



**JOÃO ANTÓNIO
DE SOUSA
CARVALHEIRAS**

**ESTUDO DA RECICLAGEM DE RESÍDUOS DE FIBRAS
DE VIDRO EM GEOPOLÍMEROS, ARGAMASSAS E
TELAS DE IMPERMEABILIZAÇÃO**



Universidade de Aveiro
Ano 2016

Departamento de Engenharia de Materiais e
Cerâmica

**JOÃO ANTÓNIO
DE SOUSA
CARVALHEIRAS**

**ESTUDO DA RECICLAGEM DE RESÍDUOS DE FIBRAS
DE VIDRO EM GEOPOLÍMEROS, ARGAMASSAS E
TELAS DE IMPERMEABILIZAÇÃO**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Materiais, realizada sob a orientação científica do Doutor João António Labrincha Batista, Professor Associado com Agregação do Departamento de Engenharia de Materiais e Cerâmica da Universidade de Aveiro e do Doutor Rui Miguel Teixeira Novais Bolseiro de pós-Doutoramento do Departamento de Engenharia de Materiais e Cerâmica da Universidade de Aveiro.

o júri

Presidente

Prof. Doutor Fernando Manuel Bico Marques
Professor Catedrático do Departamento de Engenharia de Materiais e Cerâmica
da Universidade de Aveiro

Vogais

Prof. Doutora Ana Luísa Pinheiro Lomelino Velosa
Professora Associada do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de
Aveiro

Prof. Doutor João António Labrincha Batista (orientador)
Professor Associado com Agregação do Departamento de Engenharia de
Materiais e Cerâmica da Universidade de Aveiro

agradecimentos

Às empresas Ria Blades S.A. e Saint-Gobain Weber Portugal, S.A. pela disponibilidade de me receberem nas suas instalações e pelo fornecimento de material para a elaboração dos trabalhos propostos.

Em especial a toda a equipa do laboratório da Saint-Gobain Weber pelo apoio técnico, assim como pela partilha de conhecimentos.

À Universidade de Aveiro, em especial aos departamentos de Engenharia de Materiais e Cerâmica e de Engenharia Civil, pelos recursos disponibilizados e pelo contributo na minha formação académica.

A todas as pessoas que me ajudaram na realização deste trabalho.

Ao Prof. Doutor João Labrincha e ao Doutor Rui Novais por toda a partilha de conhecimentos e tempo disponibilizado durante a realização deste trabalho.

À minha mãe e aos meus irmãos, pelo incentivo, carinho e dedicação que sempre demonstraram.

A todos os amigos e colegas pelo constante apoio e motivação.

palavras-chave

materiais de construção, telas de impermeabilização, argamassas, geopolímeros, fibras de vidro.

resumo

Desenvolveu-se uma parceria entre a Universidade de Aveiro, Ria Blades, S.A. e Saint-Gobain Weber Portugal, S.A. com objetivo de encontrar formas de aproveitamento dos resíduos de fibra de vidro produzidos na Ria Blades, S.A., que atualmente são depositados em aterro.

O trabalho incidiu em três produtos-alvo: telas de impermeabilização, argamassas e geopolímeros.

No que diz respeito às telas de impermeabilização, de base polimérica (poliuretano), os resíduos foram aplicados como agente de reforço. Estudou-se o efeito da incorporação das fibras na aderência, na resistência à tração e na durabilidade perante ciclos de gelo-degelo. Quando incorporadas fibras de vidro, registou-se um aumento na aderência ao suporte relativamente à amostra padrão e um crescimento (de cerca de 20 vezes) na resistência à tração.

Na incorporação em argamassas bastardas, o objetivo foi perceber o efeito da substituição das fibras poliméricas atualmente usadas, pelas fibras de vidro residuais. Estudou-se o efeito na percentagem de ar incorporado e densidade do amassado, bem como a variação de massa e de dimensão, módulo de elasticidade, resistência à compressão e flexão do produto endurecido. A incorporação de fibra de vidro não aparenta prejudicar o desempenho das argamassas, sendo os resultados semelhantes nas amostras padrão. Apesar de as quantidades incorporadas serem apenas de 0,1%, é possível que a utilização destes resíduos tenha impactos economicamente positivos para as duas empresas.

Nos geopolímeros, a incorporação das fibras de vidro pretendeu explorar dois efeitos distintos: (i) como ligante, em substituição parcial de metacaulino (até 40% em massa); (ii) como agente de reforço da mistura. Numa primeira fase, foi necessário caracterizar as matérias primas e os resíduos para respeitar as razões molares que asseguram uma maior extensão da reação. Foram avaliadas a densidade aparente, resistência à compressão, absorção de água ao longo do tempo de cura e ainda a resistência à flexão no caso de as fibras funcionarem como agente de reforço. Como substituto parcial do metacaulino verifica-se uma descida na resistência à compressão com o aumento de resíduo de fibra de vidro. No entanto com a otimização da formulação com 20% de fibras de vidro foi possível duplicar o valor da resistência à compressão (> 8MPa). Como agente de reforço, os resultados mostram ganhos de resistência à compressão de 4 vezes quando se incorporam fibras de 6mm de comprimento, relativamente a amostras sem reforço. O uso de fibras mais longas (20mm) é mais eficaz no aumento da resistência à flexão.

keywords

building materials, waterproofing kits, mortars, geopolymers, glass fibers.

abstract

A partnership has been developed between the University of Aveiro, Ria Blades, S.A. and Saint-Gobain Weber Portugal, S.A. in order to find a way to recycle the glass-fibre residues produced from Ria Blades, S.A. that are currently being sent to landfill.

Three possible target-products were exploited: waterproofing membrane, mortars and geopolymers.

On the waterproofing membrane, based on polyurethane, the residues were incorporated as reinforcing agents and effects on adhesion, tensile strength and resistance to freeze-thaw cycles were determined. An increase of 20 times on the tensile strength has been registered, relatively to the standard sample.

On mortars, the aim was to understand the effect of the substitution of the currently used reinforcing-fibres for the wasted glass-fibres. Fresh-state properties such as the entrained air content and density were evaluated. The effect on relevant hardened-state properties was then studied, including the variation of mass and dimensions, the compressive and flexural strengths, and elastic modulus. The behaviour of the mortars doesn't seem to be affected by the incorporation of glass-fibres because the results from both the mortars with and without glass-fibres are similar. Although the quantity of incorporated glass-fibres is only around 0,1%, its use may have positive economic benefits for both companies.

In geopolymers, the incorporation of wasted glass-fibres aimed to explore two distinct effects: (i) use as binder, partially substituting the metakaolin (up to 40 wt.%); (ii) use as reinforcing agent of common matrixes. On the first stage it was necessary to characterize both the raw materials and the glass-fibres, in order to achieve the desirable molar ratios that assure an extended reaction. Hardened samples were characterized in terms of density, compressive strength and water absorption. In the attempted reinforced geopolymers the flexural strength was additionally tested. When the glass-fibres were used as partial substitute of metakaolin, a drop of the compressive strength was observed for higher contents of glass-fibres. Optimizing the mixture for 20 % of glass-fibres allowed to duplicate the compressive strength (> 8 MPa). When 6 mm glass-fibres were used as a reinforcing agent, the compressive strength increased 4 times when compared to samples without reinforcement. Using 20 mm fibres is the most effective way of improving flexural strength.

Índice

Índice de figuras.....	i
Índice de tabelas.....	iv
1 Enquadramento.....	1
2 Introdução.....	4
2.1 Telas de impermeabilização.....	4
2.1.1 Resistência química.....	4
2.1.1.1 Poliuretano.....	5
2.2 Argamassas.....	6
2.2.1 Tipos de argamassa.....	6
2.2.2 Constituintes.....	6
2.2.2.1 Agregados.....	6
2.2.2.2 Ligantes.....	7
2.2.3 Aditivos.....	8
2.2.4 Principais funções.....	8
2.2.5 Incorporação de fibras.....	10
2.3 Geopolímeros.....	12
2.3.1 Designação.....	13
2.3.2 Processo de geopolimerização.....	14
2.3.2.1.1 Uso de resíduos de vidro.....	15
2.3.2.2 Ativador alcalino e razões molares.....	15
3 Procedimento experimental.....	17
3.1 Telas.....	17
3.1.1 Testes de aderência.....	17
3.1.2 Determinação da resistência à tração.....	19
3.1.3 Resistência a ciclos de gelo-degelo.....	19
3.2 Argamassas.....	19
3.2.1 Argamassas usadas.....	19
3.2.2 Produção das argamassas.....	20
3.2.3 <i>Determinação da trabalhabilidade</i>	21
3.2.4 <i>Massa específica do amassado</i>	23
3.2.5 <i>Ar incluído</i>	23
3.2.6 <i>Fissuração plástica</i>	24
3.2.7 <i>Ensaio mecânicos</i>	25
3.2.7.1 Resistência à Flexão.....	25
3.2.7.2 Resistência à compressão.....	25
3.2.8 Módulo de <i>Young</i>	26

3.2.9	Testes de aderência.....	26
3.2.10	Absorção de água por capilaridade	26
3.2.11	Módulo de flexão transversal	27
3.2.12	Teste de impacto	28
3.3	Geopolímeros.....	29
3.3.1	Caracterização das matérias-primas	29
3.3.1.1	Difração de Raios X (DRX)	29
3.3.1.2	Fluorescência de Raios X (FRX)	29
3.3.1.3	Análise microestrutural.....	29
3.3.1.4	Granulometria.....	29
3.3.2	Preparação dos geopolímeros.....	30
4	Discussão de resultados	31
4.1	Telas de impermeabilização	31
4.1.1	Ensaio preliminares: otimização do processo de aplicação	31
4.1.2	Estudo do reforço da matriz polimérica com agentes de reforço	33
4.1.2.1	Testes de aderência	34
4.1.2.2	Ensaio mecânicos	37
4.2	Argamassas.....	39
4.2.1	Cal Classic	39
4.2.1.1	Estado fresco.....	39
4.2.1.2	Propriedades após endurecimento	41
4.2.1.2.1	Ensaio mecânicos	43
4.2.1.2.2	Absorção de água por capilaridade	45
4.2.2	Cal Decor	46
4.2.2.1	Caracterização no estado fresco.....	46
4.2.2.2	Propriedades do material endurecido	47
4.2.2.2.1	Resistência mecânica	48
4.2.2.2.2	Absorção de água por capilaridade	49
4.2.3	Therm Pro.....	50
4.2.3.1	Propriedades no estado fresco.....	50
4.2.3.2	Propriedades do material endurecido	50
4.2.3.2.1	Testes de aderência	50
4.2.3.2.2	Testes de impacto.....	53
4.3	Geopolímeros.....	54
4.3.1	Caracterização das matérias-primas	54
4.3.2	Caracterização dos geopolímeros endurecidos	59

4.3.2.1	Fibra de vidro como substituinte parcial do metacaulino	59
4.3.2.2	Fibra de vidro como agente de reforço	69
5	Conclusões e Trabalho Futuro.....	76
	Bibliografia	78

