica oxidada na reação, equivalente a quantidade de matéria orgânica na amostra.



Figura 14: Ensaio de determinação de matéria orgânica com peróxido de hidrogénio.

4.3.4. Caracterização Mecânica

Os corpos de prova com dimensões de $0,04 \times 0,04 \times 0,04 \text{ m}^3$ foram submetidas a testes de resistência à compressão simples, com célula de carga de 50N/s. Utilizou-se o equipamento universal de ensaios mecânicos de compressão (Shimadzu Autograph AG 25 TA) do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro, de acordo com a norma NP EN 12390-1 (2010). Neste ensaio, os corpos de prova são submetidos à compressão uniaxial, medindo-se a força máxima, tensão máxima por área alcançada e a força e o tempo de ruptura dos corpos de prova. A média dos resultados do ensaio de três provetes, em N/mm^2 ou MPa, é considerada a resistência mecânica da formulação.

4.3.5. Caracterização Microestrutural

A caracterização microestrutural dos materiais foi executada no Microscópio electrónico de varrimento com dispersão em energia (SEM/EDS) no aparelho Hitachi S4100, equipamento que pertence ao Departamento de Engenharia de Materiais e Cerâmica da Universidade de Aveiro.

A técnica do SEM consiste em obter imagens da matéria em escala nanométrica. Trata-se de uma técnica aplicada a materiais espessos e não transparentes a eletrões. Apresenta alta resolução (da ordem de 3 nanómetros) e grande profundidade de foco, resultando em imagens tridimensionais (Jorge Junior & Botta Filho, 2012).

Os fragmentos das formulações de adobes foram previamente preparados com deposição de carbono. No equipamento, o porta amostras é submetido a vácuo por meio da evaporação e por condução de corrente elétrica de uma fibra de carbono.

O SEM consiste em um equipamento ótico eletrônico constituído por uma coluna ótica, um sistema de vácuo e controle eletrônico e um sistema de imagens, construídas ponto a ponto. Esta metodologia de análise consiste na emissão de feixes de elétrons em um ponto da amostra através do cátodo, no caso um filamento capilar de tungstênio, mediante a aplicação de uma diferença de potencial. Esta emissão de elétrons na amostra leva a um grande espalhamento de energia, que por sua vez é coletada para fornecer um sinal elétrico. Este sinal elétrico por sua vez modula a intensidade de elétrons dentro de um tubo de raios catódicos (TRC). O feixe de elétrons no TRC é acelerado por um ânodo, que consiste de uma placa aterrada com um orifício no centro, o qual permite a passagem do feixe de elétrons. As bobinas de deflexão permitem que a varredura do feixe de elétrons sobre a amostra em sincronia com a varredura da tela do tubo de raios catódicos, de forma que a cada ponto da tela corresponda a um ponto da superfície da amostra. A interação entre o feixe de elétrons e as amostras leva à formação da imagem por elétrons retroespalhados e secundários (Jorge Junior & Botta Filho, 2012).

A depender da informação que se deseja obter com o SEM, opera-se o equipamento de forma diferente, de forma a alterar o ângulo de convergência e a intensidade da corrente. O ângulo de convergência determina a profundidade do campo, de forma a dar foco em todas as irregularidades da superfície. Já a energia do feixe de elétrons pode estar no intervalo entre 300 Volts (V) a 30 quilo volts (kV) (20 kV) e a corrente do feixe entre 1pico-ampere e 1micro-ampere, sendo que estes valores podem ser ajustados para melhor se adequarem ao tipo de amostra, tipo de análise, e análise acoplada a exemplo do EDS (Jorge Junior & Botta Filho, 2012).

A espectroscopia por dispersão de energia (EDS) é uma técnica analítica aplicada juntamente com o SEM. Esta técnica se baseia na correlação da quantificação da energia de um fóton com a constante de Plank (h) e a frequência da radiação (ν), expressa pela Equação 2. A equação de Moseley por sua vez correlaciona a frequência da radiação (ν) com o número atômico de cada elemento (Z), subtraído de uma constante adimensional C que varia entre 1 e 2 consoante o número de camadas do elemento químico (Equação 3)⁷. A correlação entre estas equações permite a identificação de um elemento químico a partir da energia emitida pelo fóton, como

⁷ <https://portal.if.usp.br/labdid/sites/portal.if.usp.br/labdid/files/Raios-X2%20%281%29.pdf>

demonstra a Equação de Moseley em termos de energia (Equação 4) (Jorge Junior & Botta Filho, 2012)

Equação 2: Equação da Energia do fóton

$$E = v * h$$

Equação 3: Equação de Moseley

$$\sqrt{\frac{\lambda}{f}} = \sqrt{v} = (z - c)$$

Equação 4: Equação de Moseley em termos de energia do fóton

$$\sqrt{E / h} = z - c$$

Os fótons correspondentes ao espectro de comprimento de ondas da ordem dos raios-X atingem o detector de EDS simultaneamente. A conversão de raios-X em carga se dá no cristal do detector, feitos de silício (Si-Li) ou de germânio), que é subsequentemente registado como pulsos de tensão. Estes pulsos são direcionados ao pré-amplificador, cuja função é aumentar o sinal para que este possa alcançar um nível aceitável para o processador do pulso. O processador de pulso tem como função medir a energia dos raio-X em forma de tensão, de forma a transformar a entrada de energia em um número digital, que será utilizado para contagem no processador multicanal (que apresenta cerca de mil canais que armazenam faixas de voltagens), além de remover os ruídos. O resultado é a curva característica correspondente a um elemento químico específico, caracterizando juntamente com a imagem a composição química naquele ponto que recebeu o feixe (Jorge Junior & Botta Filho, 2012).

4.3.6. Absorção de água por capilaridade

O ensaio de absorção de água consiste em selecionar três provetes, com seção basal mais homogênea possível, e submetê-los a interação com água. Em tabuleiros, os corpos de prova são colocados sobre esponjas absorventes que permitam a passagem da água e que evitem o contato direto com o substrato, de forma que se mantém a absorção de água por capilaridade pelo corpo de prova a partir da sua base, como é possível verificar na Figura 15. Após aferir o peso inicial de cada corpo de prova, adiciona-se água destilada no tabuleiro até cobrir 1mm da parede lateral dos provetes. Tomam-se medidas do peso minuto a minuto até os primeiros 15 minutos do ensaio. Após os 15 minutos iniciais, mede-se de 5 em 5 minutos. O ensaio chega ao fim quando o peso do corpo de prova se estabiliza, sendo descartados os pesos quando há intensa perda de material.

Tratamento dos resultados

Com a média do ganho de peso dos três provetes em função do tempo, é possível identificar o comportamento do material ao absorver a água por capilaridade através da base e eventuais perdas de material ao interagir com a água. Através das curvas de ganho de massa em função do tempo, obtém-se o coeficiente de ganho de massa (CG), expresso em g/min, que corresponde ao declive do primeiro troço linear destas curvas.

A seguir, calculou-se o Valor Assintótico (VA) para cada formulação. O VA é expresso em Kg/m² e corresponde ao ganho de massa por unidade de área, sendo obtido através do cálculo da quantidade de água absorvida entre o início até à conclusão do ensaio. Por comparação deste parâmetro entre blocos é possível conhecer o bloco que apresenta maior ganho de massa.

O coeficiente de absorção de água por capilaridade é obtido a partir da variação da massa do provete durante o processo de absorção em função da área da base do provete e da raiz quadrada do tempo. A partir dos valores médios de massa, obtém-se a curva de absorção capilar em Kg/m² * h^{1/2}, a qual expressa a quantidade de água absorvida por unidade de área, em função da raiz quadrada do tempo. O declive do primeiro troço linear corresponde ao coeficiente de absorção capilar ou coeficiente de capilaridade (C).

Por fim, calculou-se o Valor Absorvido em percentagem, que corresponde ao ganho de peso em relação ao peso inicial dos provetes, indicando as formulações que apresentam maior capacidade de ganhar massa ao interagir com a água, a partir da equação:

$$VAbs (\%) = \frac{(Mf - Mi)}{Mi} * 100$$



Figura 15: Ensaio de absorção de água por capilaridade.

5. Resultados

5.1. Caracterização da Matéria-Prima

5.1.1. Difração de Raio-X | Análise Mineralógica

5.1.1.1. Agregados não orientados

A Figura 16 apresenta os difratogramas da Areia da Quinta do Areal (AA), verificando-se a presença maioritária de quartzo, e em menores quantidades feldspato potássico, tanto na fração total (16a) como na inferior a 63 micra (16b). A Figura 17 representa o difratograma do metacaulino (MK), no qual é possível observar a presença de material amorfo entre os valores de 2θ de 18° a 38° , e a presença de filossilicatos e quartzo como minerais principais, em quantidades menores anatase. A Figura 18 apresenta o difratograma do caulino (K) onde verifica que os minerais principais nesta amostra são o quartzo, seguido dos filossilicatos, e em menores quantidades feldspatos potássicos, anatase. Por sua vez, o difratograma da Lama da Pateira (LP) (Figura 22), apresenta quartzo, feldspatos, filossilicatos e anidrite.

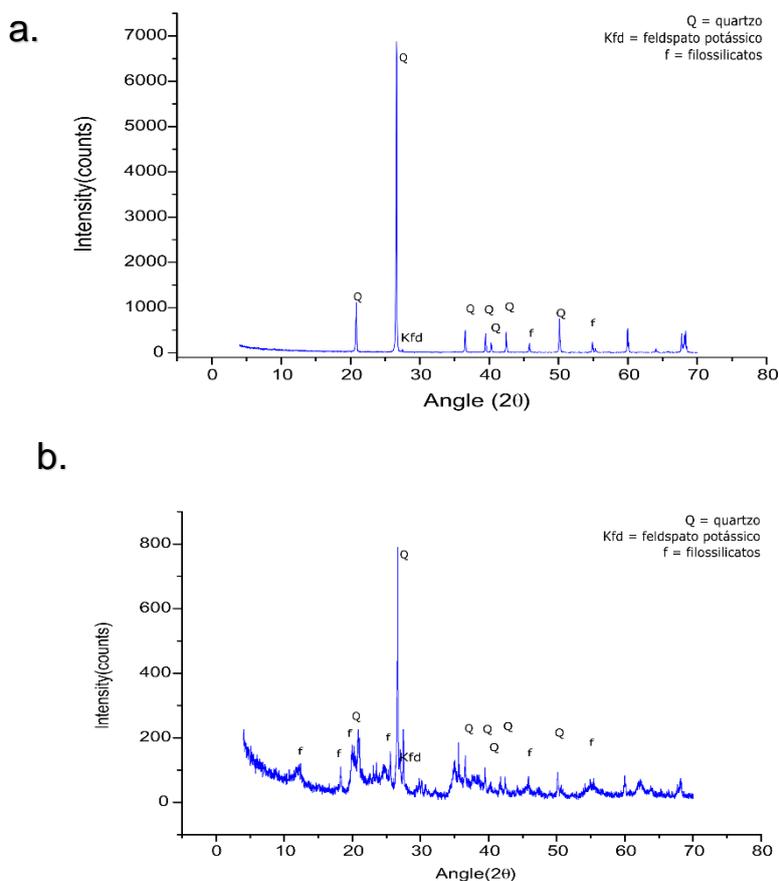


Figura 16 Difratogramas da Areia do Areal (AA) total (a) e fração inferior a 63 micra (b).

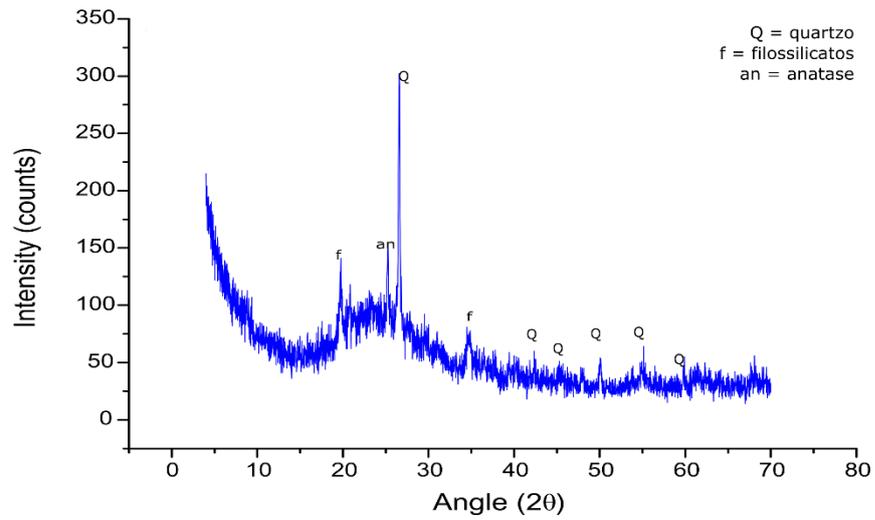


Figura 17: Difratograma do metacaulino (MK).

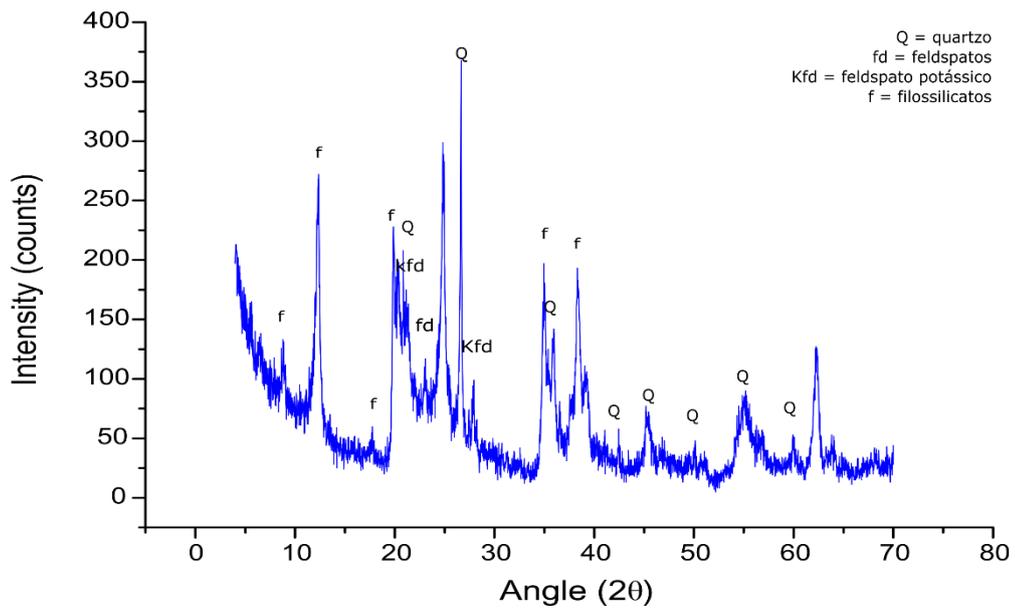


Figura 18: Difratograma do caulino (K).

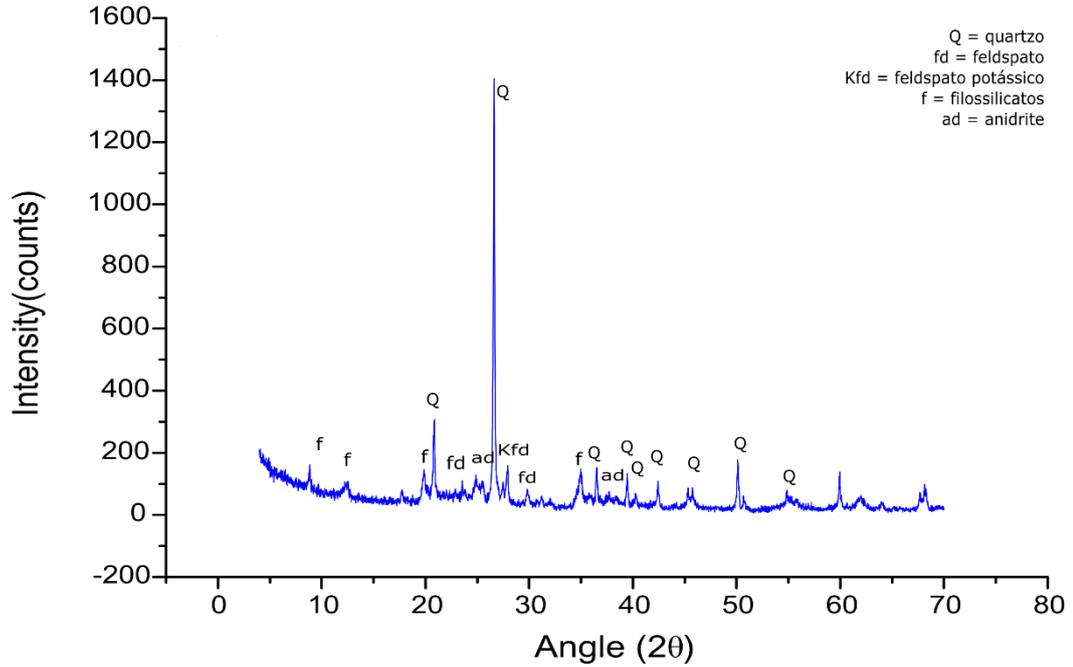


Figura 19: Difratoograma da Lama da Pateira (LP).

5.1.1.2. Agregados orientados

As amostras de metacaulino (Figura 20), caulino (Figura 21) e lama da pateira (Figura 22) foram submetidas a análise dos agregados orientados na DRX. Os resultados confirmam a presença de ilite e caulinite como filossilicatos presentes em todas as amostras. Na amostra de metacaulino, o pico da caulinite aos 2θ de 12° é menos evidente devido ao caráter amorfo desta matéria-prima, o que não ocorre nas amostras do caulino e da lama da Pateira.

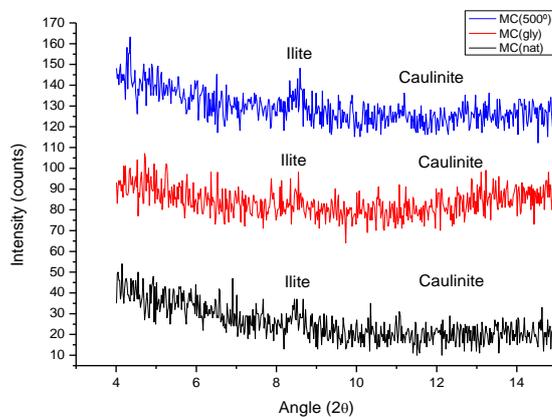


Figura 20: DRX dos agregados orientados do metacaulino (MK).

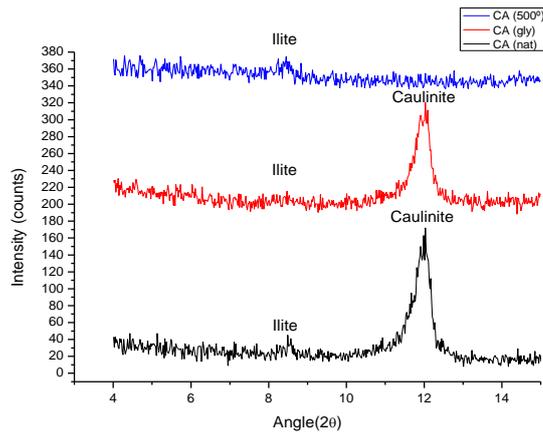


Figura 21: DRX dos agregados orientados do caulino (K).

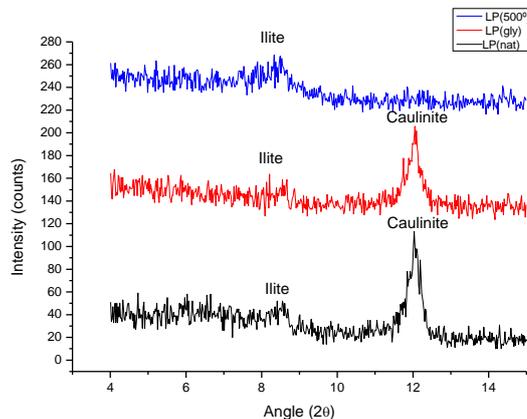


Figura 22: DRX dos agregados orientados da Lama da Pateira.

5.1.2. Fluorescência de Raio-X | Análise Química

A análise química dos elementos maiores das matérias-primas dos adobes (Tabela 1) indica que o caulino (K) é composto por óxidos de alumínio e silício, com 35,8% e 48,2%, respectivamente, bem como possui alta perda ao rubro (11,78%), perfazendo 95% da amostra. O metacaulino (MK) é composto majoritariamente por óxidos de sílica e alumínio (91%). A Areia do Areal (AA total) apresenta 8,6% de óxido de alumínio e 87,17% de óxido de sílica, totalizando 95% da amostra, com apenas 1,6% de LOI, como seria esperado de uma areia quase pura. Ao analisar a fração inferior a 63 micra observa-se um aumento na perda ao fogo (12,85%) e um aumento na percentagem de Al_2O_3 e Fe_2O_3 , que se encontram associados aos minerais e materiais inferiores a 63 micra, o oposto do observado com a sílica, que está associada a fração arenosa deste material.

A análise química da fração total da Lama da Pateira e da fração inferior a 63 micra não apresentam diferenças significativas, uma vez que a maior parte do material apresenta granulometria inferior a 63 micra. Apresentam como maiores constituintes óxidos de alumínio e silício nos filossilicatos, óxido de ferro e perda ao rubro, totalizando 93% da amostra. A perda ao rubro é decorrente de reações de decomposição de matéria orgânica e carbonatos, reações de desidratação, desidroxilação de filossilicatos e perda de moléculas de água que estavam presentes na estrutura de minerais hidratados ou ainda hidróxidos metálicos não cristalinos.

Tabela 1: Análise Química da matéria prima das formulações para os elementos maiores.

	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	Cl	K ₂ O	CaO	TiO ₂
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
K	0,260	0,330	35,971	48,209	0,029	0,035	0,009	1,900	0,099	0,145
MK	0,082	0,323	39,875	52,052	0,061	0,047	nd	1,278	0,117	1,552
AA TOTAL	0,103	nd	8,676	87,173	0,037	0,025	0,010	1,597	0,082	0,130
AA < 63 µm	0,142	0,416	33,162	46,215	0,076	0,148	0,014	3,246	0,072	0,359
LP TOTAL	0,282	1,013	21,555	51,240	0,192	0,714	0,011	3,128	0,488	0,635
LP < 63 µm	0,338	1,020	21,710	51,874	0,204	0,427	0,011	3,271	0,304	0,674
	F	MnO	Fe ₂ O ₃	Rb	Zr	Ba	Ce	Pb	LOI	
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	
K	nd	0,019	1,156	QMenores	QMenores	QMenores	QMenores	QMenores	11,780	
MK	nd	QMenores	2,166	QMenores	0,025	0,017	0,027	0,013	2,310	
AA TOTAL	nd	QMenores	0,491	QMenores	QMenores	QMenores	nd	QMenores	1,640	
AA < 63 µm	nd	QMenores	3,133	0,019	0,015	0,034	QMenores	QMenores	12,850	
LP TOTAL	0,036	0,023	5,032	0,022	0,019	0,033	QMenores	QMenores	15,480	
LP < 63 µm	0,054	0,021	5,037	0,022	0,021	0,044	QMenores	QMenores	14,900	

5.1.3. Quantificação da matéria orgânica da Lama da Pateira

Como apresentado na seção 4 a presença de matéria orgânica (MO) na amostra de Lama da Pateira de Fermentelos (LP) foi quantificada por dois métodos distintos. Os resultados encontram-se sistematizados na Tabela 2. De acordo com o método por perda ao rubro (PR%), a MO corresponde a 13,26%, enquanto que pelo método do peróxido de hidrogénio esta corresponde a 5,42%.

O método do peróxido de hidrogénio não remove com muita eficácia o carbono orgânico da amostra, uma vez que o H₂O₂ se decompõe através da reação de oxidação com a matéria orgânica e inorgânica presentes na amostra. A presença de fases minerais estáveis ou de compostos orgânicos protegidos por minerais podem não permitir uma reação completa com o peróxido de hidrogénio (Mikutta et al., 2005). Por outro lado, a presença de metais no solo pode catalisar a reação de oxidação, produzindo radicais OH⁻ que são mais oxidantes que o próprio peróxido.

Em contrapartida, o método por perda ao rubro acaba por quantificar a matéria orgânica juntamente com voláteis, carbonatos, além de remover a água intercrystalina, o que acaba por resultar numa percentagem superior ao método do peróxido de hidrogénio.

Tabela 2: Quantificação da matéria orgânica por perda ao rubro e por peróxido de hidrogénio

PERDA AO RUBRO					H ₂ O ₂				
	LP1	LP2	Média	Desvio Padrão		LP1	LP2	Média	Desvio Padrão
m1	5,0416	5,0085	5,0251		m1	5,08	5,06		
mf	90,4174	84,5313	87,4744		mf	193,13	179,15		
mi	94,8039	88,8619	91,8329		mi	197,95	183,92		
m2	4,3865	4,3306	4,3586		m2	4,82	4,77		
(m1-m2)	0,6551	0,6779	0,6665	0,0003	(m1-m2)	0,26	0,29	0,275	0,015
PR (%)	12,99	13,53	13,26	0,15	%	5,11811	5,731225	5,42	0,31

5.1.4. Granulometria da Areia da Quinta do Areal e da Lama da Pateira

A Figura 23 apresenta a curva granulométrica da Areia do Areal (AA) e a Figura 24 sua frequência granulométrica. A Figura 25 apresenta a curva granulométrica da fração superior a 63 micra da Lama da Pateira e a Figura 26 sua respetiva frequência granulométrica.

A Tabela 3 sumariza os índices gráficos D10 (que correspondem a 10% do material que é mais fino que o diâmetro efetivo), D30 (diâmetro correspondente a 30% do material que passa pelos peneiros), D60 (diâmetro correspondente a 60%), U (coeficiente de não uniformidade de Allen Hazen) e Cc (coeficiente de curvatura).

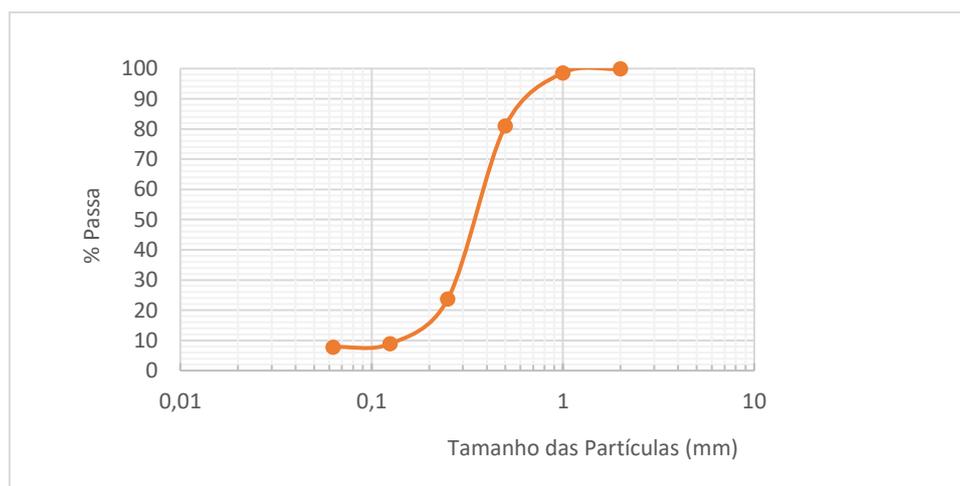


Figura 23: Curva granulométrica da Areia do Areal (AA).

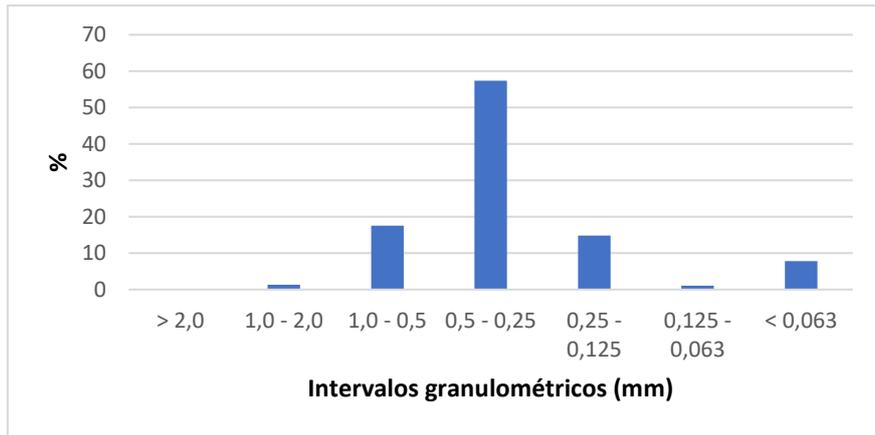


Figura 24: Frequência granulométrica da Areia do Areal (AA).

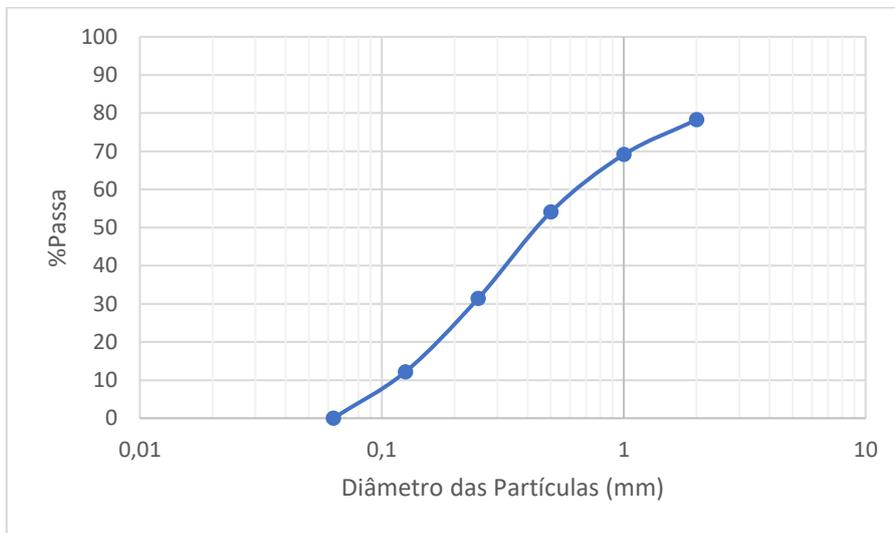


Figura 25: Curva granulométrica da Lama da Pateira de Fermentelos (LP), fração superior a 63 micra.

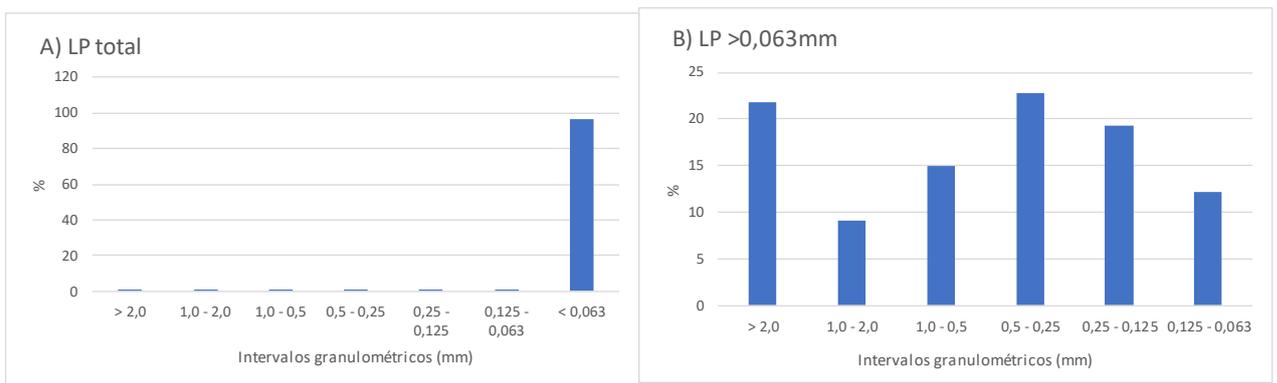


Figura 26: Frequência granulométrica Lama da Pateira (LP), onde a é a frequência da amostra total e b da fração superior à 63 micrómetros.

Tabela 3: Índices gráficos das curvas granulométricas da AA e da LP.

	AA	LP
D10	0,2	0,12
D30	0,3	0,25
D60	0,39	0,5
U	1,95	4,17
CC	1,153846	1,04

A AA pode ser classificada como uniforme, uma vez que apresenta valores de coeficiente de não uniformidade de Allen Hazen (U) inferior a 5. No que diz respeito ao coeficiente de curvatura, apresenta CC entre 1 e 3, sendo considerada bem graduada. A Figura 8a indica a distribuição granulométrica da lama da pateira, em que mais de 95% do material apresenta granulometria inferior a 63 micrómetros. A fração arenosa da LP foi analisada quanto a granulometria, como demonstra a Figura 7 e a Figura 8b, indicando menor uniformidade.

5.2. Caracterização das Formulações

5.2.1. Absorção de água por capilaridade

Usualmente, os dados de absorção por capilaridade são apresentados sob a forma do coeficiente de absorção, em $\text{Kg/m}^2 \cdot \text{h}^{1/2}$. Entretanto, como não foi possível medir a absorção da água pelos provetes sem que houvesse perda de massa, não foi possível obter um coeficiente que correspondesse de facto à absorção por capilaridade. Esta limitação impossibilitou a discussão face a coeficientes de absorção existentes na bibliografia.

A perda de material no decorrer no ensaio está associada ao próprio manuseio do provete ao longo das pesagens e com a reatividade do material. A reatividade está relacionada com a instabilidade dos minerais neoformados nos provetes. Ao entrarem em contacto com a água, os minerais neoformados reagem, e incorporam moléculas de água na sua estrutura cristalina ou nos espaços intersticiais. Pode ainda ocorrer a dissolução de sais.

Sendo assim, optou-se por analisar e comparar as formulações através do coeficiente de ganho de massa (CG), do Valor Assintótico (VA) e do Volume Absorvido em percentagem (VAbs).

5.2.1.1. Coeficiente de ganho de massa (CG)

Na Tabela 4 estão representados os Coeficiente de ganho de massa para cada formulação em função do tempo., expresso em (g/min), para os provetes de água, NaOH e KOH com os tempos de cura de 28, 60 e 90 dias. O CG indica o comportamento das formulações quanto à velocidade de ganho de massa dos provetes ao interagir com a água. Valores positivos e mais elevados indicam maior taxa de absorção e menores perdas de massa. Quando o valor do CG é negativo, a perda de massa foi mais significativa do que o ganho por absorção de água, como demonstram os valores destacados.

Tabela 4: Coeficientes de ganho de massa (g/min), com destaque para os coeficientes negativos, aos 28, 60 e 90 dias de cura.

Coeficiente de ganho de massa (g/min)					
Grupo	Formulação	Ativador	Tempo de cura em dias		
			28	60	90
G1	1.1	H2O	0,074	0,161	0,077
		NaOH	0,005	0,018	0,018
		KOH	0,048	0,032	0,048
G2	2.1	H2O	0,787	0,410	0,325
		NaOH	0,270	0,450	0,305
		KOH	0,504	0,458	0,275
	2.2	H2O	0,589	0,827	0,852
		NaOH	0,587	0,576	0,403
		KOH	0,384	0,370	0,680
G3	3.1	H2O	0,056	0,059	0,013
		NaOH	-0,022	0,041	0,056
		KOH	-0,113	-0,073	-0,044
	3.2	H2O	0,515	0,134	0,155
		NaOH	0,094	0,081	0,078
		KOH	0,264	0,251	0,272
G4	4.1	H2O	0,073	0,227	0,145
		NaOH	1,910	0,091	0,050
		KOH	0,059	-0,136	0,073
	4.2	H2O	0,112	0,134	0,074
		NaOH	-0,476	-0,116	-0,107
		KOH	-0,849	-0,214	-0,214
	4.3	H2O	0,772	0,542	0,643
		NaOH	0,151	0,261	0,216
		KOH	-0,059	-0,224	-0,178
	4.4	H2O	0,084	0,174	0,102
		NaOH	-0,145	-0,096	-0,018
		KOH	-0,118	-0,213	-0,389

Desta forma, observa-se que os grupos G1, G2 e as formulações 3.2, 4.1 e 4.3 apresentaram CGs maioritariamente positivos, apresentando maior estabilidade frente à interação com a água quando absorvida por capilaridade, como é possível visualizar na Figura 28.

A formulação 1.1 apresentou coeficientes menores nas amostras alcalinamente ativadas, indicando menor perda de massa e absorção mais gradual. Ao longo do tempo de cura, os CGs mantiveram-se estáveis ou reduziram pouco comparativamente com a formulação de água, como evidencia a Figura 27a.

No grupo 2, a formulação 2.1 apresentou CGs inferiores aos da água aos 28 dias de cura para as amostras alcalinamente ativadas. Porém, com o tempo de cura, o desempenho das amostras alcalinamente ativadas e com água foi muito semelhante, como é possível verificar na Figura 27 b. A formulação 2.2 apresenta melhor desempenho nas alcalinamente ativadas com o tempo de cura, principalmente na ativada com NaOH (Figura 27c).

No grupo 3 apenas a formulação 3.2 mostrou desempenho satisfatório quando ativada com NaOH, já que a ativada com KOH apresentou pior desempenho do que os provetes não ativados (Figura 27e).

No grupo 4, a formulação 4.1 ativada mostrou melhor desempenho frente à formulação executada somente com a água, exceto aos 28 dias com NaOH, quando apresentou ganho muito intenso de massa (Figura 27f). A formulação 4.3 ativada com NaOH também exibiu valores inferiores aos apresentados pela formulação feita apenas com água, enquanto a formulação ativada com KOH perdeu muita massa, resultando em CG negativo (Figura 27h).