Índice de figuras

Figura 1 - Imagem ilustrativa de uma hélice produzida pela Ria Blades [1].	1
Figura 2 - Fibras de vidro com diferentes orientações: a) não orientadas; b) orientadas a 90° e c) orientadas a 45°.	1
Figura 3 - Mecanismo de aderência de uma argamassa a) num suporte de absorção muito baixo; b) suporte de coeficiente de absorção médio; c) suporte com coeficiente de absorção muito alto [15].	10
Figura 4 - Exemplo de curvas de força em função do deslocamento para a) argamassa sem fibras; b) argamassas com volume de fibras inferior ao volume crítico; c) argamassa com volume de fibras igual ou superior ao volume crítico [19].	11
Figura 5 - Classificação dos geopolímeros de acordo com a razão Si:Al; a) PS; b) PSS; c) PSDS [33].	13
Figura 6 - Dinamómetro usado para medição dos ensaios de resistência à aderência.	18
Figura 7 - Fibras de vidro cortadas com 6mm de comprimento.	20
Figura 8 - Misturadora usada para homogeneizar os componentes das argamassas.	20
Figura 9 – Equipamento usado para realizar o flow test. a) Pilão; b) molde; c) mesa de espalhamento.	22
Figura 10 - Equipamento de medição de ar incluído de uma argamassa.	24
Figura 11 - Aplicação de argamassa para o teste de fissuração plástica.	24
Figura 12 - Modo de incorporação da fibras de vidro na membrana polimérica para se perceber qual a melhor forma de incorporação da mesmas: a) camada inicial de membrana 0,5mm; b) camada inicial de membrana 1mm; c) camada inicial 1mm mas com segunda camada aplicada no dia seguinte.	31
Figura 13 - Resultados das aderências (em MPa) obtidos nos ensaios de otimização da incorporação das fibras em membrana polimérica.	32
Figura 14 - Provetes após o teste de aderência, permitem ver o efeito de se aplicar a membrana polimérica com diferente intervalo temporal.	32
Figura 15 - Ilustração do estado final dos provetes após o ensaio de aderências. A sequência das imagens (da esquerda para a direita caso) corresponde às amostras preparadas de acordo com a metodologia A, B e C.	33
Figura 16 - Comparação entre os valores obtidos nos ensaios de aderência antes e após ciclos de gelo-degelo.	34
Figura 17 - Provetes resultantes dos ensaios de aderência antes dos ciclos gelo-degelo.	35
Figura 18 - Provetes resultantes dos ensaios de aderência após os ciclos gelo-degelo.	36
Figura 19 - Resultados obtidos nos ensaios de tração antes e após ciclos de gelo-degelo.	37
Figura 20 - Imagem ilustrativa do resultado do flow test das diferentes composições de Cal Classic.	40
Figura 21 - Estado das amostras submetidas ao ensaio de fissuração plástica após um dia de cura; A) amostra padrão, B) amostra com fibras de vidro.	41
Figura 22 - Variação da dimensão das amostras ao longo do tempo de cura.	42
Figura 23 - Variação da massa das argamassas ao longo do tempo de cura.	42
Figura 24 – Tensão de aderência das diferentes amostras de Cal Classic.	44

Figura 25 - Tipo de rutura apresentada pelas amostras após os testes de aderências: à esquerda a amostra padrão, à direita a amostra com fibras de vidro. _____	45
Figura 26 - Coeficiente de absorção de água por capilaridade de argamassas curadas 28 dias. _____	45
Figura 27 - Interior das amostras após ensaio de capilaridade. _____	46
Figura 28 – Retração das amostras Cal Decor com o tempo de cura. _____	47
Figura 29 - Variação de massa ao longo do tempo de cura das amostras de Cal Decor. ____	48
Figura 30 - Coeficiente de absorção de água por capilaridade das amostras de Cal Decor curadas 28 dias. _____	49
Figura 31 - Aderências sobre o substrato de EPS. _____	51
Figura 32 - Aderência sobre o substrato de betão. _____	52
Figura 33 - DRX dos componetes sólidos usados na formulação de geopolímero: metacaulino em cima e pó moido de resíduo de fibra de vidro em baixo. _____	54
Figura 34 - Espetro de EDS realizado à amostra de Fibra de Vidro. _____	55
Figura 35 - Espetro EDS realizado ao pó de metacaulino. _____	56
Figura 36 - Distribuição granulométrica das partículas de fibra de vidro após moagem e peneiração. _____	57
Figura 37 - Distribuição granulométrica das partículas de metacaulino. _____	57
Figura 38 - Imagens obtidas em SEM das fibras de vidro moidas. _____	58
Figura 39 - Imagens obtidas por SEM das partículas de metacaulino. _____	59
Figura 40 - Evolução da densidade aparente dos geopolímeros com o tempo de cura. ____	61
Figura 41 - Evolução da resisitência à compressão ao longo do tempo e com o teor de resíduo de fibra de vidro em substituição de metacaulino. _____	62
Figura 42 - Imagens obtidas por SEM da superfície de fractura das amostras sujeitas a compressão após 28 dias de cura; a)100% metacaulino; b)10% fibra de vidro; c)20% fibra de vidro; d)30% fibra de vidro; e)40% fibra de vidro. _____	63
Figura 43 - Imagens obtidas por SEM da superfície de fractura das amostras sujeitas a compressão após 28 dias de cura, com superior ampliação que a Figura 42. _____	64
Figura 44 - Provete fraturado após imersão em água. _____	65
Figura 45 - Amostras de geopolímeros com eflorescências após absorção de água por capilaridade. _____	66
Figura 46 - Comparação da resistencia à compressão entre amostras contendo 20% de fibra de vidro em substituição de metacaulino, curadas 28 dias, mas preparadas com quantidades distintas de silicato de sódio. _____	67
Figura 47 - Comparação das densidade aparentes das diferentes formulações contendo fibras de vidro como agente de reforço. _____	69
Figura 48 - Resistencia à compressão de amostras geopoliméricas contendo diferentes quantidades de fibra de vidro (6mm) como agente de reforço e para distintos tempos de cura. 70	
Figura 49 - Resistencia à compressão de amostras contendo diferentes quantidades de fibra de vidro (20mm) como agente de reforço, curadas por tempos distintos. _____	71
Figura 50 - Estado final dos provetes após os ensaios de compressão: a) amostra não reforçada; b) amostra reforçada com fibra de vidro (2% em massa, fibras de 6 mm). _____	71

Figura 51 - Imagens obtidas por SEM das amostras sujeitas a compressão após 28 dias de cura; a) 0,20% fibra de vidro; b) 1,00% fibra de vidro. _____ 72

Figura 52 - Imagens obtidas por SEM das amostras sujeitas a compressão após 28 dias de cura; a) 0,10% fibra de vidro; b) 0,20% fibra de vidro; c) 1,00% fibra de vidro; d) 2,00% fibra de vidro. _____ 73

Figura 53 - Resistência à flexão das amostras contendo diferentes quantidades de fibra de vidro (6mm) como agente de reforço e curadas em dois períodos distintos. _____ 74

Figura 54 - Resistencia à flexão das amostras com diferentes quantidades de fibra de vidro (20mm) como agente de reforço, curadas em períodos distintos. _____ 75

Índice de tabelas

Tabela 1 - Quantidade de resíduos produzidos na Ria Blades em dezembro de 2015. ____	2
Tabela 2- Condições de mistura da argamassa Cal Classic. _____	20
Tabela 3- Condições de mistura da argamassa Cal Decor. _____	21
Tabela 4 - Condições de mistura da argamassa Therm Pro. _____	21
Tabela 5 - Tempos de cura em condições controlada. _____	25
Tabela 6 - Comparação entre o padrão produzido na Weber com a substituição das fibras por resíduos da Ria Blades. _____	40
Tabela 7 - Modulo de Young medido nas amostras de Cal Classic com os diferentes tipos de fibra. _____	43
Tabela 8 – Valores de resistência mecânica à flexão e compressão de amostras curadas 28 dias. _____	43
Tabela 9 - Densidades dos amassados de Cal Decor. _____	46
Tabela 10 - Módulo de Young medido nas amostras de Cal Decor curadas durante 14 e 28 dias. _____	48
Tabela 11 – Valores de resistência mecânica das amostras de Cal Decor após 28 dias de cura. _____	49
Tabela 12 - Densidade e percentagem de ar incluído nos amassados das amostras Therm Pro. _____	50
Tabela 13 - Observações efetuadas no ensaio de impacto das diferentes argamassas. ____	53
Tabela 14 – Composição química do metacaulino e dos resíduos de fibra de vidro. ____	55
Tabela 15 – Relações molares relevantes no processo de geopolimerização correspondentes às diferentes formulações testadas. _____	60
Tabela 16 – Valores de absorção de água das amostras curadas durante 28 dias. _____	65
Tabela 17 - Comparação de densidades aparentes das amostras produzidas com 20%FV, inicialmente e sua otimização. _____	67
Tabela 18 - Comparação entre a absorção de água das amostras contendo 20% de fibra de vidro, antes e após otimização da formulação. _____	68

1 Enquadramento

A Ria Blades S.A. é uma empresa, atualmente parte do grupo alemão SENVION, situada no distrito de Aveiro, na localidade Salgueiro, que se dedica à produção de hélices para sistemas de geração eólica (Figura 1), contando atualmente com cerca de 1000 colaboradores.



Figura 1 - Imagem ilustrativa de uma hélice produzida pela Ria Blades [1].

As hélices são produzidas em material compósito, de resina epoxídica com reforço por fibras de vidro, usando-se telas ou mantas contendo fibras em quantidades distintas e dispostas em orientações diferenciadas. As fibras podem ser aplicadas sem orientação definida ou orientadas a 45° ou 90° (Figura 2).

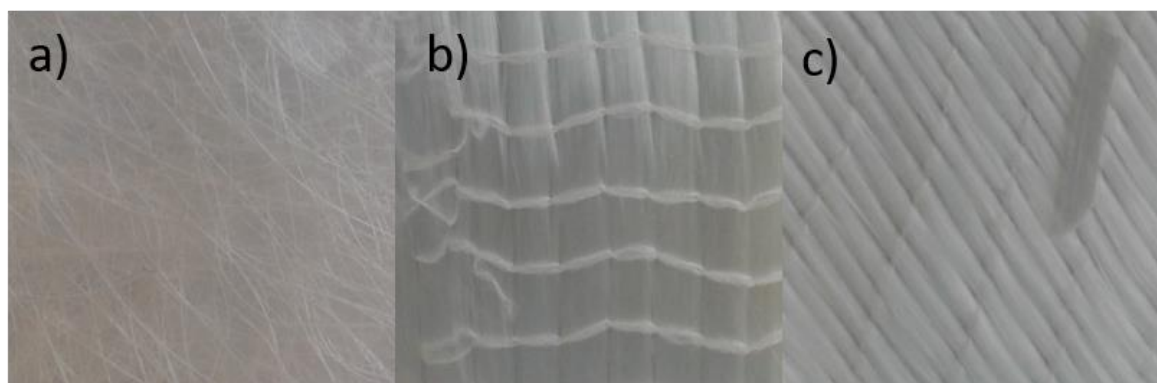


Figura 2 - Fibras de vidro com diferentes orientações: a) não orientadas; b) orientadas a 90° e c) orientadas a 45° .

O ajuste dimensional aos modelos em produção obriga ao corte das mantas e, apesar da otimização existente, gera uma quantidade considerável de resíduos. Em média são gerados cerca de 30 ton./mês, embora existam picos de geração de resíduos que atingem 60 ton. em alguns meses do ano. Na Tabela 1 pode ver-se detalhadamente a quantidade de resíduos produzidos na fábrica por mês de laboração tendo em conta os tipos de fibra usada.

Tabela 1 - Quantidade de resíduos produzidos na Ria Blades em dezembro de 2015.

	<i>Tipo de fibra</i>	<i>Ton. /mês</i>
BIAX 45	<i>Fibra de vidro que tem orientação a 45° e -45°</i>	21,5
UD	<i>Fibra de vidro que possui orientação apenas numa direção</i>	6,6
BIAX 90	<i>Fibra de vidro que tem orientação a 90° e -90°</i>	2,5
Total		30,6

As fibras de vidro são produzidas com base no sistema ternário $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-CaO}$, podendo conter quantidades de MgO [2]. O processo típico de produção das fibras de vidro consiste em misturar as matérias primas, colocando-as em seguida num forno. Atingem-se normalmente temperaturas entre 1050°C e 1450°C, para garantir que as inclusões gasosas são libertadas e o produto fundido é homogeneizado e afinado (a temperaturas que rondam 1260°C). O vidro afinado é depois extrudido em forma de fibras [3].

O facto de se utilizarem altas temperaturas no processo de fabrico das fibras de vidro eleva o seu custo de produção devido ao elevado consumo energético. Neste sentido, é essencial para a empresa maximizar o aproveitamento das fibras, de modo a diminuir os custos de produção das pás eólicas, bem como diminuir/eliminar a necessidade de deposição em aterro dos resíduos gerados, com elevados custos ambientais e económicos. É objetivo deste projeto estudar formas de valorização destes resíduos em diferentes produtos-alvo (argamassas, telas de impermeabilização e geopolímeros).

A Saint-Gobain Weber Portugal, S.A. tem como principal foco a produção de argamassas industriais, contendo algumas delas fibras na sua composição. Esta empresa mostrou-se disponível para colaborar no estudo de valorização das fibras de vidro residuais, em substituição das que

atualmente utilizam na produção de algumas argamassas. Além disso, mostrou interesse em colaborar no desenvolvimento de telas de impermeabilização à base de poliuretano reforçadas com as fibras de vidro residuais.

Finalmente, uma vertente mais académica do trabalho foi dedicada ao desenvolvimento de geopolímeros. Estes materiais emergem como ligante alternativo ao cimento Portland, cuja produção requer quantidades consideráveis de energia e gera 5 a 7 % de CO₂ antropogénico presente na atmosfera [4]. Para além da menor pegada ambiental, as formulações geopoliméricas podem incorporar diferentes resíduos industriais, tais como escórias de alto-forno e de fundição de diferentes metais, cinzas volantes, resíduos de vidro e lamas vermelhas [5–8] Neste trabalho testou-se o uso de fibras de vidro residuais.

Depois de uma avaliação inicial foi decidido estudar a incorporação destes resíduos em três matrizes:

- Incorporação em telas de impermeabilização poliméricas (de poliuretano), como agente de reforço.
- Incorporação em argamassas bastardas, como agente de reforço e que atenua os riscos de fissuração.
- Incorporação em matrizes geopoliméricas, como componente ativável ou ligante (substituto de metacaulino, o material normalmente utilizado) ou como agente de reforço mecânico em formulações comuns.

2 Introdução

2.1 Telas de impermeabilização

Para proteger edifícios contra a humidade e corrosão dos componentes de reforço do betão armado, normalmente de aço, utilizam-se normalmente telas de impermeabilização. São produzidas à base de material polimérico ou elastomérico, sendo poliuretano uma matriz comum. Na impermeabilização de um edifício existem algumas particularidades que não podem ser ignoradas aquando da aplicação das telas. As ligações entre elementos verticais e horizontais são locais críticos de acumulação de humidade e onde a ligação é mais difícil de conseguir. Para além do efeito impermeabilizante, as telas devem resistir às solicitações mecânicas e agressões atmosféricas. Propriedades como a deformação até à rutura, resistência à perfuração, resistência a altas temperaturas, flexibilidade e resistência a agentes ambientais (chuva, radiação UV) são relevantes no desempenho do material [9].

Quando se adicionam fibras de vidro os benefícios esperados incluem [10]:

- Aumento de resistência mecânica e rigidez;
- reforço direcional e concentrado nas zonas/planos de maior exposição/agressão, com ganho e eficiência no consumo de material;
- facilidade de aplicação, em particular no confronto com chapas de aço;
- transporte e entrega de forma facilitada e flexível (em rolos de dimensão ajustada).

O reforço fibroso tem no aumento de custo a principal desvantagem, causada pela maior complexidade e exigências de processamento.

2.1.1 Resistência química

Esta propriedade depende da composição química do material. As fibras de vidro sofrem degradação em ambientes alcalinos, caso não sofram nenhuma operação de pré-tratamento adequada. Caso haja penetração de humidade através do polímero, que sofre degradação sob ação do calor e radiação UV [11], as fibras acabam por ser atingidas. A presença de iões de cloro na água, por exemplo em instalações à beira-mar, pode causar defeitos na superfície das fibras e reduzir a sua resistência à tração. Por isso, o polímero tem um papel vital na proteção das fibras e na durabilidade do compósito. Para além de poliuretano, usam-se polímeros acrílicos, resinas

epoxídicas, polissulfuretos, policloreto de vinil (PVC), neopreno (também chamado policloropreno) e silicones na concepção de telas de impermeabilização.

2.1.1.1 Poliuretano

Devido à sua resistência química e mecânica, resistência à abrasão, elasticidade e resistência à biodegradação, o poliuretano (PU) é um dos materiais mais usados na produção de telas de impermeabilização. Saxena *et al.* indicam que o poliuretano apresenta excelente aderência ao substrato (em geral de betão), boa flexibilidade e resistência à abrasão. É também fortemente impermeável à água. O coeficiente de expansão térmica é ajustado para valores comparáveis aos de argamassas e cimentos ($\approx 7,2-19,8 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$) [12]. Isto indica que o filme possui flexibilidade suficiente para lidar com o movimento térmico e humidade dos substratos. Nos testes de pulverização de água sobre as telas, realizados por aqueles autores, não foi observada presença de humidade no substrato cimentício, enquanto sem tela a base cimentícia já apresentava humidade ao fim de apenas 3h [12].

2.2 Argamassas

Na construção civil os materiais usados influenciam a qualidade final da construção, pelo que facilmente se percebe que as inovações na construção estão associadas ao desenvolvimento de materiais com melhores propriedades. As argamassas de uso generalizado são formuladas a partir de cimento Portland, dada a rapidez no ganho de resistência mecânica com o tempo de cura e na possibilidade de se atingirem valores elevados de resistência mecânica. A constituição da argamassa é baseada no princípio que os espaços existentes no volume de agregados, cerca de 25-40%, devem ser preenchidos com ligante para garantir máxima compacidade e coesão à mistura [13].

2.2.1 Tipos de argamassa

As argamassas podem ser classificadas consoante a aplicação. Assim, existem argamassas de revestimento, argamassas para suporte e para juntas, e argamassas de cimento-cola. Argamassas de alvenaria são utilizadas para muros e paredes. As principais características são resistência a variações térmicas, resistência à humidade e aderência à estrutura. Argamassas de revestimento são usadas para revestir paredes e muros, podem receber uma vasta gama de acabamentos, por exemplo pintura. Têm a vantagem de ser aplicadas numa só camada, o que oferece rapidez e fácil aplicação. Argamassas para suporte de pavimento são usadas essencialmente na regularização de pavimentos, para nivelar e alisar a superfície. A resistência à compressão é uma característica desejada para esta aplicação. Argamassas para juntas são utilizadas para preencher as juntas entre os elementos de revestimento e têm uma componente estética associada ao desejável desempenho mecânico. Os cimentos-cola são na realidade misturas de ligantes hidráulicos, cargas e aditivos orgânicos devendo ser misturados com água. São usados essencialmente para colar corpos cerâmicos sobre uma estrutura, quer no chão (horizontal) quer em parede (vertical) [13].

2.2.2 Constituintes

2.2.2.1 Agregados

Os agregados constituem o componente mais volumoso das argamassas e a sua composição e quantidade influencia o desempenho do produto. É um material com atividade química quase nula e pode ser classificado segundo a origem: natural, industrial ou reciclado. Para além da baixa atividade química, devem possuir reduzido coeficiente de expansão térmica [13].

Os agregados naturais, como as areias, são principalmente constituídos por quartzo, que pode ser abundantemente encontrado na natureza, mas podem também conter impurezas como materiais argilosos e componentes orgânicos que diminuem a sua qualidade [13, 14].

2.2.2.2 *Ligantes*

Os ligantes são materiais de baixa granulometria que quando misturados com água formam uma pasta que endurece devido a reações de hidratação, promovendo a ligação entre os agregados. São sobretudo materiais cimentícios, gesso ou cal [13].

Os ligantes de base cimentícia são os mais utilizados. São materiais que endurecem por reações de hidratação e apresentam ainda uma boa capacidade de aglomerar os agregados, o que permite o fabrico de argamassas [13]. Ligantes de gesso são usados devido à facilidade de produção e à sua fácil moldagem. A facilidade de obtenção do gesso a baixas temperaturas e a presa rápida são vantagens óbvias, mas a baixa resistência e solubilidade, quando expostas à chuva, restringem a sua aplicação em argamassas (possível apenas em climas secos ou para interior) [14]. Ligantes de cal são constituídos principalmente por óxido de cálcio hidratado, que reage exotermicamente em contacto com a água. Têm também a capacidade de reagir com o dióxido de carbono atmosférico e endurecer lentamente ao ar [13].

Nas décadas mais recentes têm crescido as preocupações ambientais associadas ao uso de materiais, a que a indústria da construção não é alheia. A produção de cimento Portland gera uma quantidade expressiva de CO₂ (cerca de 800 Kg por cada tonelada de produto) [15], e este material é sobretudo consumido pela indústria da construção. Uma forma de melhorar o desempenho ambiental dos produtos é substituir aquele ligante por outros menos “agressivos”, sendo a cal hidráulica uma alternativa. Um dos problemas na utilização de argamassas à base de cal está ligado com uma considerável retração durante o processo de cura e, conseqüentemente, a indesejável tendência para fissuração. Este problema pode ser minimizado pela incorporação de fibras como reforço. Estas podem evitar a fissuração pela redução da retração, podendo também melhorar algumas propriedades do produto, tais como a capacidade de deformação, resistência à flexão e durabilidade. Estes aspetos são válidos não só nas argamassas com cal hidráulica como também nas argamassas de base cimentícia [16, 17].

2.2.3 Aditivos

Os aditivos são materiais adicionados à argamassa para alterar as suas características, tanto na fase de amassado (estado fresco) como após endurecimento. Podem ter várias funções [18]:

- **Promotores de aderência;**
- **Introdutores de ar**, têm a capacidade de introduzir ar durante a amassadura de forma controlada, melhorando a resistência aos sais e ao efeito gelo-degelo;
- **Plastificantes**, aumentam a trabalhabilidade sem que seja necessário aumentar o teor de água, garantindo superior resistência mecânica;
- **Agentes expansivos**, têm como objetivo reduzir a retração durante o processo de cura;
- **Retentores de água**, são usados para que não ocorra perda de água para o meio ambiente e assim garantir que a hidratação seja mais completa;
- **Cargas leves**, usadas para baixar a densidade; no entanto as misturas necessitam de maior quantidade de teor de água, o que provoca maior retração;
- **Fungicidas**, impedem a criação de fungos e bolores;
- **Pigmentos ou corantes;**
- **Fibras**, que aumentam a resistência à tração e a ductilidade, aumentando a resistência ao choque e a coesão da argamassa.

2.2.4 Principais funções

As principais funções que as argamassas devem cumprir incluem [13]:

- União de elementos e ajudar a suportar os esforços que ocorrem nas paredes, por exemplo de corte e flexão;
- fecho de juntas contra infiltrações de água;
- colagem de materiais cerâmicos, de revestimento ou pavimento;
- regularização de pavimentos;
- reparação de obras;
- acabamento de tetos e paredes.

A argamassa deve ser aplicação fácil (adequada trabalhabilidade), ter elevada aderência e compatibilidade com os outros componentes da estrutura. A trabalhabilidade pode ser influenciada pela quantidade de ligantes, de agregados e de água adicionada. Contudo a modificação dos constituintes das argamassas pode ter um efeito nocivo em outras propriedades como por exemplo na resistência à compressão, flexão e permeabilidade.

As principais exigências da argamassa incluem a resistência à fissuração e a tensões de tração a que está sujeita. A resistência à fissuração depende não só das características da argamassa, mas também das condições de aplicação, do ambiente e das forças a que vai estar sujeita [19].

Como as argamassas de um modo geral são materiais de porosidade aberta por onde o vapor de água pode penetrar, a sua capacidade de impermeabilização deve ser conhecida. A capacidade de impermeabilização é determinada pela capacidade de resistir à penetração de água ou vapor de água proveniente do exterior, e pela capacidade de permitir a eliminação da mesma assim que existam condições para tal. O excesso de água não é necessário para a hidratação e pode provocar o aparecimento de fungos e bolores indesejados e consequente degradação da argamassa. O tipo de ligante e de agregado, e as quantidades relativas de ambos, condicionam a permeabilidade.

A boa aderência ao suporte é fundamental para o cumprimento de todas as funções que a argamassa deve conferir à construção, influenciando ainda significativamente a existência de fissuração. Caso a aderência não seja suficiente podem existir zonas a suportar diferentes tensões. Por norma, as argamassas aderem por penetração capilar da água que arrasta consigo componentes mais finos. Para que a ligação seja boa é necessário que estas partículas finas sejam capazes de endurecer rapidamente. Na Figura 3 pode observar-se o efeito do grau de absorção no suporte: a) fraca aderência, b) aderência média, quando a argamassa penetra nos poros e cristaliza, e c) boa aderência, onde grande parte da argamassa penetra nos poros e cristaliza [19].