As formulações 3.1, 4.2 e 4.4 apresentaram CGs negativos quando ativadas alcalinamente, indicando que a perda de massa foi mais significativa que o ganho de água por absorção, como evidenciado na Figura 27d, g e i, respectivamente. Observou-se intensa formação de sais na superfície dos provetes ativados alcalinamente, tanto com NaOH quanto com KOH. Porém, os provetes ativados com KOH apresentaram perda mais intensa de massa no decorrer do ensaio, saturando-se primeiro do que os adobes e de hidróxido de sódio.

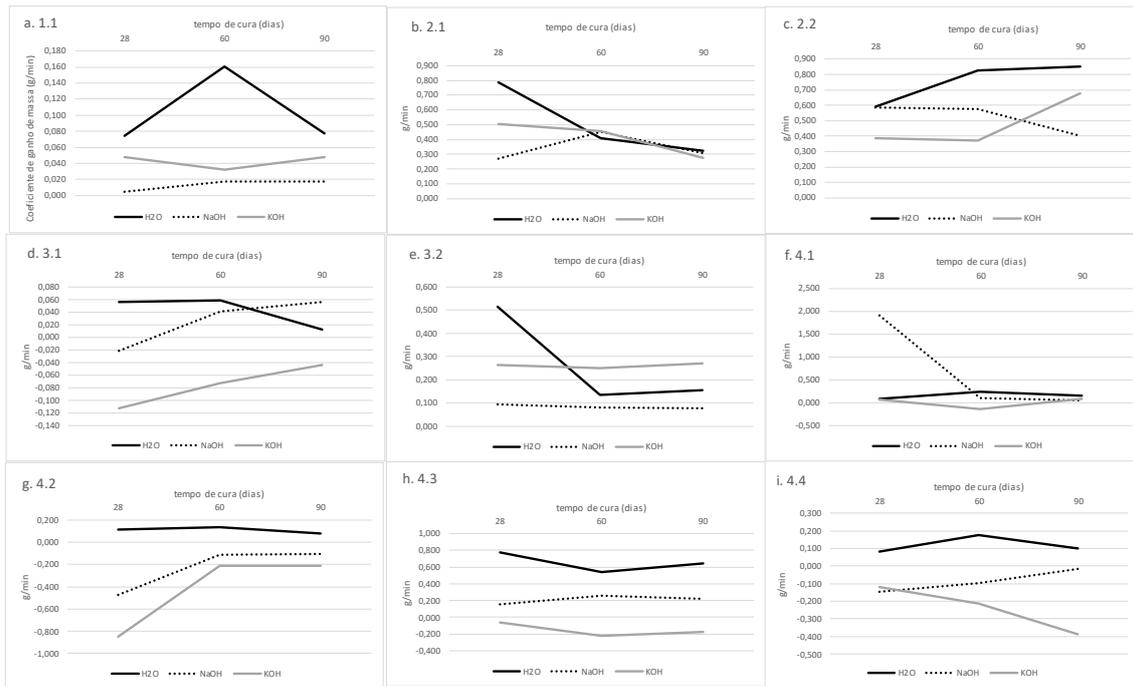


Figura 27: Coeficiente de ganho de massa para cada formulação em função do tempo.

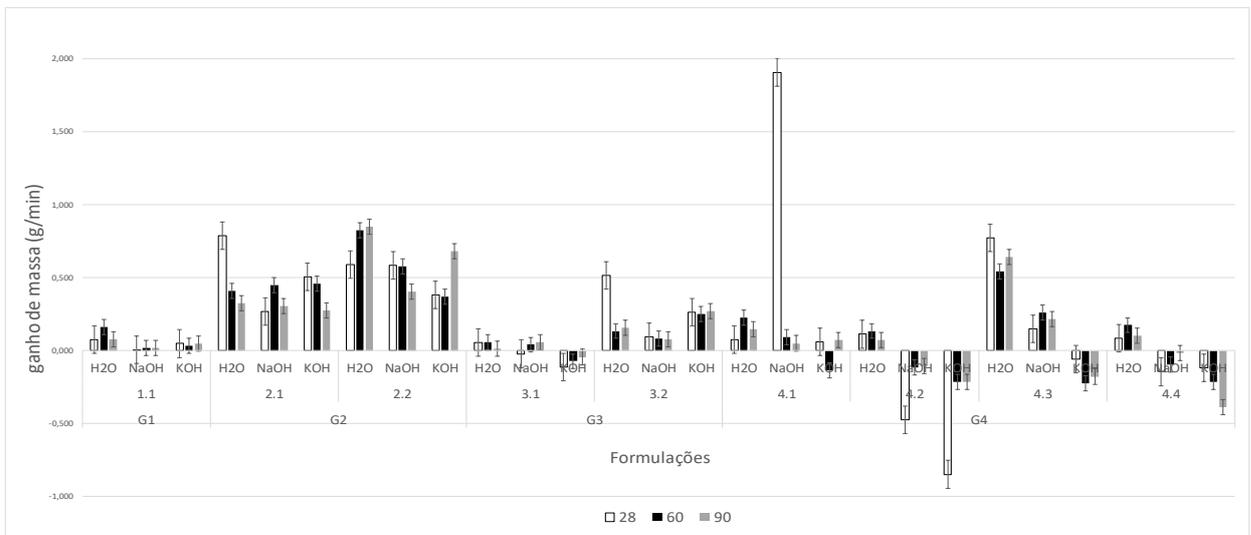


Figura 28: Coeficiente de ganho de massa (g/min) para todas as formulações aos 28, 60 e 90 dias de cura

5.2.1.2. Valores Assintóticos (VA)

A Tabela 5 e Figura 29 apresentam os resultados obtidos para Valor Assintótico (VA) para as formulações desenvolvidas. O VA neste caso corresponde ao ganho de massa por metro quadrado menos a perda de massa pelo provete ao longo do ensaio. Desta forma, não se analisa de facto o quanto de água o provete é capaz de absorver, visto que não é possível quantificar a perda de massa no decorrer do ensaio.

Tabela 5: Valores Assintóticos obtidos no ensaio de absorção de água por capilaridade aos 28, 60 e 90 dias, com destaque para os valores negativos.

Valor Assintótico (Kg/m ²)					
Grupo	Formulação	Ativador	Tempo de cura em dias		
			28	60	90
G1	1.1	H2O	14,950	15,777	14,867
		NaOH	1,825	1,800	6,369
		KOH	2,440	4,171	8,981
G2	2.1	H2O	12,51458	10,9	10,30625
		NaOH	6,210417	12,09167	10,90833333
		KOH	9,99375	11,06667	10,84791667
	2.2	H2O	16,0375	18,02083	17,70416667
		NaOH	15,34375	14,00208	16,24166667
		KOH	12,48958	11,97292	28,31826255
G3	3.1	H2O	3,589583	3,041667	3,0375
		NaOH	2,014583	4,866667	6,060416667
		KOH	0,839583	0,577083	4,675
	3.2	H2O	12,9875	11,51875	10,56666667
		NaOH	4,908333	1,252083	7,825
		KOH	8,716667	8,79375	10,11041667
G4	4.1	H2O	5,645833	11,2	12,15
		NaOH	5,245833	9,552083	9,10625
		KOH	3,347917	2,5125	3,68125
	4.2	H2O	7,75	6,447917	12,86041667
		NaOH	0,6625	5,541667	4,6792
		KOH	-0,69375	1,79375	-2,403125
	4.3	H2O	15,83542	15,44375	16,67604167
		NaOH	9,772917	11,81458	12,89375
		KOH	3,160417	2,383333	3,977083333
	4.4	H2O	12,57083	12,29375	13,85
		NaOH	-1,73125	6,670833	2,86875
		KOH	5,4	0,8375	-3,1125

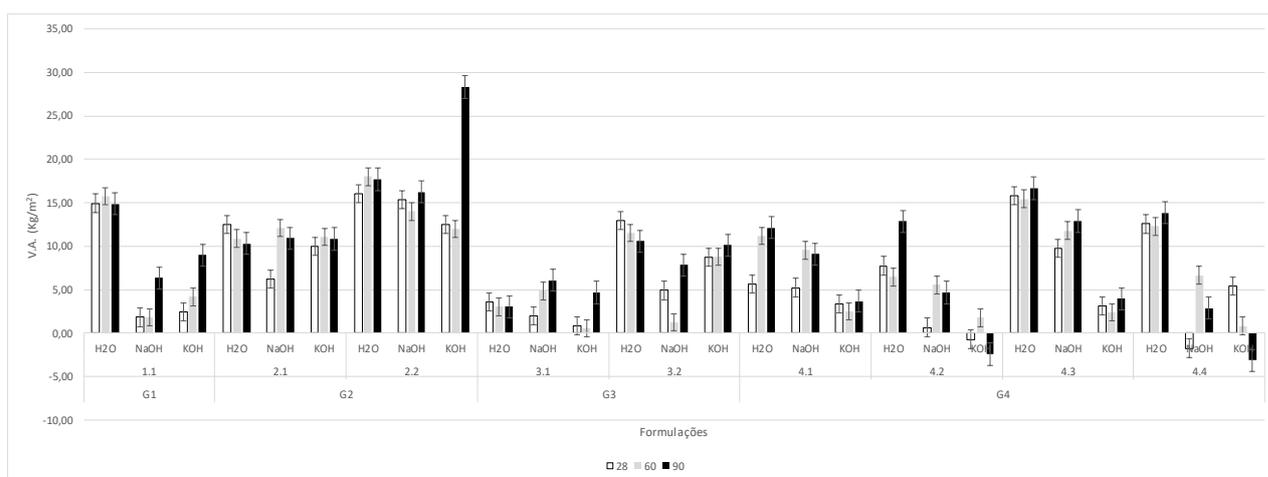


Figura 29: Valor assintóticos para as formulações, com adobes, NaOH e KOH, para os 28, 60 e 90 dias de cura.

A Tabela 5 destaca os valores negativos de VA obtidos em que a perda de massa foi muito intensa, por esta razão estes foram desconsiderados. Algumas formulações apresentaram VA negativos quando se utilizou a média das massas dos três provetes. Isto ocorreu nas formulações 3.1 para o KOH aos 60 e aos 90 dias, e 4.2 para o NaOH aos 28 dias. Nestes casos, observou-se que os três provetes ensaiados que resultaram na média dos valores apresentavam valores destoantes. Então, foi utilizado o valor de um dos provetes que obteve melhor performance em detrimento do valor médio.

Os valores destoantes anteriormente citados têm origem nas diferenças de comportamento entre os três provetes de cada formulação ao interagirem com a água. Estes e podem ser atribuídos a pequenas irregularidades na base do provete, a formação de poros ou sais que facilitam a percolação da água e conseqüentemente acabam por influenciar em maior absorção de água e em alguns casos, podem vir a facilitar a perda de massa durante o ensaio.

Observou-se que as formulações 3.1, 4.2 e 4.4 apresentaram VA negativos, assim como o CG, ressaltando a perda de massa destas formulações ao longo do ensaio.

Figura 30 apresenta os box plots da variação dos valores assintóticos com o tempo de cura para as formulações estudadas. Com o tempo de cura, a formulação de água reduziu a dispersão dos valores de VA, bem como a distribuição, evidenciados pelo menor intervalo entre máximos e mínimos e intervalo interquartis, respectivamente. Após 90 dias de cura, observa-se que houve uma distribuição mais simétrica dos dados, com aproximação da linha da mediana mais ao centro. Ou seja, com o aumento do tempo de cura, as formulações passaram a apresentar um comportamento mais semelhante ao longo do ensaio, com exceção da amostra 3.1 que apresenta VA inferior ao limite inferior. Portanto, aos 90 dias de cura, na formulação de água os valores de VA encontram-se maioritariamente entre 10 e 15 Kg/m².

Nas formulações ativadas com NaOH observou-se uma redução nos valores de VA em comparação com as formulações de água, com valores da ordem de 7 Kg/m². Em relação ao tempo de cura, observou-se um aumento na mediana, elevando a maior parte dos valores para um intervalo entre 6 e 10 Kg/m². Esta elevação do VA com o tempo de cura pode ser atribuída a uma maior estabilidade do material, resultando em menor perda de massa ou ainda à dissolução de sais e aumento da permeabilidade dos provetes.

Aos 90 dias, a dispersão dos dados das formulações ativadas com NaOH é mais ampla que a observada nas formulações de água, indicando maior variabilidade no comportamento das formulações frente à ativação. No que diz respeito à distribuição, o intervalo interquartil é semelhante ao das formulações com água aos 90 dias, porém observa-se um comportamento de aumento aos 60 dias, provavelmente atribuído às perdas de massa em algumas formulações. Assim, como as formulações com água, a distribuição de VA nas formulações de NaOH tornou-se mais simétrica com o tempo de cura, apresentando ligeira assimetria positiva.

As formulações ativadas com KOH também apresentaram uma redução nos valores de VA em comparação com as formulações de água, com valores da ordem de 4,6 Kg/m². Porém, é importante ressaltar que a perda de massa nos provetes ativados com KOH foi mais significativa em comparação aos demais. A alta dispersão e distribuição dos dados indicam que houve maior heterogeneidade no comportamento das formulações quando submetidos a esta ativação, e maior ocorrência de VAs negativos.

Era esperado que os valores de VA fossem superiores nos adobes em comparação com os provetes ativados alcalinamente, indicando que a ativação alcalina contribuiu para a maior resistência das formulações quando em contato com a água. Esta maior resistência pode ser entendida como uma menor absorção de água por capilaridade e uma menor perda de massa. Isto pode ser observado nas formulações ativadas com NaOH, com exceção das formulações 2.1, as quais não apresentaram variações significativas entre as ativadas e as não ativadas, e na formulação 3.1, como é possível verificar na Figura 31.

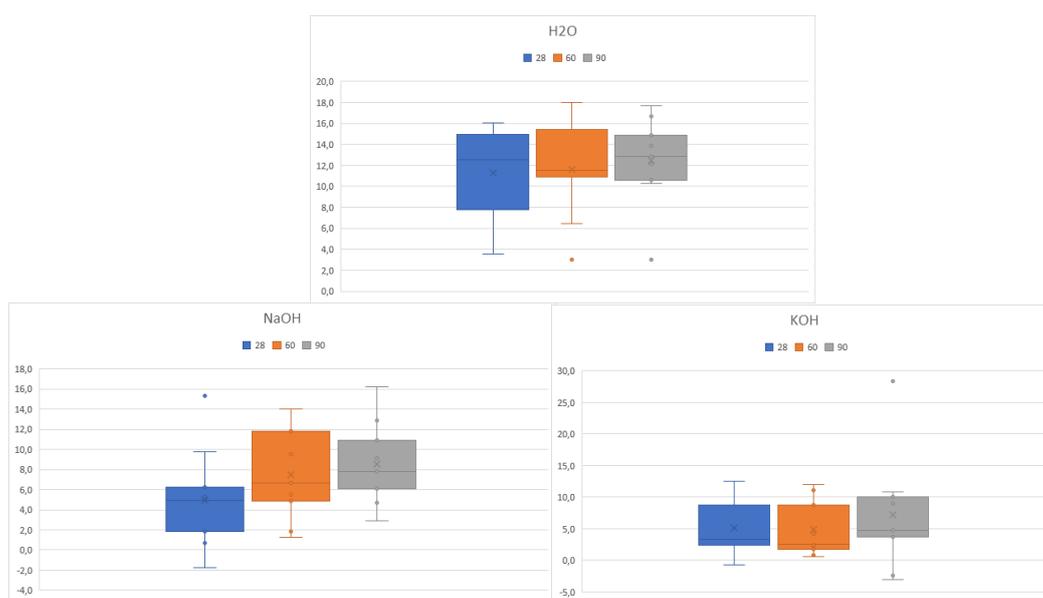


Figura 30: Boxplot dos Valores Assintóticos com o tempo de cura para as formulações.

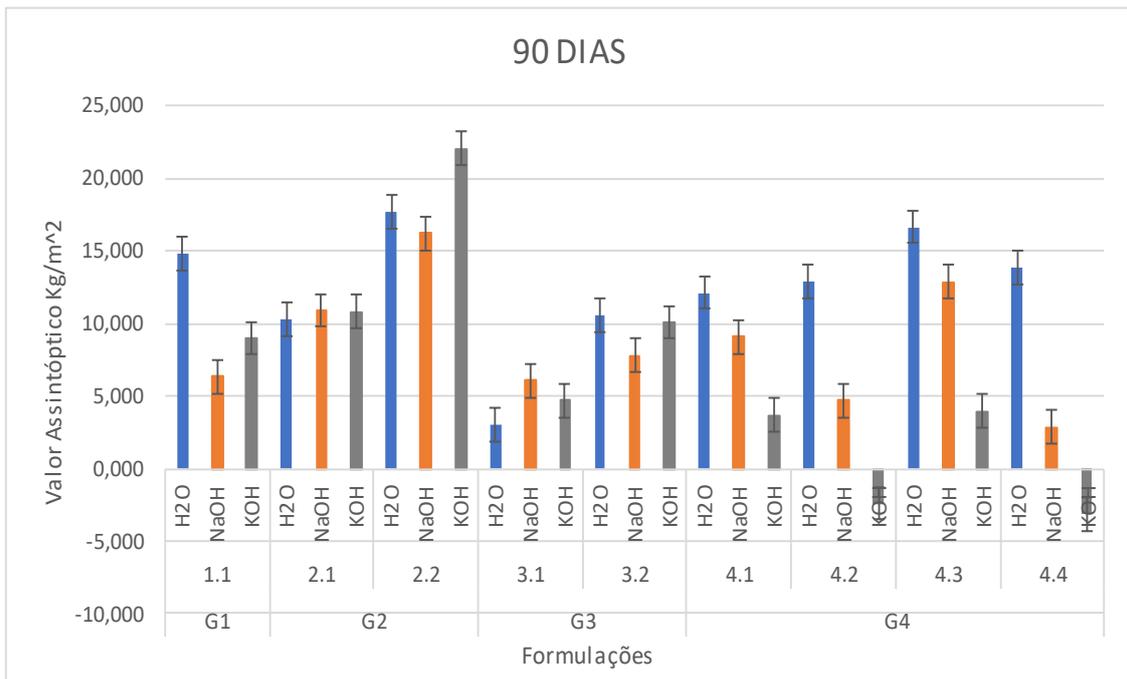


Figura 31: Variação dos Valores Assintóticos para as formulações aos 90 dias de cura.

5.2.1.3. Valor Absorvido (VAbs)

O Valor Absorvido (VAbs) corresponde ao ganho percentual em massa adquirido pelos blocos (%), o qual equivale à quantidade de água absorvida por capilaridade menos a massa perdida no decorrer do ensaio. A Tabela 6 apresenta o valor absorvido pelos provetes em percentagem relativa ao peso inicial dos provetes, e a Figura 32 apresenta graficamente estes valores aos 90 dias de cura, para efeitos de comparação após menor reatividade do material.