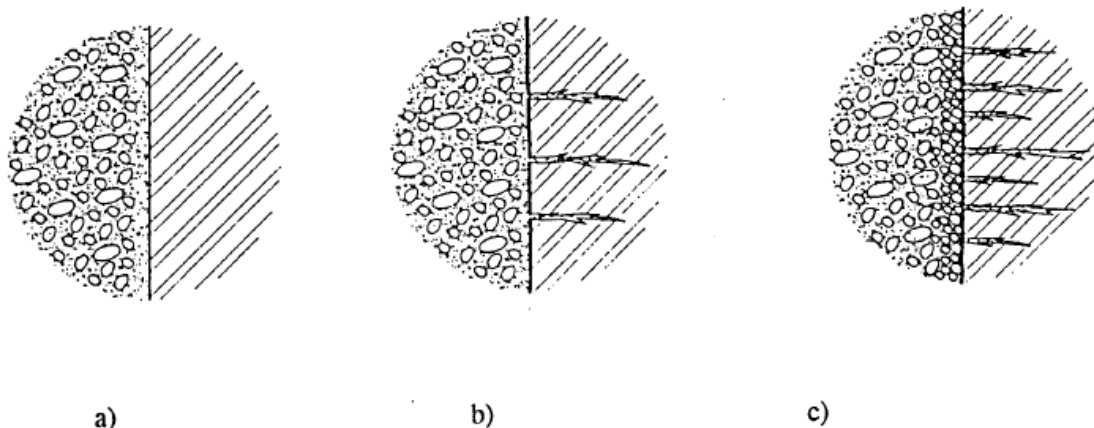


Figura 3 - Mecanismo de aderência de uma argamassa a) num suporte de absorção muito baixo; b) suporte de coeficiente de absorção médio; c) suporte com coeficiente de absorção muito alto [15].

Isto significa que a aderência da argamassa depende das características do suporte. Pode verificar-se que os suportes com alguma rugosidade melhoram a aderência, reforçando a ligação mecânica. No entanto, uma capacidade de adsorção da água elevada pode ser desfavorável, provocando a secagem rápida da argamassa o que pode impedir a hidratação dos seus constituintes [19].

A resistência ao impacto é importante nos casos em que a argamassa se aplica numa camada de reduzida espessura. Pode ser aumentada com a incorporação de fibras de vidro, reforços de rede metálica, ou outros materiais sintéticos de reforço [20].

2.2.5 Incorporação de fibras

O reforço por fibras é uma forma comum de melhorar algumas das propriedades referidas. Têm sido testadas fibras de vidro, fibras de basalto e fibras de poliacrilonitrila [16, 21]. As misturas com fibras possuem maior resistência à tração, à flexão e ao impacto, para além de superior ductilidade. No entanto, as exigências de formulação e processamento são maiores, para evitar aumentos de porosidade que acarretem diminuição da resistência à compressão. Tal como em qualquer material compósito, a combinação de componentes distintos pode originar discontinuidades e perda de compacidade [22]. As características das fibras que influenciam o comportamento do “compósito” são:

- resistência à tração e módulo de elasticidade;
- aderência à matriz;

- comprimento e diâmetro;
- orientação da fibra.

É assim possível definir um limite mínimo de fibras que deve ser incorporado num corpo, chamado de *volume crítico de fibras*. Este é o volume mínimo de fibras que após o aparecimento da primeira fenda é capaz de suportar a totalidade da força que o “compósito” suportava antes. Por outras palavras é o volume de fibras que tem a capacidade de assegurar deformação plástica à argamassa. Na Figura 4 podem observar-se os diferentes comportamentos mecânicos de argamassas com e sem fibras [19].

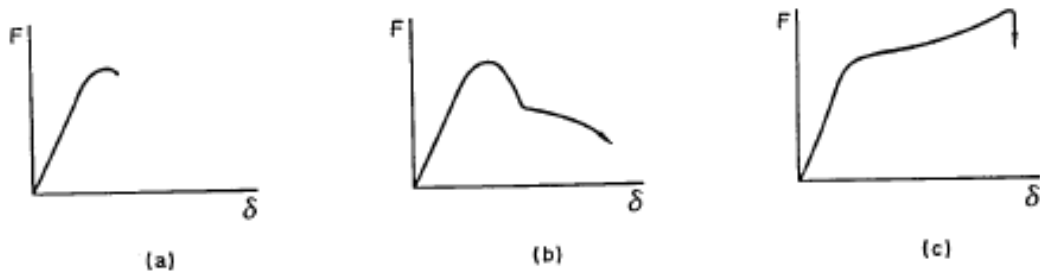


Figura 4 - Exemplo de curvas de força em função do deslocamento para a) argamassa sem fibras; b) argamassas com volume de fibras inferior ao volume crítico; c) argamassa com volume de fibras igual ou superior ao volume crítico [19].

A Figura 4a mostra a curva força-elongamento típica de uma argamassa que, como outros materiais cerâmicos, é frágil e não apresenta regime plástico. A incorporação de fibras pode garantir ductibilidade e evitar rutura frágil (Figura 4c).

Por norma as argamassas apresentam poros com cerca de 1-3 μm de diâmetro, mas com fibras na sua composição os poros podem atingir diâmetros até 100-200 μm [16]. Este efeito resulta da diminuição da trabalhabilidade das misturas com fibras e é mais severo nas argamassas à base de cal, por causa do efeito negativo sobre os processos de hidratação ou de carbonatação [16]. Para contrariar os efeitos adversos descritos, prescreve-se a adição de pozolanas, cuja composição química e elevada área superficial específica promove a interação com partículas de cal, originando produtos de reação estáveis para tempos de cura superiores [23].

Um dos potenciais problemas associados ao uso de vidro em produtos cimentícios é a possibilidade de sofrerem reações químicas do tipo álcalis-silica. Esta reação envolve o ataque da fase siliciosa pela solução alcalina, com formação de um gel que pode absorver água e, dessa forma, sofrer aumento de volume (expansão). Se acontecer de forma expressiva numa estrutura endurecida, origina tensões internas que alteram a microestrutura do material e podem causar fissuração tardia [7].

2.3 Geopolímeros

Os geopolímeros, também designados como polímeros inorgânicos, são materiais compostos por aluminossilicatos [24]. Devido às suas propriedades físicas e químicas, os geopolímeros são utilizados para o desenvolvimento de uma vasta gama de produtos que se adaptam a uma grande variedade de aplicações em diferentes áreas, incluindo materiais de construção, pavimentação rodoviária e remediação ambiental (imobilização de resíduos tóxicos, metalúrgicos e de mineração). Além disso, têm a capacidade de transformar um elevado volume de resíduos em produtos com valor de mercado, oferecendo também uma forma de reduzir significativamente as emissões com gases de efeito estufa [25].

Ao contrário dos cimentos comuns, que utilizam clínquer, obtido a temperaturas elevadas, os geopolímeros são obtidos a partir de aluminossilicatos processados em condições mais favoráveis que aqueles. As condições de cura, necessárias para a ocorrência das reações de endurecimento, são moderadamente exigentes, sendo comparáveis às que se desenvolvem nos polímeros orgânicos, ocorrendo a temperaturas inferiores a 100 °C [26].

A produção de um geopolímero envolve a adição de um aluminossilicato (normalmente sólido) a um ativador alcalino (p.e. hidróxido de sódio). Uma grande diversidade de aluminossilicatos pode ser usada na produção de geopolímeros. A título de exemplo indica-se o caulino, ilite, cinzas volantes, alguns resíduos da construção civil, pozolanas ou escórias de alto forno. No entanto, o material mais utilizado é o caulino calcinado (metacaulino), a temperaturas entre os 700 °C e 850 °C [27]. O metacaulino é tipicamente constituído por sílica (50-55%) e alumina (40-45%) [28]. A sua ação pozolânica em betões e cimentos está bem documentada [24, 29-30].

Geopolímeros formulados à base de metacaulino, comparativamente com outros aluminossilicatos, apresentam superior resistência mecânica e menor porosidade e absorção de água (menor permeabilidade e transporte de sais), podendo funcionar como adesivos e materiais de revestimento [25].

A possibilidade de utilizar resíduos de vidro, provenientes da reciclagem de embalagens ou de lâmpadas, na produção de geopolímeros foi demonstrada em diferentes trabalhos [6, 31]. Maranan *et al.* sugerem a incorporação de fibras de vidro como agente de reforço [32].

2.3.1 Designação

De forma a tornar a nomenclatura menos complexa, tal como nos polímeros orgânicos, adotou-se o termo “sialato” para designar os geopolímeros. Sialato deriva do inglês “*sialate*”, que é a abreviatura de *silicon-oxo-aluminate*. O “sialato” é uma rede de tetraedros de SiO_4 e AlO_4 ligados alternadamente por átomos de oxigénio compartilhados, envolvendo iões positivos como o Na^+ , K^+ , Li^+ , Ca^{2+} , Ba^{2+} para equilibrar as cargas negativas do ião Al^{3+} no estado de coordenação IV. Sendo assim uma fórmula empírica para os geopolímeros, ou polysialatos, é a seguinte:

$$M_n \{-(\text{SiO}_2)_z - \text{AlO}_2\}_n \cdot w\text{H}_2\text{O} \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

M é um dos iões positivos acima mencionados;

n é o grau de polimerização;

w é o grau de hidratação;

z é o numero de unidades de SiO_2 e pode ser 1, 2 ou 3 [26]

A variação de z na Equação 1 origina três tipos de geopolímeros, cuja estrutura se pode ver na Figura 5:

z=1 corresponde a poli(sialatos) designados por PS;

z=2 corresponde a poli(sialatos-siloxo) designados por PSS;

z=3 corresponde a poli(sialato-disiloxo) designados por PSDS.

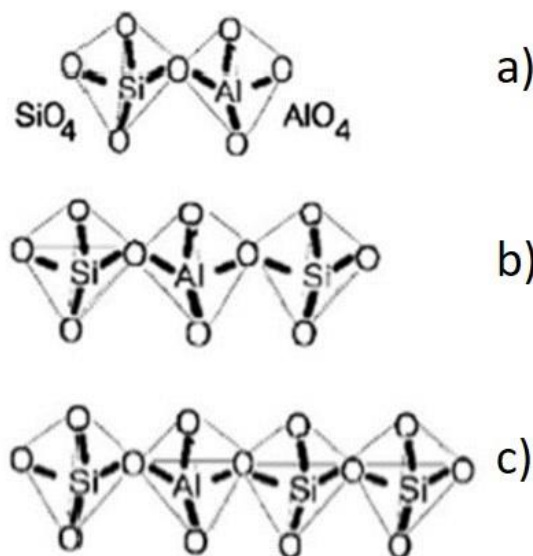


Figura 5 - Classificação dos geopolímeros de acordo com a razão Si:Al; a) PS; b) PSS; c) PSDS [33].

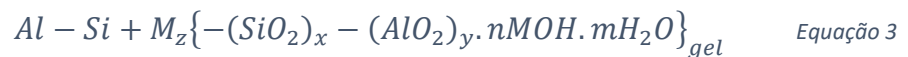
2.3.2 Processo de geopolimerização

A geopolimerização é um processo exotérmico, que permite o endurecimento, através de reações químicas, de óxidos de aluminossilicatos com polisilicatos alcalinos resultando uma estrutura Si-O-Al. O princípio envolve a decomposição de um óxido de um aluminossilicato numa solução de MOH (onde M é um metal alcalino), através de processos de difusão e transporte de Al e Si. Forma-se um gel resultante da polimerização do silicato presente na solução com os complexos de Al e Si, que endurece mais tarde [24].

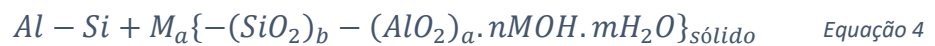
Segundo Xu e Van Deventer pode ser proposto o seguinte mecanismo de geopolimerização [27]:



↓



↓



Nas equações acima, Al-Si representa aluminossilicatos.

Numa primeira fase ocorre a dissolução, neste processo são usadas elevadas concentrações de silicatos, especialmente quando se usa silicato de sódio. Devido à adição de sódio (ou outro metal alcalino) ocorre a rutura da ligação Si-O-Si, formando-se ligações Si-O-Na⁺. Os grupos hidroxilo ((OH)⁻) têm função idêntica na ligação Al-O-Si, o que forma complexos $Al(OH)_4^-$ ou $Al(OH)_6^{3-}$. Numa solução alcalina com elevada concentração de Al e Si podem, potencialmente, formar-se complexos de Al-O-Si. Os grupos $Al(OH)_4^-$ não se combinam facilmente com pequenos oligómeros de silicato altamente carregados, como são os monómeros de silicato. Daí a necessidade de adicionar silicato de sódio (Na_2SiO_3), para garantir a concentração de Si suficiente em solução alcalina para iniciar a geopolimerização. O Na^+ , devido ao seu menor tamanho comparativamente com o K^+ , promove a formação de ligações mais fortes com os oligómeros de silicato mais pequenos, o que permite a formação de oligómeros de silicato maiores [34].

Numa etapa seguinte, de transporte e orientação devido à acumulação de produtos forma-se uma estrutura coagulada onde ocorre policondensação e forma-se um gel. Após a formação do gel o sistema continua a rearranjar-se e a organizar-se formando-se a rede tridimensional de Si e Al [35].

2.3.2.1.1 Uso de resíduos de vidro

Resíduos de vidro têm a vindo a ser estudados para substituir o silicato de sódio, assim como o metacaulino, pois apresentam altos teores de SiO_2 , constituindo uma forma de reciclagem alternativa [6, 36]. O facto de o silicato de sódio ser obtido a $1300\text{ }^\circ\text{C}$ e o metacaulino a cerca de $750\text{ }^\circ\text{C}$ penaliza o custo e a pegada ambiental dos geopolímeros. Assim, a substituição (ainda que parcial) destes componentes por resíduos de vidro diminui a energia incorporada nos produtos [36]. Vários autores têm vindo a investigar o uso de resíduos de vidro de diferentes proveniências na formulação de geopolímeros, incluindo vidro de embalagem, da produção de painéis solares e vidro TFT-LCD [6, 36–39]. Neste estudo, será estudada a substituição parcial do metacaulino por resíduos de fibra de vidro.

A percentagem de resíduos de vidro a incorporar nas formulações é limitada pela diminuição de resistência mecânica, causada por alterações microestruturais decorrentes de aumento da razão molar de $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ [39]. A concentração de ativador é outro fator a controlar [36–38]. Em geral, a temperatura incrementa a cinética da reação e, conseqüentemente, favorece a evolução da resistência mecânica com o tempo de cura [6]. Também a granulometria dos reagentes, neste caso do pó de vidro, afeta o endurecimento: em geral, maior finura assegura aumento de reatividade e, conseqüentemente, maior ganho de resistência mecânica [6].

2.3.2.2 *Ativador alcalino e razões molares*

Os estudos realizados indicam que qualquer catião alcalino pode ser usado como ativador alcalino, mas os mais estudados são o Na^+ e K^+ . Num destes estudos [24], obtiveram-se melhores propriedades quando a concentração de Na era suficiente para promover o balanço de carga no mecanismo de substituição de Si por Al nos tetraedros da estrutura, mas não em excesso que possa conduzir à formação de carbonato de sódio. Os ativadores alcalinos têm a capacidade de controlar e afetar todas as etapas de geopolimerização e, em particular, a do endurecimento do gel e formação de cristais. Como foi dito anteriormente, a diferença de tamanho entre o catião Na^+ e o K^+ também influencia a reação de geopolimerização. A adição de KOH tende a aumentar o grau de geopolimerização, enquanto o NaOH aumenta a quantidade de monómeros de silicato. Os ativadores controlam a quantidade de produto da reação sendo, por isso, a relação entre $\text{SiO}_2/\text{M}_2\text{O}$ um dos fatores críticos na produção de geopolímeros. A proporção de $\text{SiO}_2/\text{M}_2\text{O}$ afeta o grau de polimerização das espécies dissolvidas. Se o teor de sílica é superior a velocidade da reação diminui [24].

Já no que diz respeito ao tempo de endurecimento, é controlado pelo teor de alumina presente e aumenta com a relação entre $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$. Se o teor de alumina aumenta, a relação entre sílica e alumina diminui, originando um produto com baixa resistência mecânica. Daí ser sugerida uma relação molar adequada entre os compostos, de modo a produzir geopolímeros com boas propriedades e durabilidade. Os valores indicados na literatura são de 0,2-0,48 para $\text{M}_2\text{O}/\text{SiO}_2$; 3,3-4,5 para $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$; 10-25 para $\text{H}_2\text{O}/\text{M}_2\text{O}$; e 0,8-1,6 para $\text{M}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ [24].

3 Procedimento experimental

3.1 Telas

Para a produção das telas foi usada uma membrana de aplicação líquida constituída por resinas elastoméricas e hidrofóbicas de poliuretano (MARISEAL® 250), que apresentam elevada resistência mecânica, química, térmica, e a radiações UV, bem como resistência a elementos naturais. Esta membrana cura pela reação com o substrato e humidade presente no ar [40].

Além de resíduos de fibra de vidro fornecidos pela Ria Blades, também foram incorporados nas telas, outros agentes de possível reforço fornecidos pela Weber (geotêxtil e rede polimérica). Realizaram-se ensaios de tração, de aderência e determinou-se a durabilidade perante ciclos de gelo-degelo.

A preparação das telas envolveu os seguintes passos:

- Isolar no suporte a área a usar para que se obtenha o tamanho desejado;
- Colocar a primeira camada de membrana líquida;
- Colocar sobre a primeira camada de membrana a fibra de vidro, exercendo um pouco de pressão para melhorar a aderência;
- Aplicar a camada final de membrana líquida;
- Deixar curar ao ar e temperatura ambiente.

3.1.1 Testes de aderência

O teste de aderência é um ensaio destrutivo, que permite perceber qual a força necessária para que determinado material se separe de um suporte.

Para realizar testes de aderência prepararam-se amostras por métodos ligeiramente diferentes:

1. Aplicando uma camada fina de membrana polimérica (cerca de 0,5mm) seguida de fibra de vidro e outra camada final de membrana polimérica;
2. Aplicando uma camada mais espessa de membrana polimérica (cerca de 1mm) seguida de fibra de vidro e de nova camada de membrana polimérica;

3. Aplicando uma camada mais espessa de membrana polimérica (cerca de 1mm), seguida de fibra de vidro e de camada final de membrana polimérica, aplicada após um dia de cura.

A determinação da aderência envolve:

- o isolamento da área suficiente no suporte para realizar pelo menos 5 ensaios;
- aplicação das camadas e cura ao ar e temperatura ambiente;
- corte de secções quadradas (50mm×50mm) do conjunto tela e suporte;
- colagem, com resina epoxídica, do disco metálico com um furo, que mais tarde irá apertar um parafuso para permitir o arrancamento do material;
- cura de 24h e uso de dinamómetro (Figura 6) para realizar o arrancamento, registrando-se força necessária.

Depois de serem recolhidos e analisados os dados, repetiram-se as medições das aderências para os diferentes tipos de reforço, seleccionando-se o resultado que correspondia ao valor médio superior.



Figura 6 - Dinamómetro usado para medição dos ensaios de resistência à aderência.

3.1.2 Determinação da resistência à tração

Os provetes foram produzidos sobre uma placa cerâmica vidrada (com baixa porosidade) e ajuda de um produto desmoldante (ACNOSIL 34-6007 SH). Após a desmoldagem das membranas, foram cortados provetes com dimensões de 2cm×2cm×20cm. Os provetes foram posteriormente ensaiados em séries de 4 amostras numa máquina de ensaios mecânicos Shimadzu – Autograph AG-25 TA. Para o cálculo da tensão de rutura dos provetes, foi usada a seguinte expressão:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad \text{Equação 5}$$

Onde:

σ - é a tensão em MPa;

F - é a força aplicada em N;

A -é a área onde a força é aplicada em mm².

3.1.3 Resistência a ciclos de gelo-degelo

O objetivo deste ensaio é estudar o comportamento das membranas, quando sujeitas a vários ciclos de gelo-degelo, ou seja, avaliar como o efeito de variações constantes da temperatura e humidade podem influenciar as propriedades das telas.

Para este ensaio tentou seguir-se a norma NP EN 14891 para produtos impermeáveis à água para aplicação na forma líquida. O objetivo era variar 25 vezes a temperatura entre -20° e 70 °C, realizando patamares de 2h em cada uma das temperaturas. No entanto devido à incapacidade do equipamento só foi possível realizar 24 ciclos entre -10 ° e 70 °C. O equipamento usado neste tipo de ensaios foi uma camara climática FITOCLIMA 300EP10.

Após os ensaios de gelo-degelo, foi avaliada a aderência e a resistência à tração das amostras.

3.2 Argamassas

3.2.1 Argamassas usadas

Selecionaram-se, por sugestão da Weber, as seguintes argamassas:

- (i) **Cal Classic**, argamassa usada para regularização e proteção de paredes na reabilitação de fachadas ou no interior de edifícios antigos.
- (ii) **Cal Decor**, argamassa de revestimento colorida para paredes antigas que pode ser usada no exterior e interior.

- (iii) **Therm Pro**, argamassa de colagem e revestimento de placas isolantes, impermeável à chuva e usada na renovação de fachadas.

3.2.2 Produção das argamassas

Cortaram-se os resíduos de fibra de vidro com uma guilhotina até se obterem frações de 6mm de comprimento, como se pode ver na Figura 7, pois 6mm é o tamanho das fibras atualmente utilizadas. Para produzir as diferentes amostras, pesaram-se os vários componentes que foram depois misturados com o auxílio de uma misturadora (Figura 8).



Figura 7 - Fibras de vidro cortadas com 6mm de comprimento.



Figura 8 - Misturadora usada para homogeneizar os componentes das argamassas.

De seguida adicionou-se o volume de água à mistura de sólidos. Para garantir melhor homogeneização da pasta é necessário respeitar os tempos de mistura (ver Tabela 2-4).

Tabela 2- Condições de mistura da argamassa Cal Classic.

	Tempo (s)
Misturadora	15
Mão	60
Misturadora	75
Descanso	15

Tabela 3- Condições de mistura da argamassa Cal Decor.

	Tempo (s)
Misturadora	30
Mão	60
Misturadora	60
Descanso	75

Tabela 4 - Condições de mistura da argamassa Therm Pro.

	Tempo (s)
Misturadora	15
Mão	60
Misturadora	60
Descanso	120
Misturadora	15

3.2.3 Determinação da trabalhabilidade

Usou-se uma mesa de espalhamento para avaliar a trabalhabilidade das argamassas no estado fresco. O espalhamento é medido pelo diâmetro duma amostra de argamassa fresca, previamente colocada sobre a mesa com o auxílio de um molde semi-cônico, após um número definido de pancadas de impacto causadas pela ascensão e queda da mesa.

Na Figura 9, pode ver-se o equipamento usado para a realização do teste de espalhamento. O teste deverá efetuar-se da seguinte forma:

- limpar o molde e a mesa com um pano húmido, de forma a garantir que o interior do molde e a superfície da mesa ficam húmidos para que a argamassa possa fluir;
- verificar o funcionamento correto da mesa, rodando a manivela 10 vezes;
- colocar o molde no centro da mesa e introduzir a argamassa em duas camadas. Cada uma das camadas deve ser compactada com pelo menos 10 pancadas (com o pilão), para assegurar preenchimento uniforme. Cada camada deverá preencher metade do molde;

- limpar o excedente com uma espátula e limpar a área da mesa livre com um pano húmido;
- retirar o molde cuidadosamente, para que a forma se mantenha, rodar a manivela 15 vezes (uma vez por cada segundo) para que se promova o espalhamento da argamassa;
- realizar a leitura do espalhamento (em milímetros).