Com este parâmetro é possível avaliar efetivamente os efeitos da ativação alcalina na redução da percentagem de massa, ao comparar os valores dos provetes de água com os de NaOH e de KOH. Com exceção das formulações 2.1 e 3.1, as demais apresentaram uma redução no VAbs com a ativação. A redução mais expressiva é da formulação 1.1, que reduz de 45% de ganho de peso em provetes de água para menos 20% de ganho de peso nos ativados.

No grupo 2, as formulações 2.2 apresentam maiores VAbs nas ativadas com NaOH do que nas KOH. No grupo 3, as formulações 3.2 apresentam maiores VAbs na ativada com KOH do que na ativada por NaOH, sendo a formulação que, ao ser ativada pelo hidróxido de potássio perdeu menos massa e absorveu mais água durante o ensaio.

No grupo 4, as formulações 4.2 e 4.4 ativadas com KOH perderam muita massa, e não podem ser avaliadas. Apesar de apresentar um ligeiro ganho, as formulações 4.1 e 4.3 ativadas com KOH também apresentaram intensa perda de massa, o que resulta em valores absorvidos da ordem de 5%.

Como se pode observar na Figura 32, ao considerar-se como parâmetro o valor absorvido, as formulações 1.1, 2.2 e 3.2 quando ativadas alcalinamente são as mais estáveis ao interagirem com a água por capilaridade.

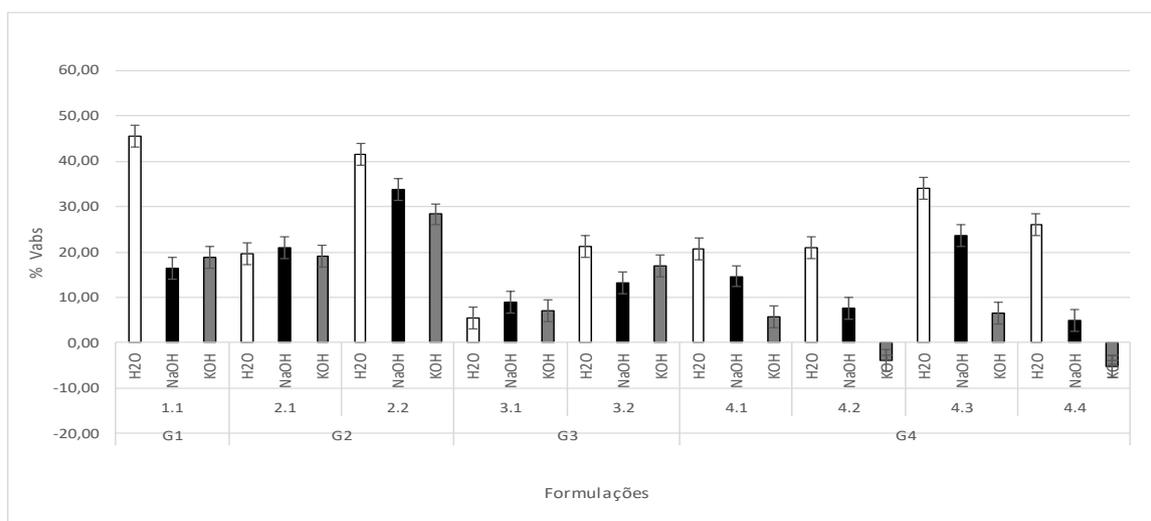


Figura 32: Valor absorvido em percentagem de ganho de massa aos 90 dias de cura.

Tabela 6: Valor absorvido em percentagem relativa ao peso inicial dos blocos

Grupo	Formulação	Ativador	Valor absorvido (% relativa ao peso inicial)		
			Tempo de cura em dias	28	60
G1	1.1	H2O	45,02	47,87	45,48
		NaOH	4,07	4,17	16,44
		KOH	4,96	9,08	18,93
G2	2.1	H2O	21,55	20,23	19,69
		NaOH	11,68	21,32	21,06
		KOH	17,01	19,25	19,04
	2.2	H2O	38,48	42,23	41,44
		NaOH	31,37	27,92	33,76
		KOH	24,70	23,26	28,32
G3	3.1	H2O	6,59	5,47	5,59
		NaOH	2,89	7,05	9,03
		KOH	1,20	0,83	7,11
	3.2	H2O	22,36	22,99	21,21
		NaOH	8,26	1,90	13,19
		KOH	14,82	14,95	17,03
G4	4.1	H2O	9,41	18,53	20,59
		NaOH	8,29	15,34	14,68
		KOH	5,17	4,01	5,77
	4.2	H2O	12,65	10,33	20,98
		NaOH	0,98	8,69	7,57
		KOH	-1,07	2,81	-3,86
	4.3	H2O	33,04	31,71	34,15
		NaOH	16,84	20,69	23,67
		KOH	5,31	4,11	6,47
	4.4	H2O	23,10	22,62	26,08
		NaOH	-2,83	11,70	5,03
		KOH	9,11	1,37	-5,23

5.2.2. Resistência Mecânica

De acordo com Piattoni, Quagliarini, & Lenci (2011), os valores de resistência mecânica para os adobes é entre 0,8 e 3,5 MPa. Em documentos normativos, os valores de resistência mecânica para adobes são da ordem de 1,2 a $2,1 \pm 0,2$ MPa (fator de segurança). C. S. Costa et al. (2013) apresentam resultados de resistência mecânica para adobes da zona de Aveiro, com valores de resistência mecânica entre 1,76 e 2,52 MPa. Assim sendo, optou-se por considerar 1 MPa a resistência mínima aceitável para os provetes.

De acordo com os box plots expostos na Figura 33, os valores de resistência mecânica mais elevados correspondem às formulações ativadas com o NaOH, para todos os tempos de cura. Em comparação com a resistência mecânica das formulações executadas apenas com água, ambas as ativações alcalinas aumentam a resistência mecânica. A maior variabilidade dos dados nas ativações por NaOH revelam que as diferenças composicionais nas formulações exercem maior influência nesta ativação, em comparação com a ativação por KOH, que por sua vez, apresenta valores de resistências mecânica inferiores.

Relativamente ao tempo de cura, aos 28 dias, verifica-se que na ativação por NaOH as formulações 2.1 e 3.2 exibem melhorias acima do intervalo em que se encontram a maioria dos valores de resistência, enquanto a formulação 1.1 exibe valores inferiores. Aos 60 dias, os valores outliers positivos para 3.2 são novamente observados e aos 90 dias repete-se o cenário dos 28 dias de cura, evidenciando a formulação 3.2 como a mais resistente e a 1.1 como a menos resistente quando ativadas com NaOH.

Já nas formulações ativadas com KOH apresentam variabilidade semelhante com o tempo de cura, havendo um ligeiro aumento das resistências aos 60 dias, seguidos por uma queda aos 90 dias.

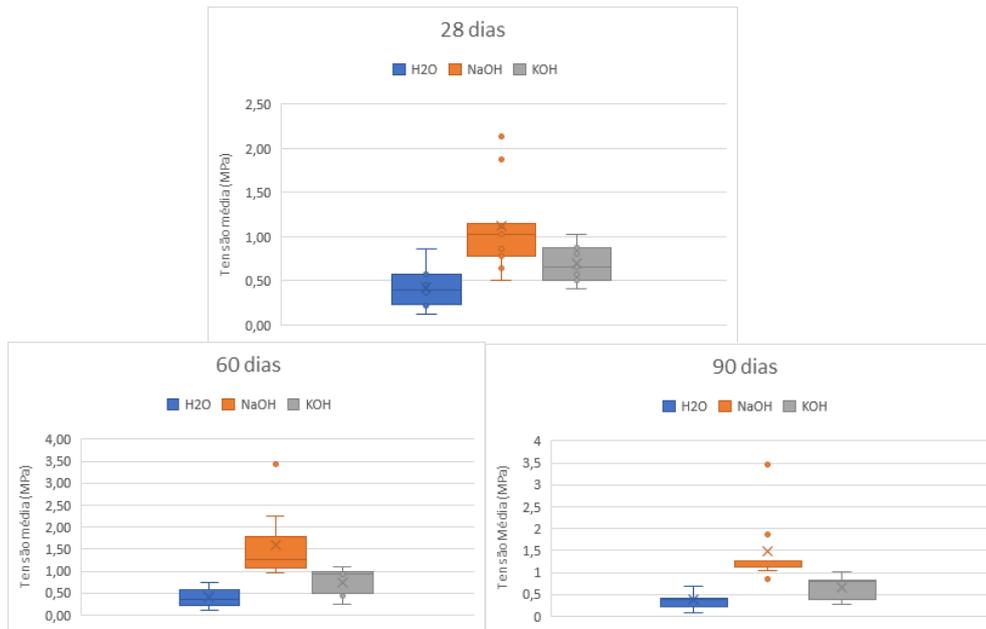


Figura 33: Boxplot dos resultados de Resistência Mecânica.

A Figura 34 apresenta os valores médios de resistência mecânica para todas as formulações em todos os tempos de cura, evidenciando os maiores valores alcançados aos 60 dias, bem como os melhores resultados alcançados com a ativação por NaOH.

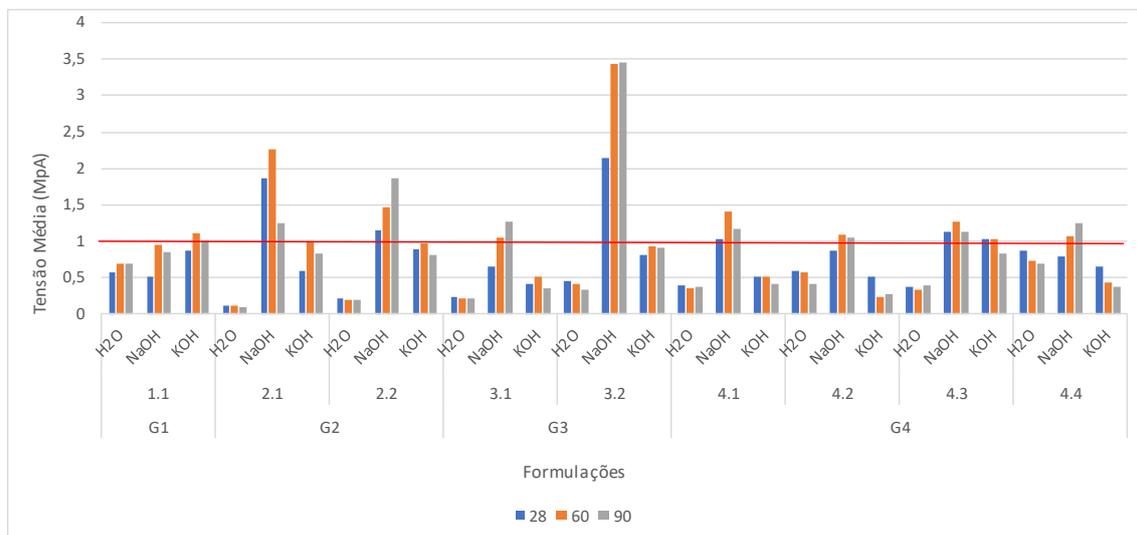


Figura 34: Resistência Mecânica das formulações ao longo do tempo de cura.

Ao analisarmos os valores de resistência mecânica nas formulações de água (Figura 35), verifica-se que não houve um aumento da resistência mecânica com o tempo de cura, com exceção da formulação 1.1, que é a única que fez uso da palha como estabilizante natural e da formulação 4.3 que apresentou um ligeiro aumento. De forma geral, as formulações 1.1 e 4.4 apresentam maiores valores de resistência

mecânica aos 90 dias de cura, com valores médios de 0,68 e 0,69 MPa respectivamente.

Nas formulações ativadas com NaOH observa-se um aumento da resistência mecânica dos 28 para os 60 dias de cura, em todos os grupos. Entretanto, aos 90 dias de cura as amostras do Grupo 1, 2.1 e do Grupo 4 (a excluir a 4.4) apresentaram uma queda na resistência mecânica, como se observa na Figura 36. Observa-se os melhores desempenhos para as formulações 3.2 e 2.2 e o pior para a 1.1, como foi possível verificar nos box plots.

As formulações ativadas com KOH apresentaram melhores resultados aos 60 dias de cura do que aos 90 dias. Na Figura 37 observa-se um comportamento com menor variabilidade dos dados ao longo do tempo de cura, assim como o se observou entre as formulações nos box plots anteriormente apresentados. As formulações 1.1 e 4.3 apresentaram melhor desempenho, enquanto a 4.2 e a 3.1 os piores desempenhos.

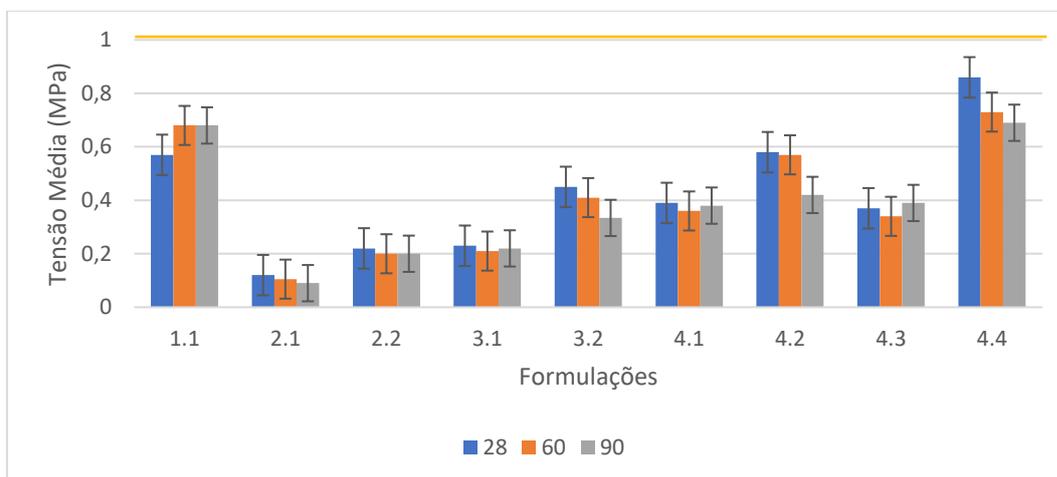


Figura 35: Resistência Mecânica das formulações com água ao longo do tempo de cura.

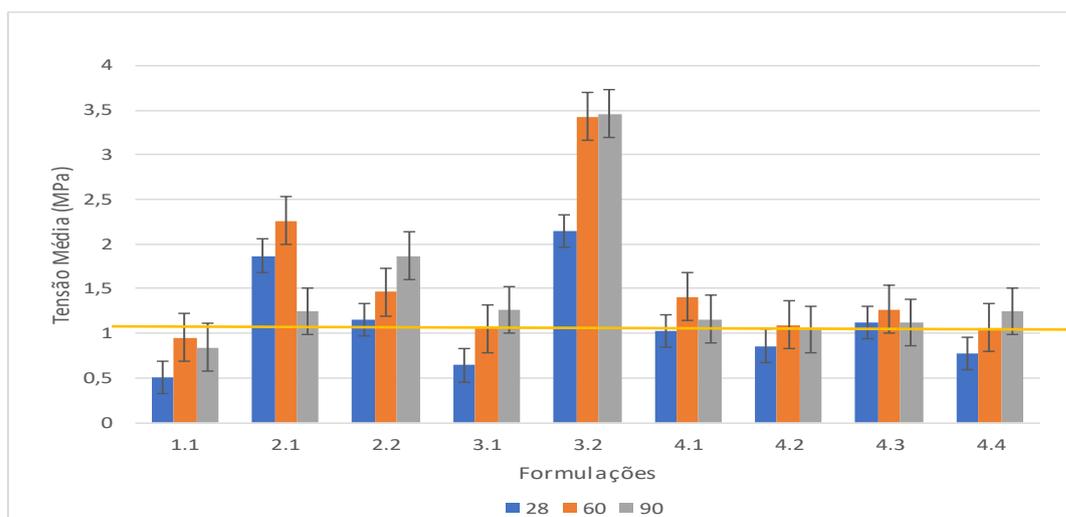


Figura 36: Resistência Mecânica das formulações ativadas com NaOH ao longo do tempo de cura.

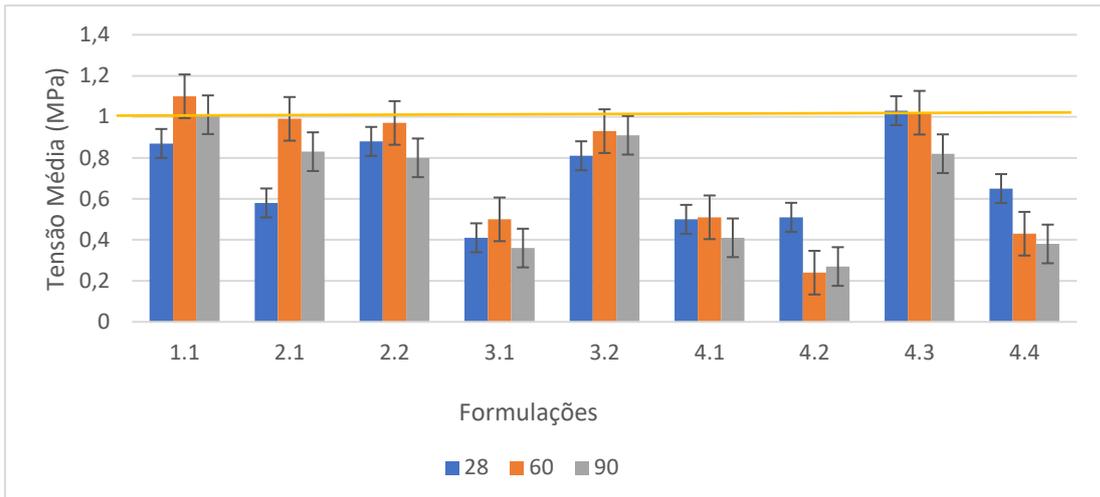


Figura 37: Resistência Mecânica das formulações ativadas com KOH ao longo do tempo de cura.

6. Discussão

6.1. Ensaio de Absorção por capilaridade

Devido à impossibilidade de mensurar apenas a absorção por capilaridade devido a intensa perda de massa ao longo do ensaio, os resultados do ensaio de absorção por capilaridade foram analisados comparativamente entre as formulações, não sendo possível comparar com dados da literatura.

As formulações que apresentaram melhores desempenhos no ensaio de absorção, sob os parâmetros de CG (coeficiente de ganho de massa), VA (valor assintótico) e VAbs (Volume absorvido em percentagem) aqui apresentados podem ser divididas consoante o ativador alcalino. Quando ativadas com NaOH, as formulações 2.2 e 3.2, que não apresentam lama da Pateira na sua constituição, apresentaram melhores desempenhos. O KOH apresentou resultados inferiores nas formulações do Grupo 4, constituídos por lama e areia. A intensa perda de massa durante os ensaios de absorção, mesmo nas formulações 4.1 e 4.3, resultou em baixos valores de CG, VA e VAbs. A formulação 1.1 apresentou resultados semelhantes para ativação quer com NaOH que com KOH, sendo que a ativação por hidróxido de potássio apresentou performance ligeiramente superior.