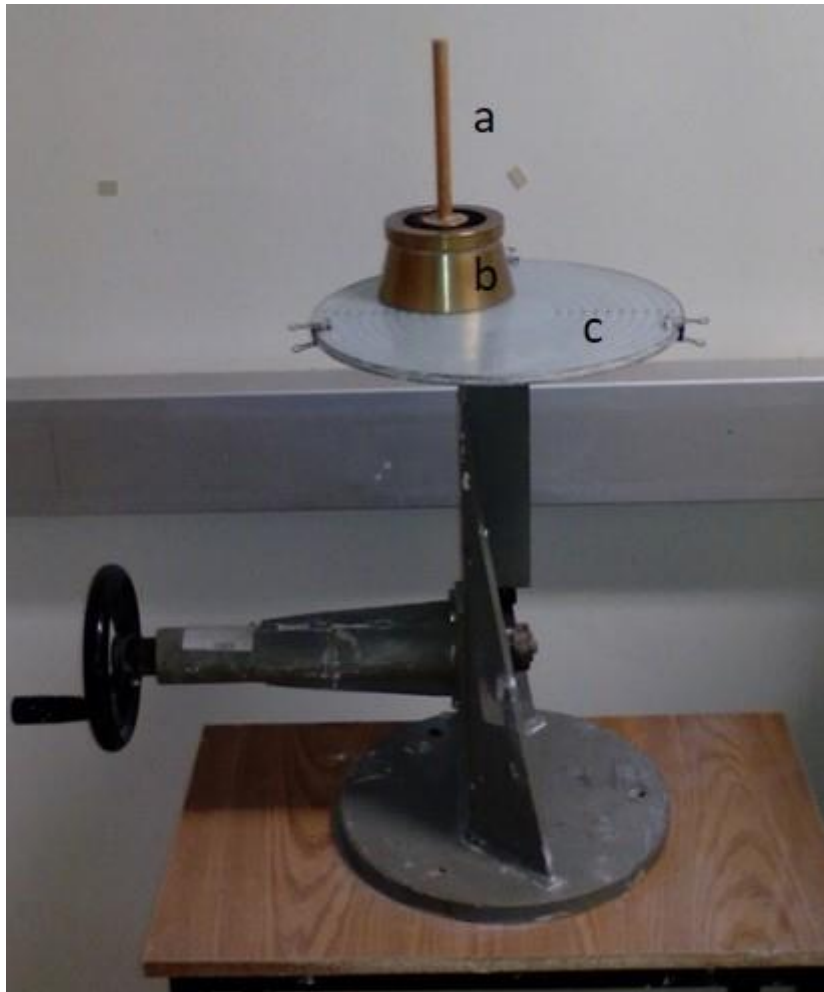


Figura 9 – Equipamento usado para realizar o flow test. a) Pilão; b) molde; c) mesa de espalhamento.

3.2.4 Massa específica do amassado

O objetivo é determinar a massa específica de uma argamassa quando esta ainda está na fase de amassado. Enche-se um copo, de volume igual a 513,1 cm³, com a argamassa e de seguida compacta-se. Depois retira-se a argamassa em excesso e mede-se a massa. A massa específica é calculada pela razão entre a massa e o volume conhecido.

$$\rho = \frac{m}{v} \quad \text{Equação 6}$$

Onde:

ρ - é a massa específica, em g.cm⁻³;

m - é a massa, em g;

v -é o volume, em cm³.

3.2.5 Ar incluído

O ar incluído numa amostra influencia a sua porosidade, condicionando a resistência mecânica e rigidez. O objetivo deste método é medir a quantidade de ar incluído, em percentagem, de uma argamassa em pasta, sendo saturada com água para se fazer a avaliação. Para tal recorre-se a um equipamento de medição de ar incluído, Figura 10, um esguicho de água corrente e uma espátula. Este ensaio realiza-se de acordo com a norma EN 1015-7:1998:

- amassar o material respeitando os tempos de amassadura, os métodos de amassadura (manual ou na misturadora) e tempos de repouso;
- colocar a argamassa em pasta, no interior do equipamento de medição, no respetivo compartimento (parte inferior do equipamento) sem compactar a argamassa. Quando o compartimento estiver cheio alisa-se a superfície com o auxílio de uma espátula, garantindo que o bordo metálico fica limpo;
- colocar a parte superior do equipamento;
- abrir as duas válvulas presentes no equipamento;
- introduzir água, recorrendo a um esguicho, por uma das válvulas até que a água saia pela outra, sem bolhas de ar;
- fechar as válvulas para isolar o sistema e com a bomba, presente na parte superior do equipamento, bombear ar para o introduzir dentro do amassado, até que o ponteiro atinja a posição inicial;

- carregar no botão *test* e registar o valor obtido do ar incluído.

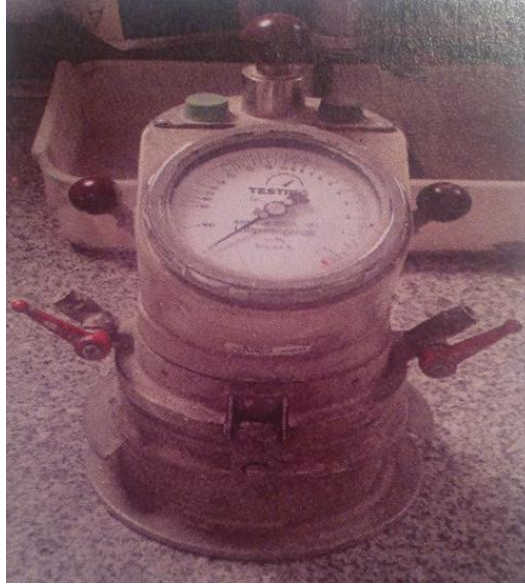


Figura 10 - Equipamento de medição de ar incluído de uma argamassa.

3.2.6 Fissuração plástica

A fissuração plástica das argamassas pode ocorrer quando estas se encontram em contacto com materiais cuja absorção de água é diferente. Durante este ensaio, colocou-se a argamassa sobre um tijolo tradicional onde um pedaço de tijoleira vidrada se encontrava preso com fita-cola, tal como se mostra na Figura 11. O conjunto é deixado em repouso durante um dia, após o qual se observa a zona de interface entre o tijolo e a tijoleira vidrada e na qual a argamassa pode sofrer fissuração.

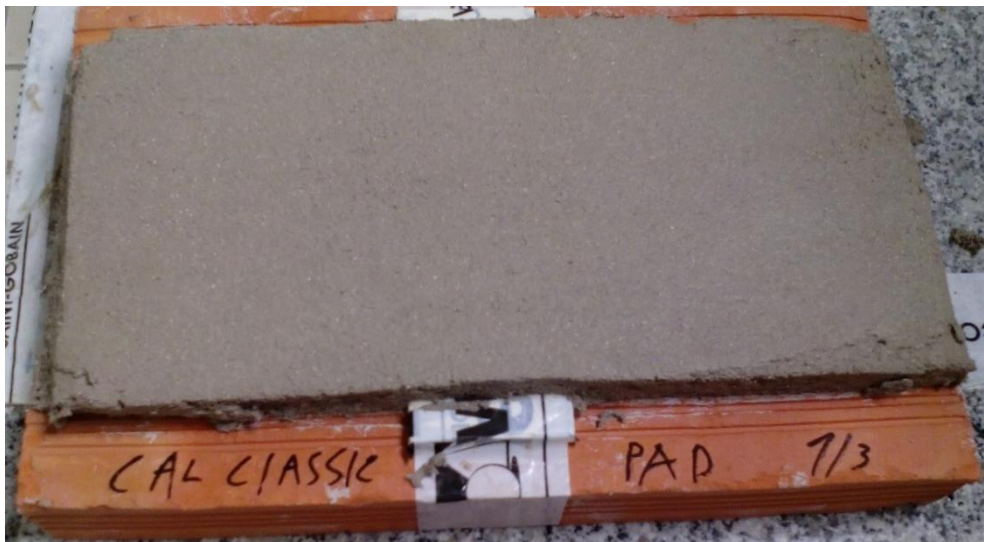


Figura 11 - Aplicação de argamassa para o teste de fissuração plástica.

3.2.7 Ensaios mecânicos

3.2.7.1 Resistência à Flexão

Para medir a resistência à flexão utilizaram-se provetes com dimensões 40mmx40mmx160mm, curados a 20 °C e a 95% Hr (humidade relativa), com tempos de cura diferentes consoante a argamassa, de acordo com a Tabela 5. Estes moldes foram anteriormente lubrificados com óleo para facilitar a desmoldagem dos provetes.

Tabela 5 - Tempos de cura em condições controlada.

	Moldado (dias)	Desmoldado (dias)
<i>Cal Classic</i>	2	5
<i>Cal Decor</i>	5	2

O ensaio de resistência à flexão (a três pontos) foi realizado no equipamento Controls Pilot 465 L1142. Colocou-se o provete a ensaiar sobre os apoios, e posteriormente é aplicada uma carga no centro da amostra. O ensaio é efetuado a uma velocidade de 0,5mm/min.. Pode então ser calculada a resistência à flexão através da seguinte fórmula:

$$\sigma = \frac{3FL}{2bd^2} \quad \text{Equação 7}$$

Onde:

σ - é a tensão de rutura, em MPa;

F - é a força aplicada para romper o material, em N;

L - é a distância entre apoios, em mm

b, d - largura e espessura do provete, em mm, respetivamente

3.2.7.2 Resistência à compressão

Para medir a resistência à compressão, utilizou-se parte do provete previamente fraturado à flexão. Numa área de 50mmx50mm, aplicou-se carga de compressão até fraturar a amostra. A resistência à compressão é calculada, tal como acima referido, pela Equação 5.

3.2.8 Módulo de Young

O módulo de Young ou de elasticidade foi determinado por um método não destrutivo, através da frequência de ressonância de uma onda, em amostras curadas durante 14 e 28 dias. O módulo de Young é calculado pela seguinte expressão:

$$E = (m \times f^2) \times 1,85 \quad \text{Equação 8}$$

Onde:

E – é o módulo de Young, em MPa;

m – é a massa do provete, em g;

f – é a frequência, em MHz;

1,85 é uma constante que relaciona a distância que a onda percorre, com o volume do provete.

3.2.9 Testes de aderência

No caso das argamassas de reboco, consiste em cortar secções quadradas (50mm×50mm) do conjunto argamassa e suporte onde se coloca, com uma resina epoxídica, um disco metálico com um furo, onde mais tarde irá apertar um parafuso. O corte das secções quadradas permite que as forças geradas atuem numa área conhecida. É então, depois de a resina secar, e com recurso a um dinamómetro e um parafuso, que é colocado no furo próprio, que a força de arrancamento é exercida e registada. Para estas argamassas, o ensaio decorreu após 28 dias de cura.

No caso das argamassas de colagem usa-se uma peça cerâmica (50mm×50mm). Após o espalhamento da argamassa sobre o suporte, aplica-se um peso de 2 kg durante 30s. O arrancamento é efetuado ao fim de 7, 14 e 28 dias de cura ao ar.

3.2.10 Absorção de água por capilaridade

O ensaio de absorção de água por capilaridade é um ensaio não destrutivo e tem como objetivo analisar a quantidade de água que é absorvida durante 24h. As amostras utilizadas foram as que resultaram do ensaio de resistência à flexão. Para este ensaio seguiram-se os seguintes passos:

- cortar, com o auxílio de uma serra, o provete para alisar a zona por onde este fraturou no ensaio de flexão;

- isolar o provete com parafina, deixando livre o lado oposto ao cortado anteriormente;
- pesar o provete antes do ensaio;
- colocar o provete com o lado não isolado em contacto com uma esponja húmida;
- após 24h, secar a área do provete que se encontrava em contacto com a esponja húmida e pesar o provete;

A capilaridade é dada pela formula representada na Equação 7:

$$C = [0,625 \times (M_{24h} - M_{inicial})] \quad \text{Equação 9}$$

Onde:

C - é a capilaridade, em kg.m²;

M_{24h} - é a massa após 24h, em g;

$M_{inicial}$ -é a massa inicial do provete, em g.

Com os provetes usados é ainda possível parti-los e observar qual é a altura que a água atingiu, após as 24h, por capilaridade.

3.2.11 Módulo de flexão transversal

Este ensaio tem como fim determinar a deformação de argamassas e cimentos através da medição do deslocamento de um provete, quando suportado nas extremidades (como na flexão a três pontos) e aplicando uma força de flexão no centro daquele. As dimensões do provete são padronizadas pela norma EN 12002/2008 (altura 300 ± 1 mm, largura 45 ± 1 mm e espessura de $3 \pm 0,05$ mm).