Observa-se que as formulações que levam LP na sua composição (1.1 e Grupo 4) apresentaram um comportamento mais adverso com ativação por KOH, provavelmente atribuído à presença de matéria orgânica (presente na lama) e à formação de sais solúveis como o carbonato de potássio decorrente da ativação. A formulação 1.1 que leva apenas LP e estabilizante natural (palha) apresentou melhores resultados, com menos perda de material. Pode-se concluir que este resultado é provavelmente atribuído à presença da palha como estabilizante.

A formulação 2.2 (60% de AA e 40% de MK) e a formulação 3.2 (60% de AA e 40% de K) resultam em altos conteúdos de óxidos de sílica e alumínio disponíveis para a ativação alcalina, e menor influência da matéria orgânica ou aniões que interferem negativamente na geopolimerização.

As formulações 2.1 e 3.1 apresentam 20% AA e 80% de MK e K, respetivamente. A redução no conteúdo de filossilicatos e o aumento da percentagem de areia uniforme e bem graduada, reduzindo a quantidade de finos podem ter contribuído para desfavorecer resultados de absorção com a ativação alcalina. Dentre as formulações que levam apenas água na composição, é possível verificar os efeitos da maior percolação de água devido a maior porosidade conferida pelas partículas de areia das formulações 2.2 e 3.2 quando comparadas com as 2.1 e 3.1, respetivamente.

No Grupo 4 observa-se um comportamento segmentado entre dois grupos de formulações. As formulações 4.1 e 4.3, que levam nas suas composições AA, LP e MK em diferentes proporções apresentaram resultados medianos, com intensa perda de massa. Já as formulações 4.2 e 4.4, compostas por AA, LP e K apresentaram péssimo desempenho, com intensa perda de massa que muitas vezes impossibilitou a conclusão do ensaio com todos os provetes, principalmente quando ativados com o KOH. Este comportamento pode indicar que não só a LP, mas também a presença de óxido e hidróxidos e matéria orgânica no MK e na AA se comportam de forma adversa frente a ativação alcalina.

Observa-se que de fato a ativação alcalina teve efeitos na absorção de água por capilaridade, apresentando uma variação conforme ativador e composição. Desta forma, a formulação 1.1 quando ativada com KOH e a 3.2 quando ativada com NaOH obtiveram melhor desempenho.

6.2. Ensaio de Resistência Mecânica

Nos adobes com água, os valores mesmo ao fim de 90 dias de cura obtiveram resultado inferior a 1N/mm^2 . Com a ativação alcalina com NaOH, as formulações dos grupos G2, G3 e G4 atingiram valores superiores a 1N/mm^2 após 90 dias de cura. Nas formulações ativadas com KOH apenas a 1.1 e a 4.3 atingiram valores superiores a 1N/mm^2 após os 90 dias de cura.

No caso das ativadas com hidróxido de sódio, as formulações 2.2 e 3.2. compostas, respetivamente, por 60% de AA e 40% de MK e K, obtiveram melhor desempenho devido à maior disponibilidade de óxidos de sílica e alumínio para a ativação. Por sua vez, a formulação 1.1 apresenta melhor desempenho com o hidróxido de potássio.

O tamanho do catião influencia na cinética da reação e nas propriedades mecânicas do geopolímero. Como o K^+ é maior que o Na^+ , tende a formar oligómeros de silicato maiores, com os quais o $\text{Al}(\text{OH})_4^-$ prefere se ligar. O fato do K^+ ser mais alcalino também contribui para taxas mais elevadas na dissolução do silicato. O K^+ apresenta uma esfera de hidratação menor que do Na^+ , conduzindo a reações de policondensação mais densas (Phair & Van Deventer, 2001).

Como já citado anteriormente, as reações de ativação alcalina foram executadas à temperatura ambiente, bem como a cura dos provetes. Estas condições foram adotadas uma vez que se pretende minimizar gastos energéticos e se respeitar o processo de confecção dos adobes. Estas condições acabam por influenciar na velocidade de reação da ativação e conseqüentemente nos seus efeitos relativos ao ganho de resistência mecânica.

Os resultados obtidos apontaram um aumento na resistência mecânica nos provetes ativados com NaOH do que com KOH, o oposto do que é descrito na literatura. Alguns fatores relacionados a cura e ao surgimento de eflorescências devem ser considerados, dentre os quais a concentração das soluções alcalinas.

A concentração das soluções de hidróxido de sódio ideais para ativar alcalinamente metacaulinos é de 8M, permitindo a dissolução do silício e da alumina (Garcia-Lodeiro et al., 2015). Elert et al. (2015) atingem pH da ordem de 12 com soluções de NaOH e KOH a 5M, o que já permite a dissolução. Vale ressaltar que o excesso de álcalis ao interagir com o CO₂ atmosférico resulta na formação de sais.

De acordo com Severo et al. (2013) a temperatura e a humidade no tempo de cura podem contribuir para o surgimento de microfissuras, as quais podem reduzir a resistência mecânica. Menezes et al. (2006) ao estudarem eflorescências em peças cerâmicas indicam que as eflorescências não produzem esforços mecânicos relevantes, enquanto as criptoflorescências podem ocorrer em poros e na rede estrutural do material, levando a reduções significativas na resistência mecânica.

Severo et al. (2013) ainda citam a formação de carbonatos de metais alcalinos, que também influenciam negativamente na resistência mecânica. Tendo em conta os dois ensaios mencionados anteriormente (absorção de água por capilaridade e resistência mecânica), serão apresentados no próximo capítulo os resultados para as formulações 1.1 e 3.2, uma vez que apresentaram melhores resultados quando ativados alcalinamente e por apresentarem nas suas composições materiais que são tradicionalmente usados nos adobes da zona de Aveiro, a Lama da Pateira na formulação 1.1 e o caulino de Ovar na formulação 3.2.

6.3. Limitações na metodologia e possíveis fontes de erros experimentais

6.3.1. Ensaio de Absorção de água por capilaridade

O ensaio de absorção de água por capilaridade resultou em intensa perda de massa pelos provetes. Gomes (2015) apresentou os mesmos problemas para executar o ensaio em blocos de terra comprimida (BTC). O autor teve êxito em evitar a perda de massa ao envolver os blocos de dimensões de um tijolo com filme aderente e executar o ensaio dentro de telas metálicas. Entretanto, esta medida paliativa era inviável aos provetes aqui apresentados devido às pequenas dimensões e à quantidade de provetes ensaiados (243 provetes).

6.3.2. Ensaio de Resistência Mecânica

A Figura 38 apresenta os resultados de resistência mecânica ao longo do tempo, incluindo os dados de 180 dias, em que se observa melhores resultados com o NaOH para a amostra 3.2 e resultados semelhantes para ambos ativadores alcalinos no caso da amostra 1.1., exceto aos 180 dias. Por se tratar de um ensaio destrutivo, este é executado com diferentes amostras ao longo do tempo de cura, para além de utilizar a média de 3 provetes em cada ensaio. Isto conduziu os ensaios de 180 dias a serem executados em provetes que não apresentavam seções basais tão perfeitas quanto os dos tempos de cura antecessores, o que leva a uma redução nos valores de resistência mecânica.

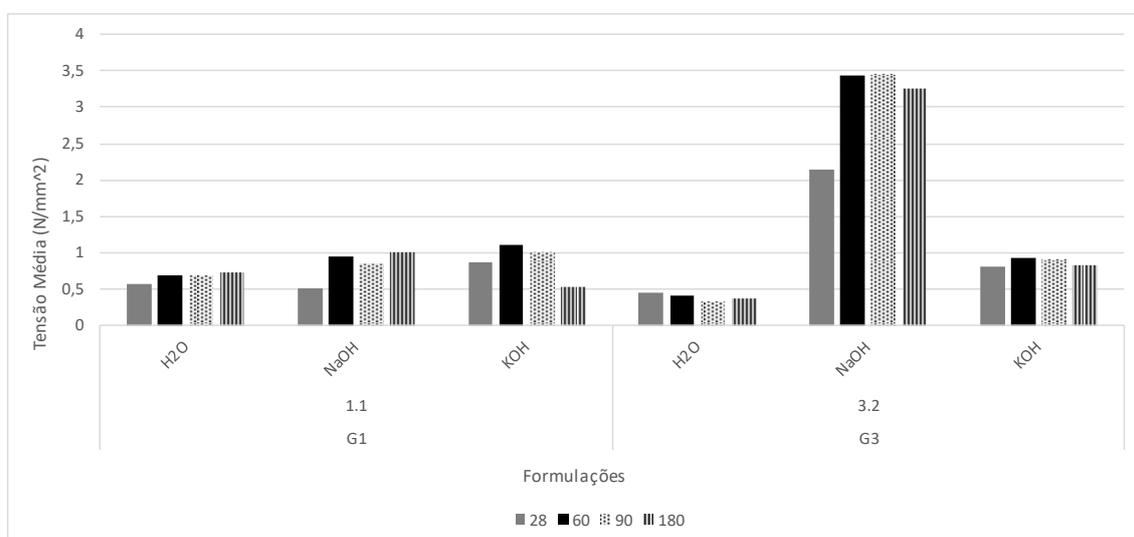


Figura 38: Resistência Mecânica das formulações 1.1 e 3.2 aos 28, 60, 90 e 180 dias.

Dentre os efeitos adversos da ativação alcalina, observou-se a formação de sais. A ativação alcalina apresentou em todas as formulações eflorescências logo no início do tempo de cura (7 dias), sendo esta mais intensa nos provetes ativados com NaOH. Nas imagens do SEM foi possível verificar a ocorrência de sais nas porosidades e no interior dos provetes, as criptoflorescências.

Esta precipitação bem como a ocorrência de algumas fissuras com a secagem ou remoção do molde contribuem para a fragilização dos provetes, resultando em valores mais baixos de resistência mecânica ou ainda em deturpações nos valores de absorção por capilaridade, uma vez que gera uma porosidade e aumenta a fragilidade do material, contribuindo para a perda de massa.

7. Resultados e Discussão das Formulações Seleccionadas

7.1. Características físicas das formulações

As Figuras Figura 39 e Figura 40 ilustram as formulações 1.1 e 3.2, respetivamente. Em todas as formulações ativadas com NaOH ocorre intensa eflorescência de sais. As formulações ativadas com KOH também apresentaram alguma eflorescência e aspeto mais friável em comparação com a água.

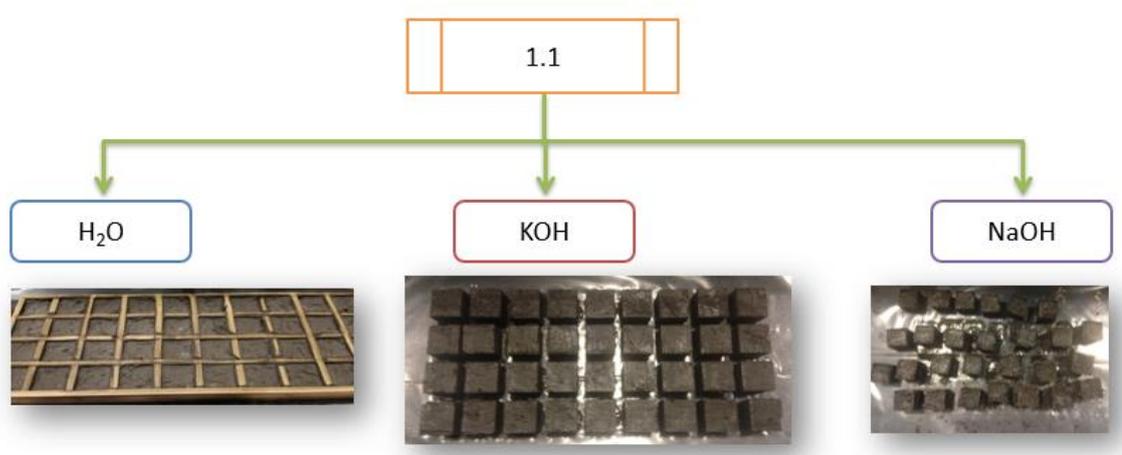


Figura 39: Formulação 1.1 com H₂O, KOH e NaOH.

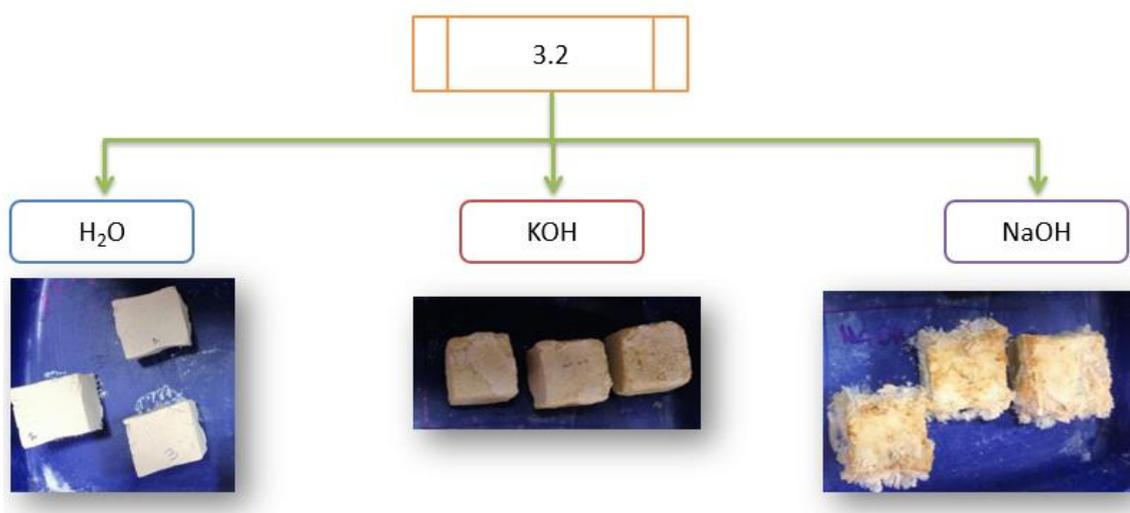


Figura 40: Formulação 3.2 com H₂O, KOH e NaOH

No decorrer da confeção das formulações, as ativadas por NaOH expandiram-se mais dentro dos moldes, sendo mais difícil a remoção dos mesmos.

No que diz respeito às eflorescências, estas são comuns em misturas ativadas alcalinamente, principalmente com o sódio, uma vez que as ligações com o aluminossilicato são mais fracas do que as ligações com o potássio, ou ainda indicarem uma geopolimerização insuficiente (Severo et al., 2013).

Em relação a coloração dos provetes, observou-se mudança de coloração daqueles que não levam LP na composição. A formulação 3.2 tornou-se mais amarelada com a ativação por NaOH e mais castanha com o KOH. A ativação alcalina resultou em diferenças na coloração das amostras de adobe, sendo mais evidentes nas formulações de NaOH do que com KOH (Elert et al., 2015).

7.2. Análise mineralógica e química das formulações

A Figura 41 e a Figura 42 apresentam os difratogramas das formulações 1.1 e 3.2., respectivamente. Observa-se que não houve modificações na mineralogia com o tempo de cura. As amostras apresentam sobretudo quartzo, feldspato potássico, plagioclase e filossilicatos.

A amostra 1.1 apresenta uma discreta banda amorfa entre os 18 e 42° 2 θ , corroborando para indicar uma menor ordem estrutural após a ativação alcalina. Nos difratogramas da formulação 3.2 (Figura 42) observa-se uma redução na escala da formulação que leva apenas água (da ordem de 10000) para 6400 na formulação ativada com hidróxido de potássio, apesar desta escala ser automaticamente escolhida pelo aparelho pode ser um bom indicador de uma redução na ordem estrutural com a ativação alcalina.

De acordo com a revisão apresentada por Duxson et al. (2007), determinar a presença de amorfos por DRX em geopolímeros executados em baixa temperatura, como é o caso da ativação das formulações de adobe aqui apresentadas, é muito difícil, sendo necessário utilizar outras técnicas para afirmar com veracidade.

No que diz respeito ao tempo de transição entre a fase amorfa e a fase cristalina do geopolímero Duxson et al. (2007) afirmam que o tempo está relacionado com a temperatura de síntese do geopolímero, bem como o tempo de cura. Usualmente, geopolímeros sintetizados a temperaturas mais elevadas, da ordem de 120°C resultam em geopolímeros mais rapidamente, como no dia a seguir a sua confecção.

Nas formulações ativadas neste trabalho, não foi observada a formação de novos minerais nos difratogramas, apenas indicativos de menor ordem estrutural, sugerindo um aumento na quantidade de amorfos quando alcalinamente ativadas. Elert et al. (2015) só observam diferenças mineralógicas nos difratogramas nas amostras

alcalinamente ativadas após um ano de cura, quando surgem picos de faujasite nos adobes ativados com NaOH, chabazite nos adobes curados com KOH e zeólitas em ambos.

No caso destas formulações de adobe ativadas, a ausência de silicato de sódio, componente usado na ativação de geopolímeros, bem como a temperatura de cura, podem levar a um aumento do tempo de todo o processo de alteração estrutural pretendido. No entanto, visto que um dos objetivos deste trabalho é manter a sustentabilidade dos adobes tradicionais não alterando o seu processo de fabrico, este problema não se pretende resolver com incremento de temperatura, mas apenas com alteração das matérias-primas ou das suas proporções.

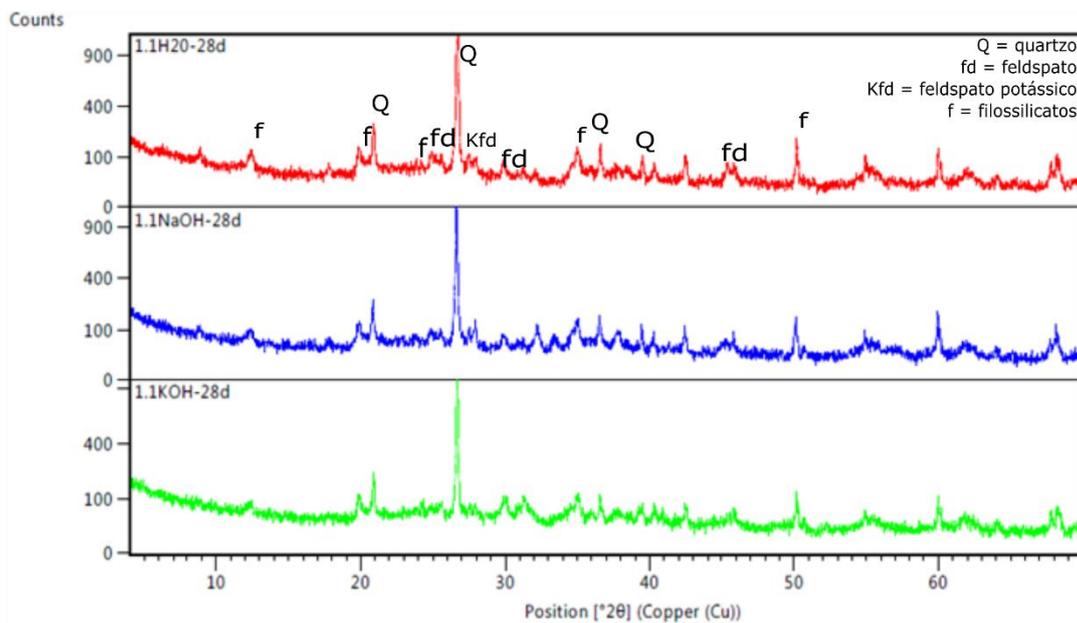


Figura 41: Difratoograma da amostra 1.1

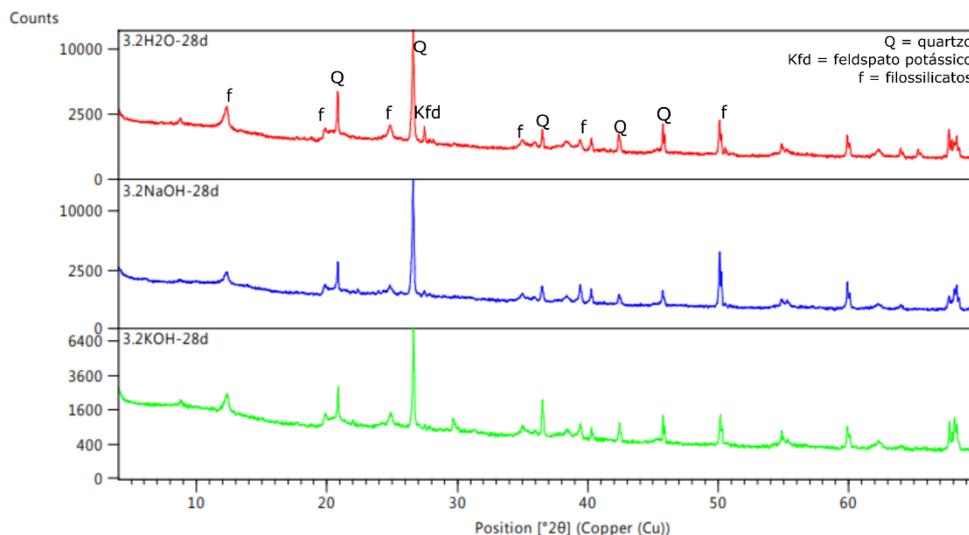


Figura 42: Difratoogramas da formulação 3.2 aos 28 dias.

A Figura 43 apresenta a composição química das formulações com o tempo de cura. As diferenças na percentagem de óxidos podem ser atribuídas ao erro experimental, uma vez que não foi a mesma amostra que foi submetida aos ensaios de 28, 60 e 90 dias.

O aumento em percentagem de óxidos é observado para Na_2O e K_2O que foram introduzidos no sistema com a ativação alcalina das formulações. As alterações nas percentagens de sódio e potássio com o tempo de cura podem estar relacionadas a eflorescências, resultante de sais de sódio e potássio que se perdem no manuseio da amostra, ou ainda no processo de moagem para a análise química.

A análise química confirma as observações do difratogramas, sugerindo redução da ordem estrutural e sais como minerais neoformados, que também são confirmados pelas análises de SEM e EDS que se encontram apresentadas na seção 7.3.

Observou-se uma maior perda ao rubro (LOI) nas amostras ativadas com KOH pode indicar a formação de carbonatos, que se formam da reação da amostra com o CO_2 atmosférico durante a cura.

A presença de maiores teores de Fe_2O_3 na amostra 1.1 pode vir a influenciar na resistência mecânica das amostras, uma vez que o ferro tem tendência a substituir o alumínio no processo de ligações com os tetraedros SiO_4^{2-} . De acordo com Kaye e Soyer-Uzum (2015), a presença de materiais com o elemento Fe na matriz geopolimérica reprecipitam rapidamente formando hidróxidos ou oxi-hidróxidos, indisponibilizando os iões OH^- da fase de dissolução, prejudicando a reação de geopolimerização.



Figura 43: Composição química das formulações 1.1 e 3.2 aos 28, 60 e 90 dias de cura.

A análise dos difratogramas dos sais formados durante o tempo de cura nas formulações ativadas com NaOH apontaram a ocorrência de thermonatrite. Trata-se de um carbonato de sódio hidratado, provavelmente oriundo da reação do excesso de sódio com o CO₂ atmosférico, como é possível verificar na Figura 44. Os picos de quartzo presentes na amostra são devido a contaminação do sal com parte do material constituinte do adobe durante a amostragem.

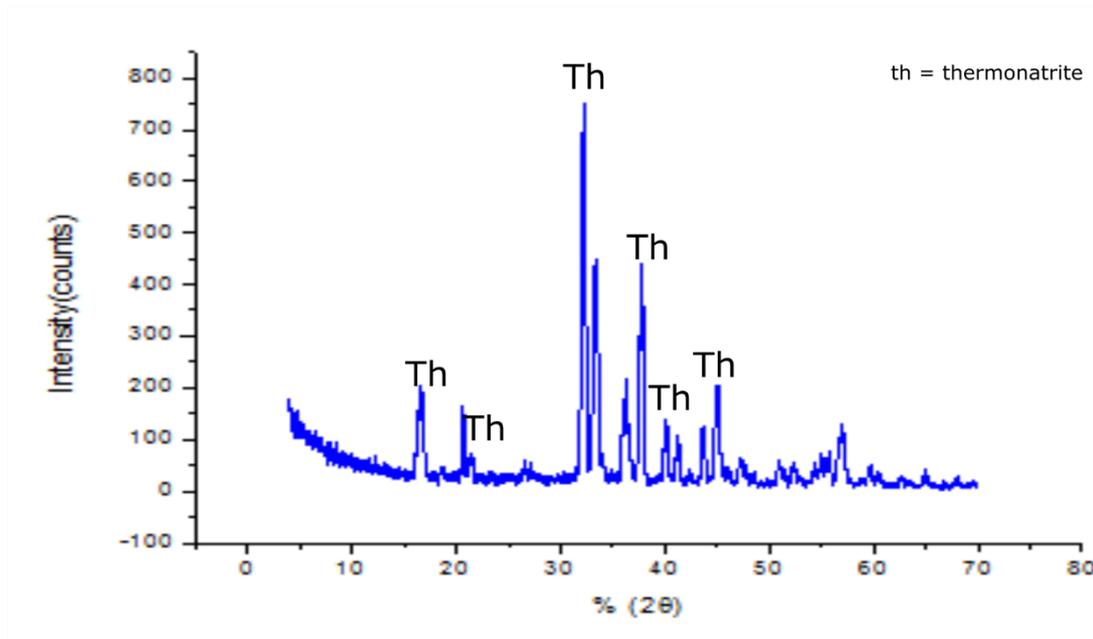


Figura 44: DRX do sal formado na ativação por NaOH na formulação 4.2.

7.3. SEM e EDS das formulações

Os resultados de SEM com EDS para as formulações 1.1 e 3.2 encontram-se na Figura 45 e na Figura 46, respetivamente. Em ambas as formulações se observam a coexistência de fases cristalinas e amorfas nas formulações alcalinamente ativadas. Dentre os minerais neoformados, observou-se a formação de sais, confirmando a DRX. A fase amorfa é bem observada tanto nas amostras ativadas com NaOH quanto por KOH. Os resultados de EDS não indicam grandes alterações químicas e destacam a presença de ferro e titânio associada a fase amorfa. Na formulação 1.1 ativada por NaOH observa a formação de sais de sódio (Figura 45).

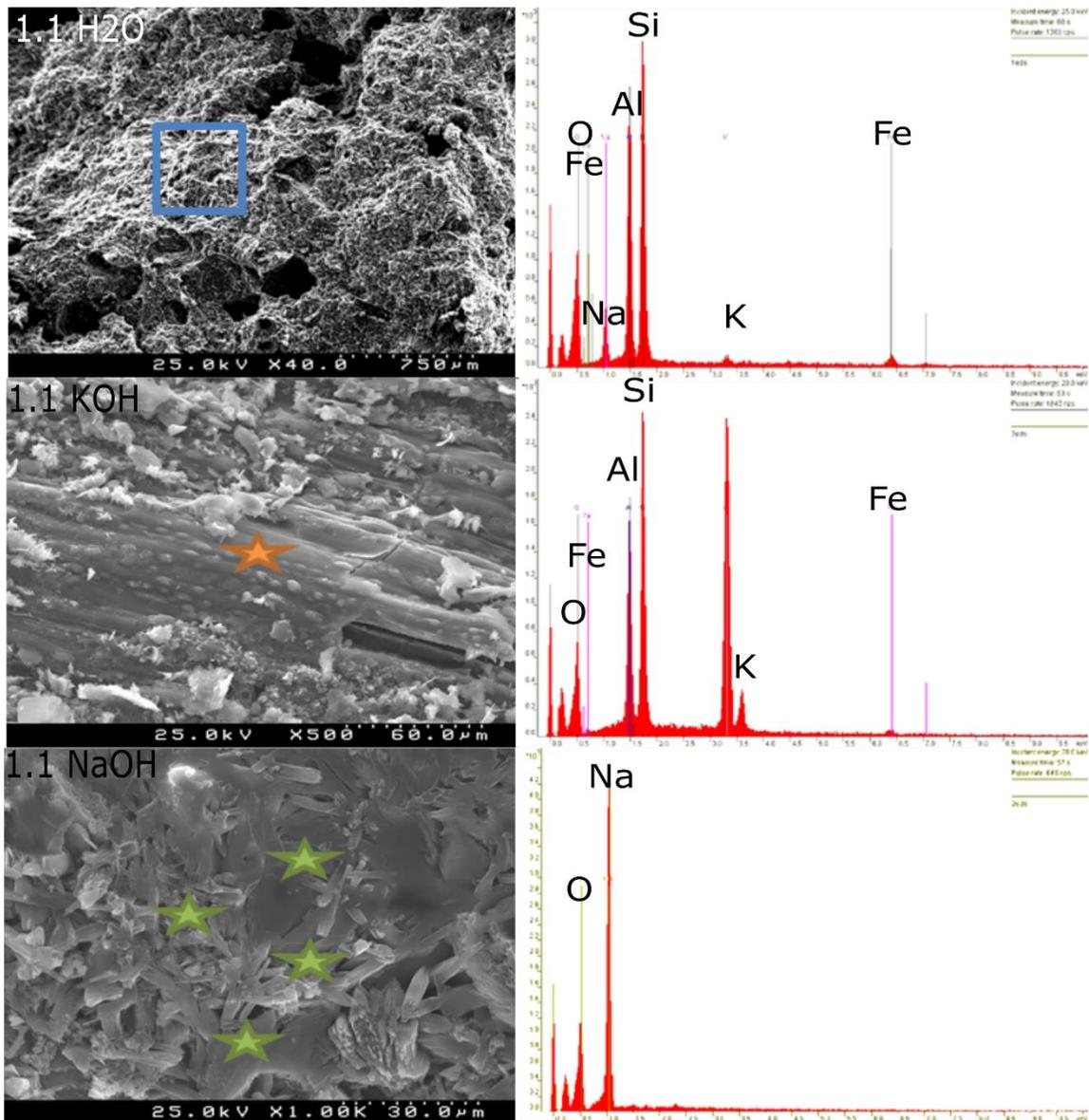


Figura 45: Imagens do SEM com EDS da formulação 1.1. com água, KOH e NaOH.

Na amostra 3.2 (Figura 46a), na imagem de SEM ativada por NaOH observa-se a formação de novos materiais, possivelmente algum tipo de zeólito que se está a formar com ativação, sendo que a composição química essencial é silício e alumínio. Na Figura 46b salienta-se a formação de minerais amorfos, sobretudo silicatos de alumínio e potássio, tal como sugere a análise química por EDS. Este resultado vai de encontro à análise mineralógica por DRX, em que não foi possível observar a formação de novos minerais, sendo que os minerais que se estão a formar estão no estado amorfo. Na Figura 46c verifica-se essencialmente que o material é constituído por fase amorfa e cristalina, sendo que a partícula representada é da caulinite da matéria-prima inicial.

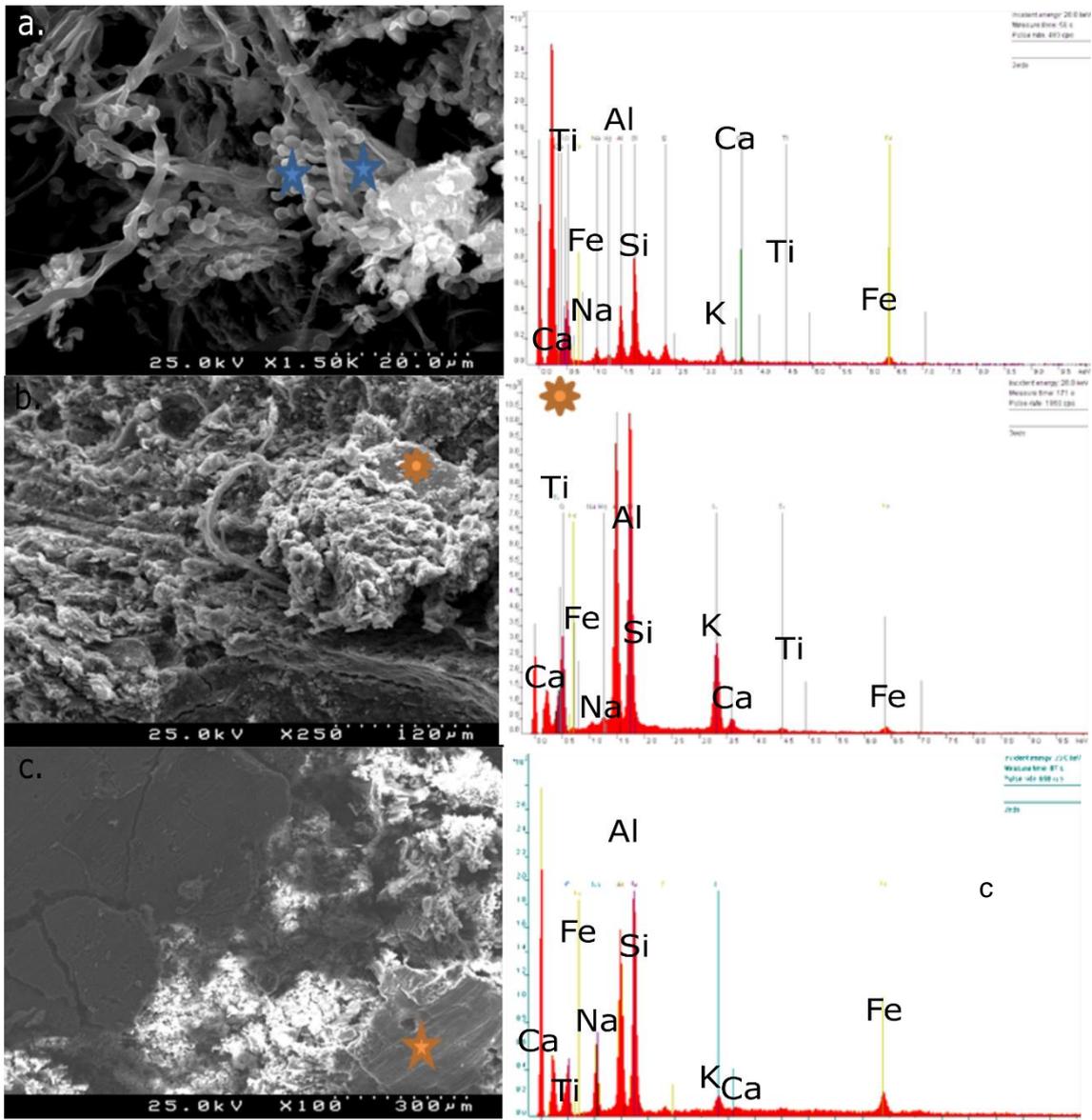


Figura 46: Imagens do SEM com EDS da formulação 3.2: a. com água, b. ativada com KOH; c. ativada com NaOH.

8. Considerações Finais

8.1. Alterações mineralógicas e microestruturais promovidas pela ativação alcalina

Com relação às modificações mineralógicas e microestruturais nas formulações ativadas alcalinamente, Duxson et al. (2006) indicam que os resultados da geopolimerização independem do tipo do ativador. Ou seja, a princípio, para estes autores, a ativação ser a partir de hidróxido de sódio ou potássio não é relevante. Entretanto, as imagens do SEM e o comportamento dos provetes no ensaio de resistência mecânica, indicam que algumas diferenças. No SEM é possível observar maior homogeneidade na forma de aglomerados nas imagens de ativação por KOH. Já no caso da resistência mecânica, as formulações ativadas com NaOH mostraram maior ganho de resistência em comparação com os adobes, o que deve ser reflexo de alterações estruturais nos provetes.

Ao contrário do previsto pela literatura, como se verifica em Elert et al. (2015), a ativação por NaOH atingiu resultados melhores de resistência mecânica e de comportamento frente a absorção de água, em comparação com as formulações ativadas com KOH. Entretanto, deve se levar em consideração a formação de sais solúveis de sódio.

Não foi possível observar claramente a transição da fase amorfa para a cristalização de zeólitos, o que é esperado uma vez que o tempo de cura das amostras é atualmente de 180 dias e não se obteve todos os resultados das análises. De acordo com Duxson et al. (2007), provavelmente após um ano de cura seriam observadas mudanças mineralógicas indicando fases precursoras dos zeólitos. (Elert et al., 2015) apresentam resultados semelhantes, indicando já aumento na resistência mecânica e maior resistência ao interagir com a água, entretanto sem evidências de cristalização mesmo após dois anos de cura de seus provetes alcalinamente ativados por imersão.

Os resultados da DRX indicam redução na ordem estrutural das matérias primas para os provetes, evidenciando a etapa de dissolução e formação do gel amorfo da ativação alcalina. Porém, devido à baixa cinética da reação de ativação alcalina, por sua vez atribuídas às condições adotadas de ativação e cura, a etapa seguinte de recristalização e aumento da ordem estrutural ainda não pode ser observada.

8.2. Fatores que influenciam na ativação alcalina

De acordo com Duxson et al. (2007), as reações de geopolimerização e seus produtos dependem de uma série de fatores que vão desde a escolha da matéria prima, do tipo

de ativador e das condições em que são feitas a ativação e a cura, resultando em diferentes características nos polímeros inorgânicos resultantes desta reação.

8.2.1. Matéria-Prima

A presença de grande quantidade de SiO_2 e Al_2O_3 reativo na matéria-prima é imprescindível para que ocorra a geopolimerização. Considerando os resultados da análise química e mineralógica, a quantidade de SiO_2 e Al_2O_3 reativos foi aproximada para cada matéria-prima. No caso da Areia da Quinta do Areal (AA), considerou-se que o silício e alumínio reativos encontram-se na fração inferior a 63 micra, assim como na Lama da Pateira (LP). Desta forma, considerou-se a sua proporção, uma vez que a quantidade de areia inferior a 63 micra é de apenas 7,8%, enquanto na lama da pateira, a fração inferior à 63 micras é de 95%. No caso do metacaulino (MK), é considerado o total. Para o caulino (K), o resultado apresentado é sobre estimado, uma vez que apresenta quartzo em sua composição que não apresentam silício e alumínio reativos para as reações de geopolimerização.