Foi necessário obter os provetes, seguindo as seguintes etapas:

- preparar os moldes para a construção dos provetes, em alumínio forrado com uma película de polietileno para facilitar a desmoldagem dos provetes. Quando se aplica a película de polietileno deve ter-se atenção para que esta forme uma superfície plana e sem enrugamentos ou dobras;
- colocar os moldes metálicos com a forma e dimensões e fixar com fita-cola;
- preencher os moldes com o amassado do produto recorrendo a uma espátula;

- para que o produto amassado fique compactado, recorre-se a uma mesa de compactação (semelhante à da Figura 9) e aplicam-se 70 pancadas, uma por segundo;
- retirar os moldes;
- colocar sobre a argamassa a segunda peça dos moldes, sobre a qual será colocado um peso de 10kg. Nesta parte do molde foi colada previamente uma tira polimérica onde-se aplicou óleo, para facilitar a desmoldagem;
- retirar os pesos ao fim de 1 hora;
- após 48h retirar a segunda peça dos moldes;
- colocar os provetes dentro de um saco plástico e colocá-los na câmara climática, a 23 ± 2 °C e 50 ± 5 %Hr;
- após 14 dias retirar os sacos plásticos dos provetes e deixar outros 14 dias a curar;

A máquina de ensaio aplica carga a uma velocidade constante de 2 mm/min até que ocorra a rutura do provete, registando a deformação e a força máxima. Medem-se as espessuras do provete em três pontos (no centro e nas extremidades). Para que a norma seja respeitada deve existir uma tolerância de $3,0 \pm 0,1$ mm.

3.2.12 Teste de impacto

O teste de impacto consiste em deixar cair um corpo de impacto (uma esfera neste caso) sobre uma amostra de argamassa aplicada sobre uma placa (EPS neste caso) e avaliar a zona de impacto e tipo de fratura. Os testes e análise foram levados a cabo conforme indicado na ETAG004, impacto de 3 e 10 Joules, três amostras por placa a avaliar.

As placas foram preparadas da seguinte forma:

- amassar o produto respeitando o método de amassadura;
- aplicar uma primeira camada de argamassa com uma talocha dentada;
- aplicar sobre a primeira camada de argamassa uma rede de reforço;
- aplicar uma segunda camada de argamassa e alisar com a parte não dentada da talocha;
- deixar curar 28 dias a 23 ± 2 °C e 50 ± 5 %Hr;

3.3 Geopolímeros

3.3.1 Caracterização das matérias-primas

3.3.1.1 *Difração de Raios X (DRX)*

Para a determinação mineralógica das amostras recorreu-se à técnica de DRX. As amostras de fibra de vidro foram previamente moídas num moinho de anéis Retsch RS100 a 700 rpm durante 25min em cuba de carboneto de tungsténio. O pó obtido após a moagem e o metacaulino foram secos durante 24h. Procedeu-se à análise mineralógica usando um equipamento Rigaku GeigerflexD/Max-Series, varrimento entre 5-80° (2 θ) com um passo de 0,02° e um tempo de aquisição 10s e com radiação K α Cu, $\lambda=1,5418$ Å.

3.3.1.2 *Fluorescência de Raios X (FRX)*

Para determinação de composição química do metacaulino e das fibras de vidro realizou-se uma análise de FRX usando o equipamento Philips X'Pert PRO MPD do Departamento de Geociências da Universidade de Aveiro.

3.3.1.3 *Análise microestrutural*

Usou-se microscopia eletrónica de varrimento (SEM, do inglês *Scanning Electron Microscopy*) para observar a morfologia das fibras de vidro e das partículas de metacaulino, usando um microscópio Hitachi S4100 equipado com detetor EDS Rontec (do inglês *Energy Dispersion Spectroscopy*) com feixe de eletrões 25 keV. A técnica EDS permitiu determinar os elementos químicos presentes nas amostras.

3.3.1.4 *Granulometria*

A distribuição do tamanho das partículas foi determinada por difração laser para partículas entre 0,4 μm e 200 μm , pelo método ótico de Fraunhofer recorrendo a um equipamento Coulter LS230. De modo a garantir superior reatividade, o material foi peneirado a 75 μm , tendo-se excluído partículas de tamanho superior à abertura do crivo.

3.3.2 Preparação dos geopolímeros

Neste trabalho foram incorporadas as fibras de vidro com duas funções distintas: substituição parcial do metacaulino e como agente de reforço das argamassas.

O processo de elaboração dos provetes foi semelhante em ambos os casos:

- preparação da solução de hidróxido de sódio de 10M (ao longo deste estudo a concentração do ativador foi mantida constante, tendo a escolha sido baseada em trabalhos anteriores);
- pesagem dos componentes, de acordo com as razões molares desejadas;
- mistura de metacaulino com as fibras de vidro (em pó ou fibras soltas) num saco plástico durante 1 min até estarem bem homogeneizadas;
- mistura do hidróxido de sódio com o silicato de sódio durante 5min, usando um misturador intensivo;
- colocação da mistura metacaulino e as fibras de vidro no misturador e adicionar o ativador deixando misturar durante 5 minutos;
- adição de água para corrigir a viscosidade da pasta, após 2min e 30s;
- após decorridos mais 2min e 30s homogeneizar a pasta obtida manualmente;
- mistura durante mais 5 min;
- vazamento da mistura para o molde;
- cura dos provetes moldados durante 24h na câmara climática (40°C e 65% Hr);
- remoção dos provetes endurecidos e desmoldagem;
- cura em condições ambiente.

Os provetes obtidos, com forma cilíndrica (para determinação da resistência à compressão) ou paralelepípedica (resistência à flexão), foram caracterizados ao fim de 1, 7 e 28 dias de cura. Para além destas análises foi também avaliada a densidade aparente das amostras e a sua absorção de água.

4 Discussão de resultados

4.1 Telas de impermeabilização

4.1.1 Ensaios preliminares: otimização do processo de aplicação

Foram realizados testes preliminares para perceber a forma mais indicada de incorporar a fibra de vidro em obra juntamente com a membrana polimérica. Foram preparadas amostras utilizando as três metodologias descritas na parte experimental. Os ensaios de aderência serviram para escolher o processo que garantia valores superiores e melhor impregnação das fibras pela resina. A Figura 12 mostra as diferentes formas de produção das membranas, tendo sido selecionadas fibras de vidro BIAx 45.



Figura 12 - Modo de incorporação da fibras de vidro na membrana polimérica para se perceber qual a melhor forma de incorporação da mesmas: a) camada inicial de membrana 0,5mm; b) camada inicial de membrana 1mm; c) camada inicial 1mm mas com segunda camada aplicada no dia seguinte.

Como se pode ver na Figura 13, o uso das metodologias A e B, nas quais a camada final de PU foi aplicada imediatamente após as fibras de vidro, garante maior aderência. Quando a segunda camada de PU é aplicada 24 h após a deposição da fibra de vidro (metodologia C), a aderência diminui porque existe maior descontinuidade entre a última camada aplicada e a primeira já curada. As fibras sofrem deficiente impregnação, como se ilustra na Figura 14.

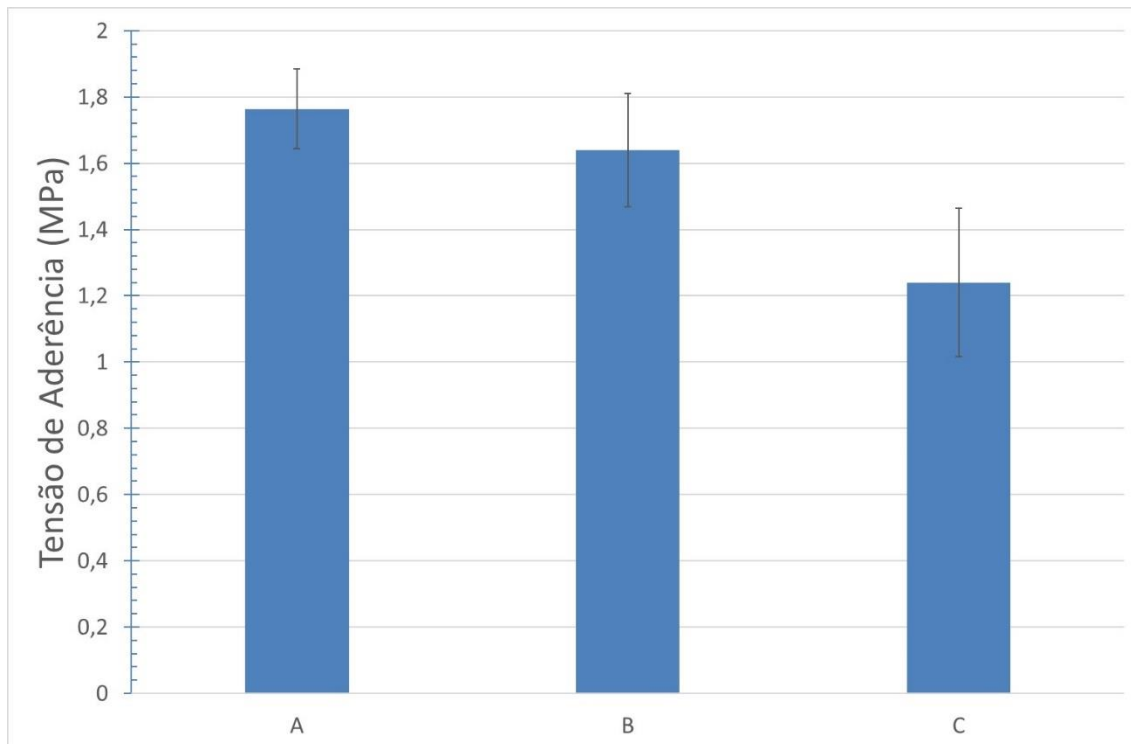


Figura 13 - Resultados das aderências (em MPa) obtidos nos ensaios de otimização da incorporação das fibras em membrana polimérica.



Figura 14 - Provetes após o teste de aderência, permitem ver o efeito de se aplicar a membrana polimérica com diferente intervalo temporal.

De notar ainda que a rutura no caso A é $\approx 65\%$ adesiva entre a membrana e o substrato de betão, sendo os $\approx 35\%$ restantes de tipo coesivo e ocorrendo maioritariamente entre as fibras de vidro. Num dos casos, a rutura foi totalmente coesiva e ocorreu pelo substrato de betão. Para o caso B a rutura é $\approx 38\%$ adesiva entre a membrana e o substrato de betão, sendo $\approx 62\%$ de tipo coesivo entre as fibras de vidro. Para o caso C a rutura é 100% coesiva entre as fibras de vidro (ver Figura 15).

Mediante estes resultados foi decidido implementar nos estudos subsequentes a metodologia A, por ser aquela que permite obter uma maior adesão entre a matriz polimérica e as fibras de vidro.



Figura 15 - Ilustração do estado final dos provetes após o ensaio de aderências. A sequência das imagens (da esquerda para a direita caso) corresponde às amostras preparadas de acordo com a metodologia A, B e C.

4.1.2 Estudo do reforço da matriz polimérica com agentes de reforço

Após os ensaios preliminares, foram realizados ensaios adicionais para avaliar o reforço da membrana polimérica com os resíduos de vidro com distinta orientação, bem como incorporando dois materiais disponíveis no mercado e comumente utilizados para a aplicação pretendida (geotêxtil e rede polimérica). Os agentes de reforço usados nesta fase foram:

- Fibra de vidro:
 - AUX
 - BIAx45
 - BIAx90
- Geotêxtil
- Rede polimérica 2x2

Foram também realizadas aderências ao produto sem agente de reforço, para fins comparativos.

4.1.2.1 Testes de aderência

A Figura 16 apresenta os resultados obtidos com os ensaios de aderência para os diferentes agentes de reforço estudados. Como se pode observar, quando não se utilizou qualquer agente de reforço os resultados de adesão foram superiores comparativamente com as matrizes reforçadas. Os resultados anteriores eram espectáveis, uma vez que a utilização de reforço induz uma descontinuidade entre a matriz, o que não acontece na amostra não reforçada. A amostra não reforçada mostra aderência $\approx 65\%$ adesiva entre a membrana e o suporte e $\approx 35\%$ de tipo coesivo no substrato de betão.