Esta disponibilidade de SiO_2 e Al_2O_3 reativos favoreceu os resultados de interação com a água e de resistência mecânica nas formulações que apresentavam maiores teores de LP, MK e K. As quantidades encontram-se sintetizadas na Tabela 7.

Tabela 7: Proporção $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ das matérias primas e das formulações.

Matéria Prima	$\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ TOTAL	Formulação	Proporção de Matéria Prima				$\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ proporcional
			MK	K	AA	LP	
K	1,34	1.1	0,00	0,00	0,00	2,15	2,15
MK	1,31	2.1	0,26	0,00	0,09	0,00	0,35
AA TOTAL	10,05	2.2	0,96	0,00	0,07	0,00	1,02
AA < 63 μm	1,39	3.1	0,00	0,27	0,09	0,00	0,36
LP TOTAL	2,38	3.2	0,00	0,54	0,07	0,00	0,60
LP < 63 μm	2,39	4.1	0,13	0,00	0,09	0,24	0,46
		4.2	0,00	0,13	0,09	0,24	0,46
		4.3	0,26	0,00	0,07	0,48	0,80
		4.4	0,00	0,27	0,07	0,48	0,81

De acordo com a revisão da literatura apresentada por Garcia-Lodeiro et al. (2015) sobre ativações alcalinas em cimentos, melhores resultados em termos de resistência mecânicas são alcançados quando a proporção entre SiO_2 e Al_2O_3 reativos encontra-se entre 2 e 4, o que ocorre apenas com a formulação 1.1, que leva a LP a ser o único material com a razão $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ reativos acima de 2. Os valores apresentados para AA total não são considerados, uma vez que a sílica presente na amostra total se encontra somada com os mais de 90% presentes na fração arenosa, estando majoritariamente na estrutura do quartzo.

A Figura 47a correlaciona a resistência mecânica aos 90 dias de cura para as formulações ativadas com NaOH e KOH com a proporção de matéria-prima em cada formulação. Observa-se que a quantidade de areia não exerce grande diferença na resistência mecânica, independentemente do ativador alcalino utilizado. Já as formulações ativadas com NaOH exibem aumento na resistência mecânica consoante o aumento da proporção de caulino ou metacaulino nas formulações, com exceção da formulação 1.1 e do grupo 4. As formulações que levam LP na composição, a saber 1.1, 4.1, 4.2 e 4.3 apresentam melhores resultados de resistência mecânica quando ativadas com KOH.

8.2.2. Formulações

A Figura 47b. correlaciona os valores de resistência mecânica aos 90 dias de cura com $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ reativos estimados. Nesta é possível observar que, com o NaOH, as formulações que não levam lama da Pateira na formulação apresentam um aumento na resistência mecânica com o aumento da razão $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ (2.1, 3.1, 3.2). Já para o KOH, só há um aumento da resistência nas amostras 1.1 e 4.3, não apresentando uma relação evidente entre a proporção $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ e o ativador.

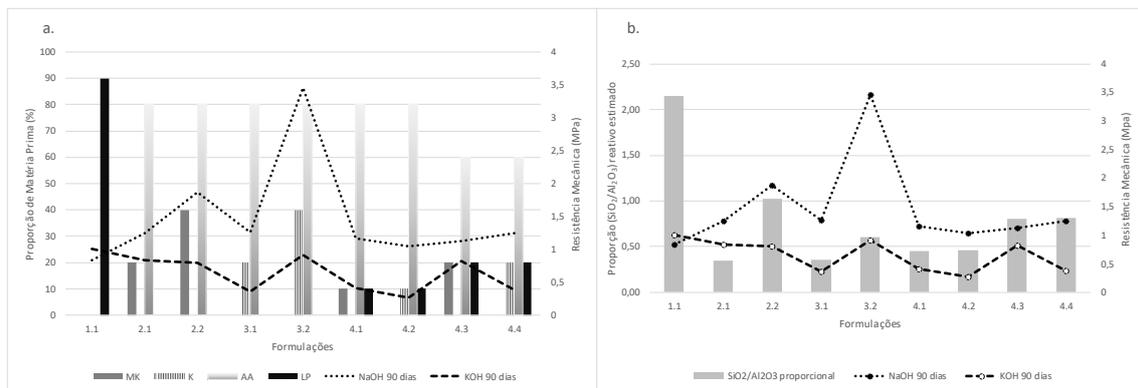


Figura 47: a. Comparação entre Resistência mecânica e a proporção de matéria-prima por formulação; b. Comparação entre Resistência mecânica e proporção ($\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$) reativa estimada.

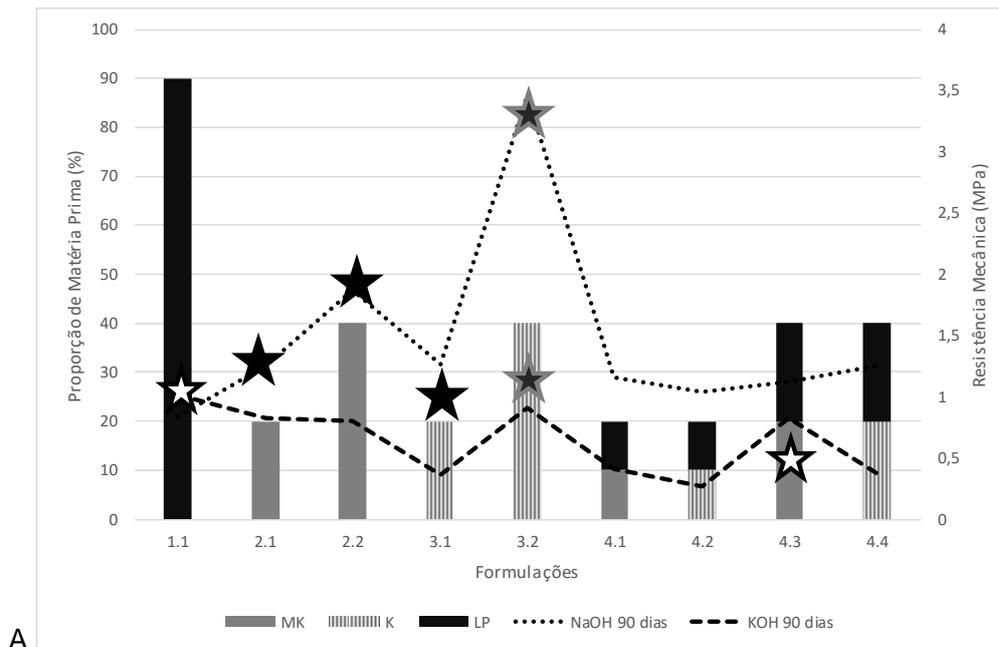


Figura 48: Correlação entre a proporção de metacaulino, caulino e lama da pateira nas formulações com a resistência mecânica aos 90 dias de cura, para NaOH e KOH.

Verifica-se que a formulação 1.1, que leva lama da Pateira e 10% do volume em palha, exibe melhor resistência quando ativado com KOH, em comparação com as formulações 4.3 e 4.4. As formulações do grupo 4 apresentam uma maior contribuição do caulino ou do metacaulino, entretanto não é o suficiente para elevar os valores de resistência mecânica tanto quanto na 1.1. Uma primeira observação para justificar maiores valores de resistência mecânica seria a presença da palha como estabilizante natural. A segunda observação é que a formulação 1.1 apresenta maior proporção $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ do que a 4.3 e a 4.4. Um terceiro aspecto a ser considerado é que o metacaulino e o caulino portaram-se melhor quando ativados com NaOH, enquanto a lama da pateira exibe melhor desempenho com o KOH, como indicado na Figura 48.

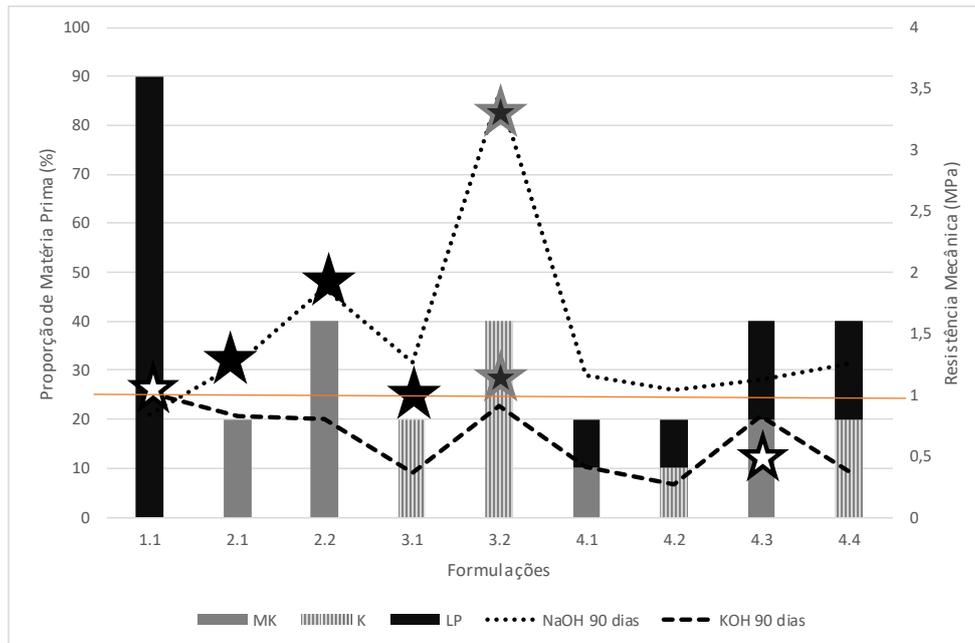


Figura 48: Correlação entre a proporção de metacaulino, caulino e lama da pateira nas formulações com a resistência mecânica aos 90 dias de cura, para NaOH e KOH.

Segundo Xu & Van Deventer (2000) os fatores químicos mais relevantes para a resistência mecânica são a quantidade de sílica, a percentagem de K_2O e o tipo de álcali utilizado como ativador. A Figura 49 apresenta a correlação entre a quantidade de silício proporcional a cada matéria-prima, bem como a percentagem de K_2O com os resultados de resistência mecânica obtidos para cada formulação, ao fim de 90 dias.

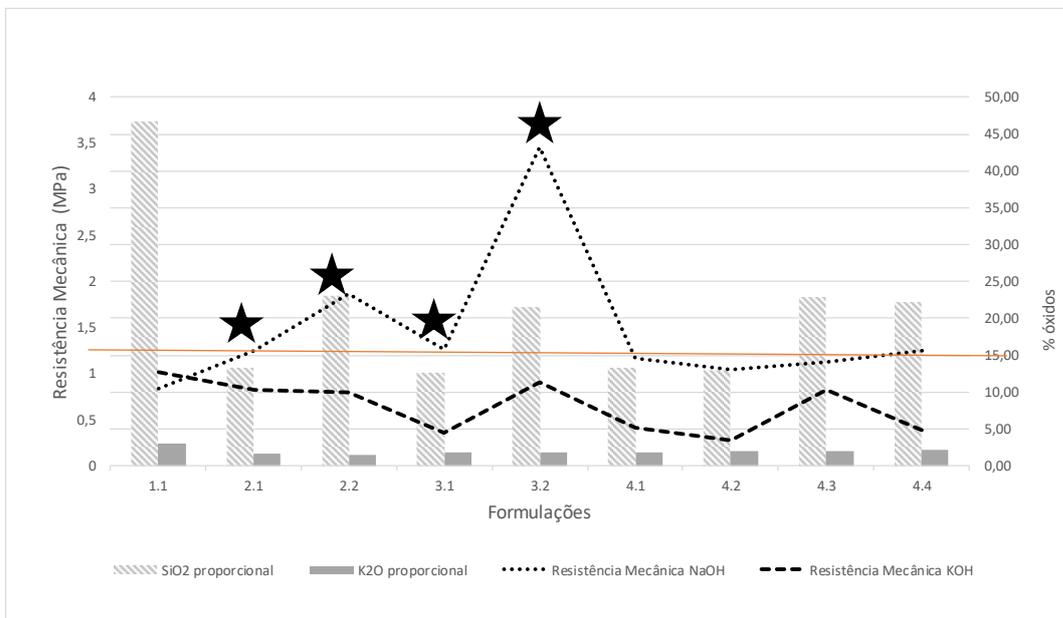


Figura 49: Correlação entre percentagem de SiO_2 e de K_2O disponível em cada formulação com a resistência mecânica aos 90 dias de cura, para os ativadores NaOH e KOH.

Observa-se que enquanto a percentagem de SiO_2 apresenta uma relação com os valores de resistência nas formulações sem lama da Pateira, a percentagem de K_2O

não apresenta uma correlação com os valores de resistência mecânica até então obtidos. Foram analisados os demais elementos maiores e não foram observadas outras correlações entre a resistência mecânica e as concentrações dos mesmos em cada formulação.

A ativação por NaOH apresentou maioritariamente resultados mais efetivos do que a ativação com o KOH nos ensaios de resistência mecânica e de absorção de água por capilaridade. De acordo com Xu & Van Deventer (2000), após a análise do efeito da ativação alcalina entre 16 minerais potenciais matérias-primas em ativações alcalinas, constataram que o hidróxido de sódio apresenta maior eficiência na dissolução dos minerais, à exceção da sodalite. Esta maior dissolução do hidróxido de sódio acaba por disponibilizar com mais eficiência o silício e a alumina para formar os géis, culminando em resultados de resistência mecânica mais elevados para as formulações ativadas com NaOH. Entretanto, estes mesmos autores observam que a presença de KOH normalmente, favorece maiores resistências mecânicas após a completa reação de ativação alcalina, o que ainda não pode ser observado nas formulações aqui analisadas.

Como já observado anteriormente, a composição das formulações ao reagir com os diferentes ativadores proporcionou efeitos distintos. Porém, não foi possível atribuir a quantidade de certo mineral ou elemento químico em particular, mas sim a combinação das matérias-primas. Da mesma forma que não foi possível justificar os valores maiores de resistência mecânica na formulação 3.2 para ambos os ativadores alcalinos.

Porém, vale ressaltar que as formulações que apresentaram maior valor de LOI proporcional foram a 1.1 e a 3.2, como verifica-se na Figura 50. Na 1.1 o material da perda ao rubro provém da lama da Pateira, enquanto na 3.2 maioritariamente do caulino. Na quantificação da matéria orgânica da lama da Pateira verificou-se que o LOI da FRX não corresponde integralmente a matéria orgânica, sendo uma parte atribuída a água intersticial, matéria orgânica total, carbono orgânico total e a carbonatos.

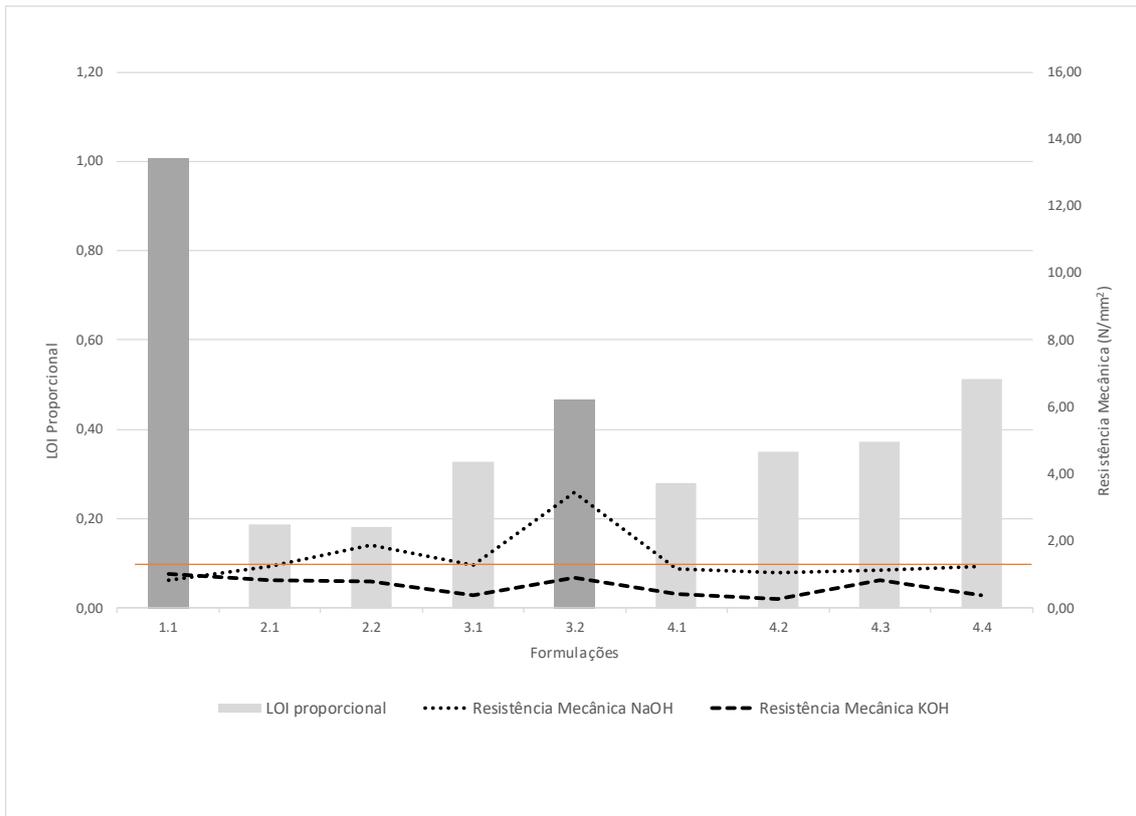


Figura 50: LOI e Resistência mecânica.

Os ensaios de resistência mecânica e de absorção de água por capilaridade permitiram avaliar as formulações testadas. A Figura 51 demonstra os valores de resistência mecânica da formulação 1.1 KOH e 3.2 NaOH. A formulação 1.1 apresenta os valores de absorção inferiores aos da água para ambos os ativadores alcalinos, enquanto a 3.2 apresenta resultados melhores que os da água na formulação ativada com NaOH (em destaque pelas estrelas na Figura 51). Outras formulações também apresentaram um desempenho mediano, como a 2.2 e a 4.3, ou ainda resistência mecânica superior a 1MPa (linha em destaque a vermelho). Entretanto a intensa formação de sais e a perda de massa experimentada por estas formulações, respectivamente, no ensaio de absorção de água por capilaridade inviabilizou a escolha das mesmas.

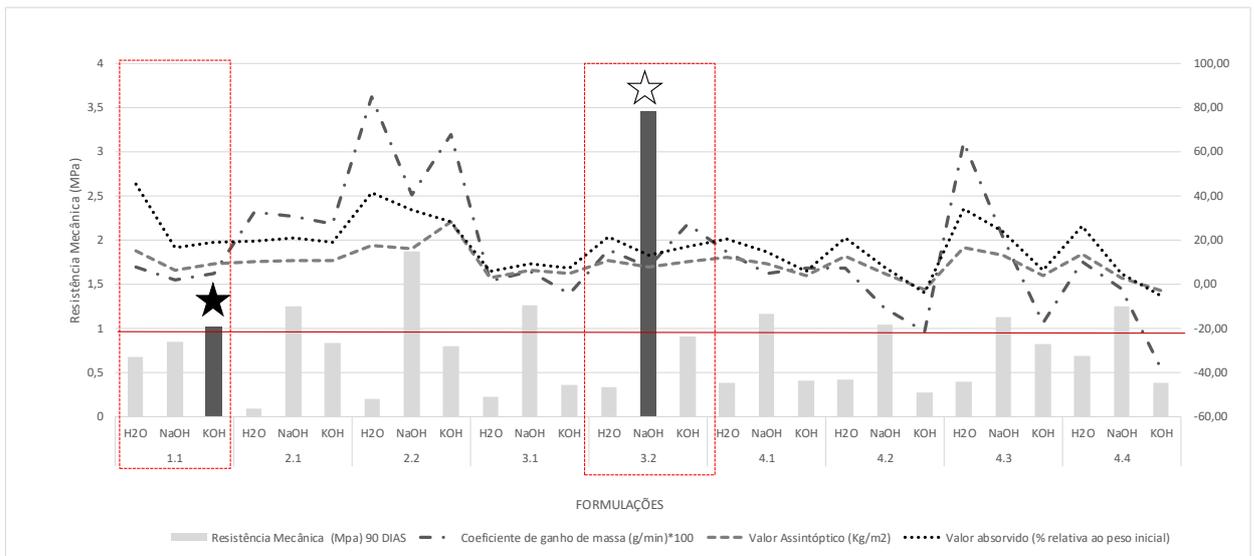


Figura 51: Formulações e resultados de resistência mecânica e ensaio de absorção de água por capilaridade aos 90 dias de cura.

A ativação alcalina favorece algumas propriedades destes materiais, no entanto, as amostras com Lama da Pateira sem ativação podem ser potenciais materiais sobretudo para trabalhos de reabilitação em que se colmatem apenas pequenas falhas ou fissuras em adobes já existentes.

O desempenho alcançado com a formulação 1.1 demonstra que a utilização de dois tipos de estabilizantes, o natural (palha) e o químico (ativação alcalina), teve êxito, uma vez que se constatou dentro dos parâmetros avaliados mais efeitos positivos do que negativos desta combinação.

Acredita-se que a partir das formulações 1.1 e 3.2 aqui apresentadas podem servir de ponto de partida para outros ensaios pertinentes para testar as potencialidades destes materiais para serem aplicados na reabilitação de edifícios antigos de adobe e ou na construção sustentável em adobe. Acredita-se que quer pelas composições usadas quer pelos resultados obtidos dos parâmetros estudados aqui temos uma boa base de compatibilidade destes novos materiais com adobes antigos. No entanto, as formulações 4 com lama da Pateira de Fermentelos depois de revistas as proporções dos materiais que as compõe tem também grandes potencialidades para reabilitação de edifícios em adobe.

Pretende-se realizar outros ensaios, como envelhecimento ativo, testes de absorção de sais e aplicação destes materiais em paredes de adobe antigas para testar a compatibilidade e aderência dos materiais, além de acompanhar as formulações durante os ensaios de 180 e 365 dias, com o intuito de verificar se a ativação alcalina

resultou em uma alteração mineralógica que favoreceu as propriedades de resistência mecânica e absorção de água por capilaridade.

Referências Bibliográficas

- AGRI-PRO AMBIENTE, C. S. . (2015). *EIA do Projeto de requalificação e valorização da Pateira de Fermentelos*: (Vol. I). Retrieved from http://siaia.apambiente.pt/AIADOC/AIA2775/rnt_rev022015171157.pdf
- AGS Mineraux. (2008). Argical-m 1200s. Clérac: AGS. Retrieved from <http://www.ags-mineraux.com>
- Almenares, R. S., Vizcaíno, L. M., Damas, S., Mathieu, A., Alujas, A., & Martirena, F. (2017). Industrial calcination of kaolinitic clays to make reactive pozzolans. *Case Studies in Construction Materials*, 6(January), 225–232. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2017.03.005>
- Azevedo, A. G. de S., Strecker, K., & Lombardi, C. T. (2018). Produção de geopolímeros à base de metacaulim e cerâmica vermelha. *Cerâmica*, 64(371), 388–396. <https://doi.org/10.1590/0366-69132018643712420>
- Benta, A. A. R. C. e A. da. (2007). *Aspectos do Comportamento Geomecânico da Formação “ Argilas de Aveiro .”* Universidade de Aveiro.
- Bruno, P. (2005). TAIPA MILITAR EM PORTUGAL - FORTIFICAÇÕES DO PERÍODO DE DOMÍNIO MUÇULMANO.
- Chamiñe, H. I., Gama Pereira, L. C., Fonseca, P. E., Noronha, F., & de Sousa Lemos, M. J. (2003). Tectonostratigraphy of the Porto-Albergaria-a-Velha-Coimbra-Tomar Shear Zone between Central-Iberian and Ossa-Morena Zones (Iberian Massif, W Portugal) | Tectonoestratigrafia da faixa de cisalhamento de Porto-Albergaria-a-Velha-Coimbra-Tomar, entre as Zon. *Cadernos Do Laboratorio Xeoloxico de Laxe*, 28(28), 37–78.
- Christoforou, E., Kylili, A., Fokaides, P. A., & Ioannou, I. (2016). Cradle to site Life Cycle Assessment (LCA) of adobe bricks. *Journal of Cleaner Production*, 112, 443–452. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.016>
- Ciancio, D., Jaquin, P., & Walker, P. (2013). Advances on the assessment of soil suitability for rammed earth. *Construction and Building Materials*, 42, 40–47. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.12.049>
- Coelho, A., Chaminé, H. I., Gomes, A., Fonseca, P. E., & Rocha, F. T. (2009). Depósitos de caulino associados à faixa metamórfica de Espinho-Albergaria-a-Velha (NW de Portugal): Quadro geológico estrutural e morfotectónico. *Cadernos Do Laboratorio Xeoloxico de Laxe*, (34), 89–120.

<https://doi.org/10.1016/j.physleta.2003.11.037>

- Costa, C., Cerqueira, Â., Rocha, F., & Velosa, A. (2018). The sustainability of adobe construction: past to future. *International Journal of Architectural Heritage*, 00(00), 1–9. <https://doi.org/10.1080/15583058.2018.1459954>
- Costa, C. S., Rocha, F., Varum, H., & Velosa, A. (2013). Influence of the mineralogical composition on the properties of adobe blocks from Aveiro, Portugal. *Clay Minerals*, 48(5), 749–758. <https://doi.org/10.1180/claymin.2013.048.5.07>
- Davidovits, J. (2015). *Geopolymer: Chemistry & Applications*. (J. Davidovits, Ed.) (4th ed.). Saint-Quentin. Retrieved from www.davidovits.info
- Dinis, P. (2006). Interpretação de ciclos deposicionais do Pliocénico-Plistocénico baseada em aspectos arquitecturais , texturais e composicionais Interpretation of Pliocene-Pleistocene depositional cycles on the basis. In *VII Congresso Nacional de Geologia* (pp. 591–594).
- Dobson, S. (2015). Rammed Earth in the Modern World. In D. Ciancio & C. Beckett (Eds.), *Rammed Earth Construction: Cutting-Edge Research on Traditional and Modern Rammed Earth* (pp. 3–10). Australia: CRC Press, Taylor & Francis Group, London, UK.
- dos Santos, C. A. (2015). CONSTRUÇÃO COM TERRA NO BRASIL: PANORAMA, NORMATIZAÇÃO E PROTOTIPAGEM COM TERRA ENSACADA. Florianópolis. Retrieved from <http://www.scielo.cl/pdf/udecada/v15n26/art06.pdf>
<http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84861150233&partnerID=tZOtx3y1>
- Duxson, P., Fernández-Jiménez, A., Provis, J. L., Lukey, G. C., Palomo, A., & Van Deventer, J. S. J. (2007). Geopolymer technology: The current state of the art. *Journal of Materials Science*, 42(9), 2917–2933. <https://doi.org/10.1007/s10853-006-0637-z>
- Ebeling, A. G., Anjos, L. H. C., Pereira, M. G., Valladares, G. S., & Pérez, D. V. (2013). Substâncias húmicas e suas relações com o grau de subsidência em Organossolos de diferentes ambientes de formação no Brasil. *Revista Ciencia Agronomica*, 44(2), 225–233. <https://doi.org/10.1590/S1806-66902013000200003>
- Eler, K., Pardo, E. S., & Rodriguez-Navarro, C. (2015). Alkaline activation as an alternative method for the consolidation of earthen architecture. *Journal of Cultural Heritage*, 16(4), 461–469. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2014.09.012>

- Fernandes, J., Mateus, R., & Bragança, L. (2016). Arquitectura vernácula portuguesa: Lições de Sustentabilidade para a arquitectura contemporânea. *1.º Colóquio Internacional Arquitectura Popular*, 773–789. Retrieved from <http://hdl.handle.net/1822/43322>
- Fernandes, M., & Tavares, A. (2016). *O Adobe*. (Argumentum, Ed.). Lisboa.
- Garcia-Lodeiro, I., Palomo, A., & Fernández-Jiménez, A. (2015). Crucial insights on the mix design of alkali-activated cement-based binders. In F. Pacheco-Torgal, J. Labrincha, C. Leonelli, A. Palomo, & P. Chindaprasit (Eds.), *Handbook of Alkali-Activated Cements, Mortars and Concretes* (pp. 49–73). Elsevier. <https://doi.org/10.1533/9781782422884.1.49>
- Gomes, N. D. B. (2015). Caracterização de blocos de terra para construção de alvenarias ecoeficientes.
- Hammond, G., & Jones, C. (2011). *Embodied Carbon The Inventory of Carbon and Energy (ICE)*. (F. Lowrie & P. Tse, Eds.). BSRIA.
- Houben, H., & Guillaud, H. (1989). *Traité de construction en terre*.
- Houben, H., & Guillaud, H. (1994). *Earthen architecture: A comprehensive guide*. (CRATerre, Ed.).
- Huseien, G. F., Ismail, M., Tahir, M., Mirza, J., Hussein, A., Khalid, N. H., & Sarbini, N. N. (2018). Effect of binder to fine aggregate content on performance of sustainable alkali activated mortars incorporating solid waste materials. *Chemical Engineering Transactions*, 63(May), 667–672. <https://doi.org/10.1109/iThings/CPSCCom.2011.127>
- Jiménez Delgado, M. C., & Guerrero, I. C. (2007). The selection of soils for unstabilised earth building: A normative review. *Construction and Building Materials*, 21(2), 237–251. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.08.006>
- Jorge Junior, A. M., & Botta Filho, W. J. (2012). Introdução à Microscopia Eletrônica de Varredura e Microanálise. São Carlos: UFSCAR - Laboratório de Caracterização Estrutural (LCE).
- Kullberg, J. C., Rocha, R. B. A. F., Soares, J., Rey, P., Terrinha, P., Callapez, L., ... Lisboa. (2006). A Bacia Lusitaniana: Estratigrafia, Paleogeografia E Tectónica. *Ciências Terra Amadora Lisboa*, 4(456), 317–368.
- Mikutta, R., Kleber, M., Kaiser, K., & Jahn, R. (2005). Review: Organic matter removal from soils using hydrogen proxide, sodium hypochlorite, and disodium

- peroxidisulfate. *Soil Science Society of America Journal*, 69(1), 120. <https://doi.org/10.2136/sssaj2005.0120>
- Millogo, Y., Aubert, J.-E., Séré, A. D., Fabbri, A., & Morel, J.-C. (2016). Earth blocks stabilized by cow-dung. *Materials and Structures*, 49(11), 4583–4594. <https://doi.org/10.1617/s11527-016-0808-6>
- Minke, G. (2001). *Manual de construcción para viviendas antisísmicas de tierra*. (A. Universidad de Kassel & Primera, Eds.), *Manual de construcción para viviendas antisísmicas de tierra* (2nd ed., Vol. 1). Universidad de Kassel.
- Neves, C., & Faria, O. B. (2011). *Técnicas de Construção com terra. Feb-Unesp / Proterra*. Retrieved from http://www.promemoria.indaiatuba.sp.gov.br/arquivos/proterra-tecnicas_construcao_com_terra.pdf#page=16
- Neves, C. M. M., Faria, O. B., Rotondaro, R., Cevallos, P. S., & Hoffmann, M. V. (2009). *Red Iberoamericana Proterra Rede Ibero-Americana Proterra*. (PROTERRA, Ed.). Retrieved from <https://www.ecoagricultor.com/wp-content/uploads/2014/03/seleccion-de-suelos.pdf>
- Oliveira, V., Marat-Mendes, T., & Pinho, P. (2015). O estudo da Forma Urbana em Portugal, (September), 250. Retrieved from <https://books.google.com/books?id=8uvRCgAAQBAJ&pgis=1>
- Pacheco-Torgal. (2015). *Eco-efficient Masonry Bricks and Blocks*. (S. K. and P. C. F. Pacheco-Torgal, P.B. Lourenço, J.A. Labrincha, Ed.). Elsevier Ltd.
- Pacheco-Torgal, F., & Jalali, S. (2012). Earth construction: Lessons from the past for future eco-efficient construction. *Construction and Building Materials*, 29, 512–519. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.10.054>
- Papayianni, I., & Pachta, V. (2017). Earth Block Houses of Historic Centers. A Sustainable Upgrading with Compatible Repair Materials. *Procedia Environmental Sciences*, 38, 274–282. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2017.03.076>
- Parra-Saldivar, M. L., & Batty, W. (2006). Thermal behaviour of adobe constructions. *Building and Environment*, 41(12), 1892–1904. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.07.021>
- Pérez, D. V., Rigo, M. M., & Marques, M. da C. (2015). Fase Líquida: a Solução do Solo. In R. R. Nunes & M. O. O. Rezende (Eds.), *Recurso Solo: propriedades e usps* (1st ed.). São Carlos: Editora Cubo.

- Phair, J. W., & Van Deventer, J. S. J. (2001). Effect of silicate activator pH on the leaching and material characteristics of waste-based inorganic polymers. *Minerals Engineering*, 14(3), 289–304. [https://doi.org/10.1016/S0892-6875\(01\)00002-4](https://doi.org/10.1016/S0892-6875(01)00002-4)
- Piattoni, Q., Quagliarini, E., & Lenci, S. (2011). Experimental analysis and modelling of the mechanical behaviour of earthen bricks. *Construction and Building Materials*, 25(4), 2067–2075. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.11.039>
- Ramos, I. D. (2015). *LA PIEL DE LA ARQUITECTURA DE TIERRA: SUSTANCIAS NATURALES AL SERVICIO DE LA RESTAURACIÓN DE SUPERFICIES DEL PATRIMONIO*. Departamento de Construcción Arquitectónica Escuela Técnica Superior de Arquitectura. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria.
- Rocha, F. J. F. T. (1993). *Argilas aplicadas a estudos litoestratograficos e paleoambientais na Bacia Sedimentar de Aveiro*. Universidade de Aveiro. Retrieved from <http://hdl.handle.net/10773/4386>
- Rotondaro, R. (2011). Adobe. In PROTERRA (Ed.), *Técnicas de Construção com terra* (pp. 16–25). Bauru: Rede Ibero Americana PROTERRA.
- Sabir, B. B. (2001). Metakaolinite and Clacined Clays As Pozzolans Fro Concrete: a Reveiw. *Cement and Concrete Composites*, 23(6), 441–454. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(00\)00092-5](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(00)00092-5)
- Sena, C. (2007). *Interacções Água Superficial – Água Subterrânea Na Zona Da Pateira De Fermentelos (Portugal)*. Aveiro. Retrieved from <http://hdl.handle.net/10773/2701>
- Severo, C. G. S., Costa, D. L., Bezerra, I. M. T., Menezes, R. R., & Neves, G. A. (2013). Características, particularidades e princípios científicos dos materiais ativados alcalinamente. *Revista Eletrônica de Materiais e Processos*, 82, 55–67. Retrieved from <http://www2.ufcg.edu.br/revista-remap/index.php/REMAP/article/viewFile/334/276>
- Silveira, D., Varum, H., Costa, A., Martins, T., Pereira, H., & Almeida, J. (2012). Mechanical properties of adobe bricks in ancient constructions. *Construction and Building Materials*, 28(1), 36–44. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.08.046>
- Tavares, A., Costa, A., & Varum, H. (2012a). Adobe and Modernism in Ílhavo, Portugal. *International Journal of Architectural Heritage*, 6(5), 525–541. <https://doi.org/10.1080/15583058.2011.590267>
- Tavares, A., Costa, A., & Varum, H. (2012b). Adobe and modernism in Ihavo, Portugal.

International Journal of Architectural Heritage, 6(5), 525–541.
<https://doi.org/10.1080/15583058.2011.590267>

- Terroso, D. L. G. de F. (2005). Argilas / Lamas e Águas Termais das Furnas (Açores): Avaliação das Propriedades Físicas e Químicas relevantes para a utilização em Peloterapia.
- Torres, C., & Macias, S. (1995). A Arte Islâmica no Ocidente Andaluz. In P. Pereira (Ed.), *História da Arte Portuguesa* (pp. 150–177). Lisboa: Círculo de Leitores.
- Varum, H., Martins, T., & Velosa, A. (2005). Caracterização do adobe em construções existentes na região de Aveiro. *IV SIACOT Seminário Ibero-Americano de Construção Com Terra e III Seminário Arquitectura de Terra Em Portugal*, 233–235.
- Velho, J., Miranda, A., & Cerdeira, M. (2016). O greisen do depósito de caulino de S. Vicente de Pereira Jusã (Ovar): análise geoquímica da associação quartzomoscovite. In *Modelação de sistemas geológicos: livro de homenagem ao Professor Manuel Maria Godinho* (pp. 419–428). Imprensa da Universidade de Coimbra. https://doi.org/10.14195/978-989-26-1009-2_32
- Volhard, F. (2015). *Light Earth Building : A Handbook for Building with Wood and Earth* (2nd ed.). Basel, Switzerland: Birkhauser.
- Xu, H., & Van Deventer, J. S. J. (2000). The geopolymerisation of alumino-silicate minerals. *International Journal of Mineral Processing*, 59(3), 247–266. [https://doi.org/10.1016/S0301-7516\(99\)00074-5](https://doi.org/10.1016/S0301-7516(99)00074-5)

Normas

BS EN ISO 17892-1:2014, BS EN ISO 17892-2:2014 Methods of test for soils for civil engineering purposes. Classification tests-ISBN0 580 17867 6–Publisher: BSI.

LNEC E 196: 1967. Solos: Análise Granulométrica.