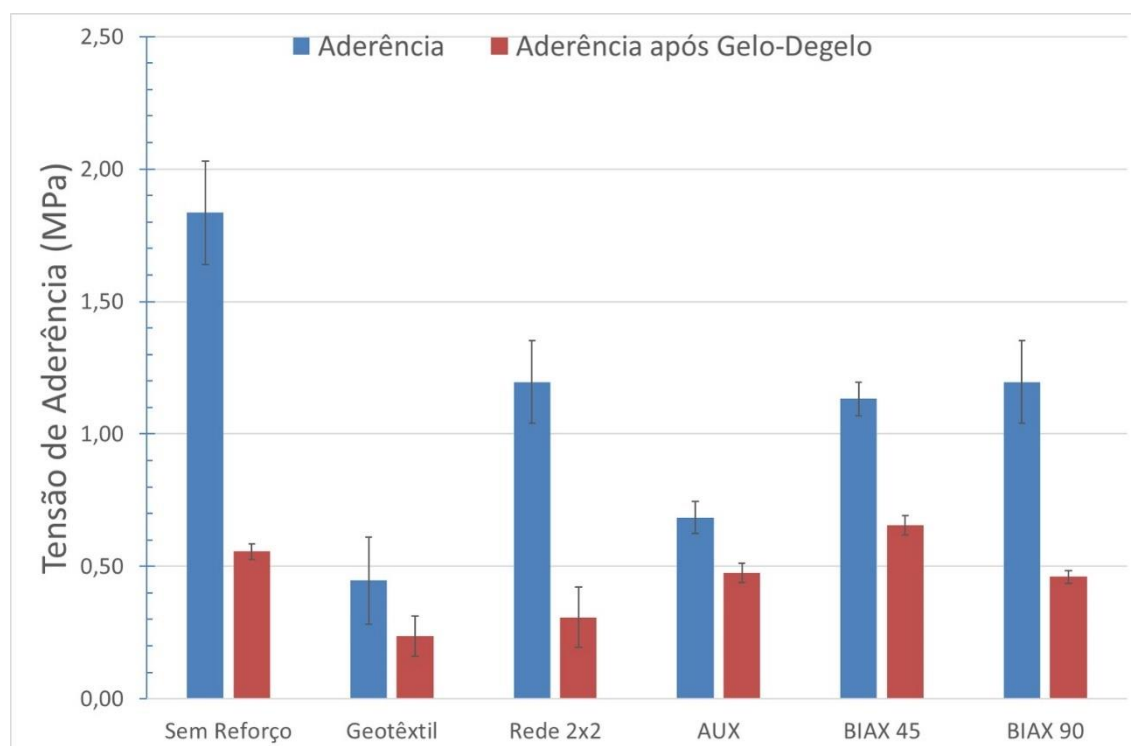


Figura 16 - Comparação entre os valores obtidos nos ensaios de aderência antes e após ciclos de gelo-degelo.

A amostra onde se incorpora geotêxtil apresenta valores de aderência inferiores a 0,50 MPa, indicando que existe descontinuidade entre as camadas de membrana. De facto, ao avaliar a superfície de fratura da amostra, Figura 17, parece ocorrer uma reação entre o geotêxtil e membrana que degrada o geotêxtil.

Quando reforçadas com fibras de vidro as membranas possuem aderência ligeiramente inferior à amostra sem reforço. Esta descida nos valores de aderência pode ser relacionada, no caso das fibras BIAX 45 e AUX, com o tipo de rutura que apresentaram. A Figura 17 mostra que a rutura entre a membrana e as fibras é 100% coesiva. Este tipo de rutura indica que a membrana não

incorpora totalmente as fibras com esta orientação (BIAX 45 e AUX), existindo assim um ponto de descontinuidade quando sujeitas a este tipo de forças de tração (aderência).

A composição onde se incorporaram fibras de vidro com orientação a 90° (BIAX 90) apresenta valores de aderência superior. De facto, a Figura 17 mostra que neste caso a rutura entre a membrana e o substrato de betão é 100% adesiva, o que sugere que a impregnação das fibras é favorecida.

A comparação de amostras onde se incorporam fibras de vidro (BIAX 45 e BIAX 90) com aquela que contém geotêxtil indica que as amostras beneficiam com a incorporação daqueles resíduos, pois apresentam valores de aderência 2,5 vezes superiores. No entanto a comparação com o reforço com rede polimérica mostra valores de aderências muito semelhantes, o que é um indicador positivo e que mostra que estes resíduos podem efetivamente ser utilizados como material de reforço, substituindo os produtos comerciais sem compromisso do desempenho do produto.



Figura 17 - Provetes resultantes dos ensaios de aderência antes dos ciclos gelo-degelo.

A Figura 16 apresenta também os valores de aderência após os ciclos gelo-degelo, o que permite verificar a influência destes no desempenho dos materiais. A ação gelo-degelo diminui substancialmente o valor da aderência em todas as composições testadas. Após estes ciclos apenas as amostras sem reforço e reforçadas com fibras de vidro BIAX 45 apresentam valores superiores a 0,50 MPa, o que mostra que os reforços convencionais (rede polimérica e geotêxtil) são menos eficazes do que o reforço com fibras de vidro BIAX 45. Este agente de reforço beneficia o comportamento da membrana a longo prazo.

De notar que as amostras reforçadas com os vários tipos de fibras de vidro mostraram sempre melhores resultados, antes e após os ciclos de gelo-degelo, que a amostra reforçada com geotêxtil.

Na Figura 18 pode observar-se o tipo de rutura ocorrido após os ciclos de gelo-degelo, não se registando alterações significativas relativamente às verificadas antes dos ciclos de gelo-degelo. As amostras reforçadas com fibra de vidro orientadas a 45° têm melhor aderência, beneficiando do facto de a rutura ocorrer entre as fibras, não tendo um decréscimo tão elevado como a membrana sem reforço.

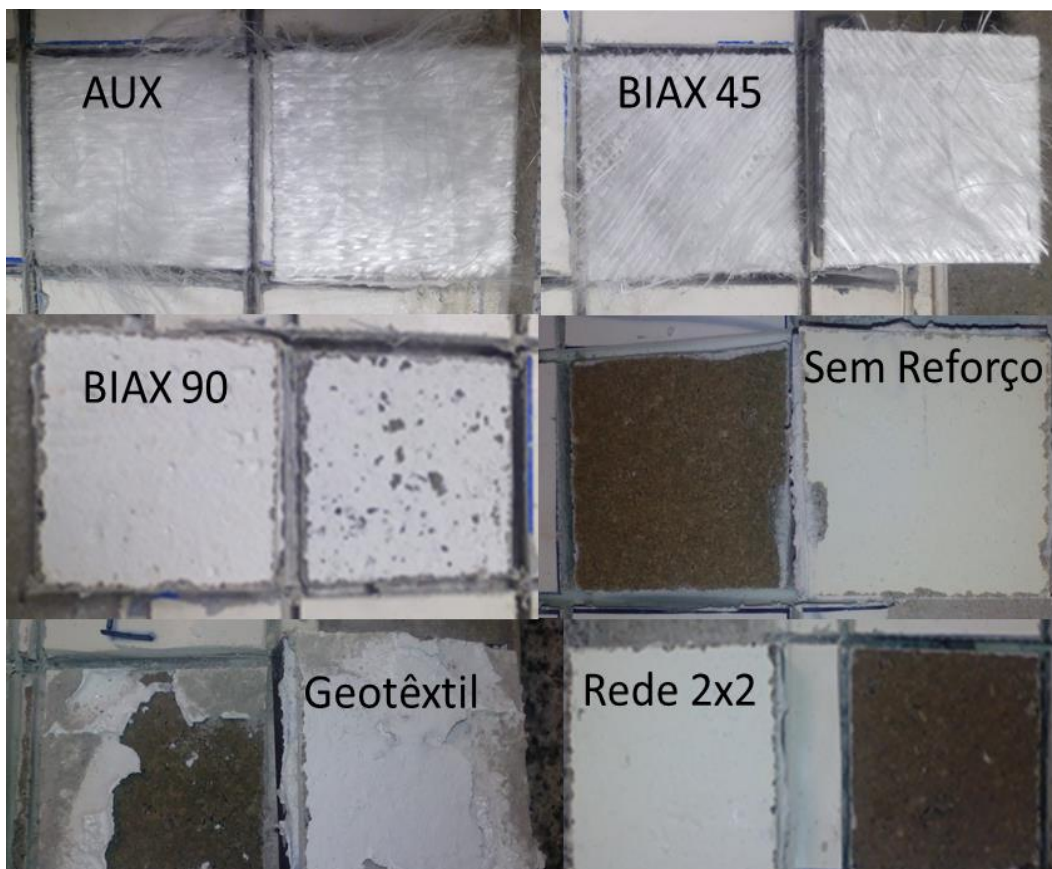


Figura 18 - Provetes resultantes dos ensaios de aderência após os ciclos gelo-degelo.

4.1.2.2 Ensaios mecânicos

A Figura 19 apresenta os valores da tensão de rutura à por tração para das diferentes amostras.

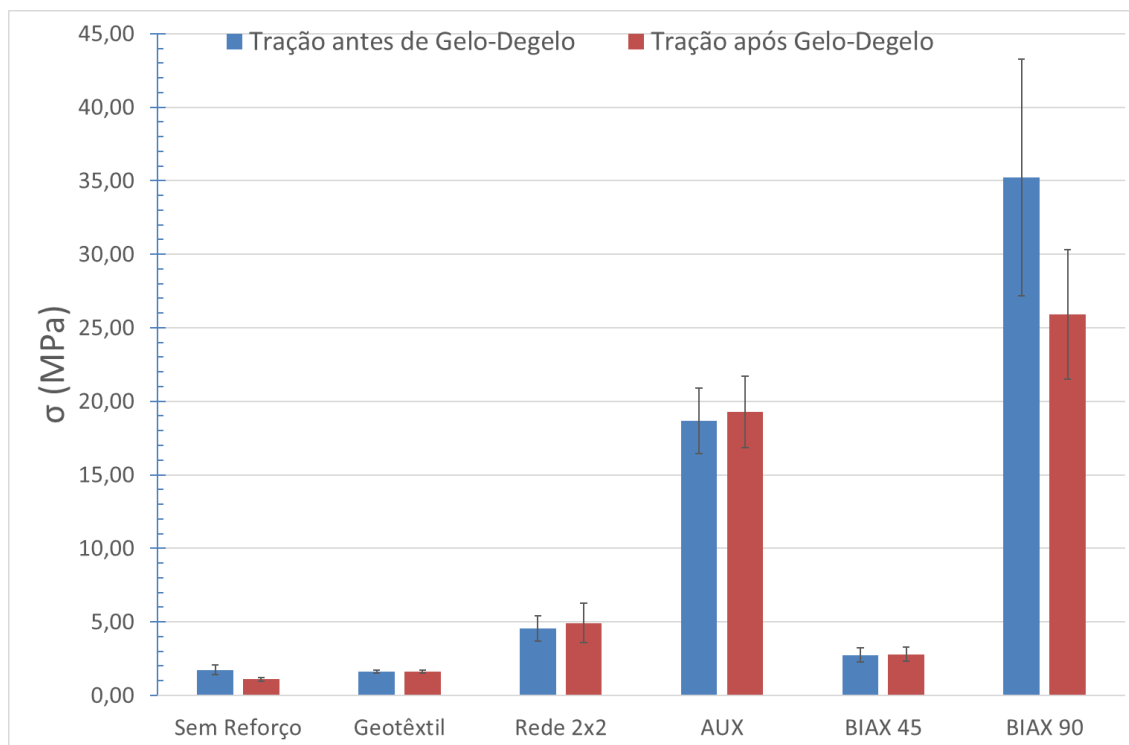


Figura 19 - Resultados obtidos nos ensaios de tração antes e após ciclos de gelo-degelo.

Como se pode observar, a adição de geotêxtil não altera significativamente a resistência à tração da membrana de PU comparativamente com a composição sem reforço. Já a incorporação de rede polimérica 2x2 é benéfica, uma vez que promove um aumento na resistência à tração, obtendo-se valores $\approx 2,5$ vezes superiores aos da amostra não reforçada.

A amostra onde foram incorporados os resíduos de fibra com orientação em vários eixos (AUX) apresenta uma tensão de rutura ≈ 11 vezes superior à da amostra padrão.

O reforço com BIAX 45 apenas garante aumento de $\approx 1,5$ vezes na tensão de rutura, relativamente às amostras sem reforço e contendo geotêxtil.

Como se pode observar, a tensão de rutura mais elevada foi obtida em amostras reforçadas com as fibras BIAX 90 (com orientação de 90°). Este resultado não surpreende uma vez que estes provetes têm um reforço orientado na direção de tração. Estas amostras apresentam tensão de rutura ≈ 20 vezes superior à amostra reforçada com geotêxtil, ≈ 7 vezes maior do que a que contém rede polimérica, disposta na direção de tração, e $\approx 1,8$ vezes superior à amostra que contém AUX.

Uma das causas do pior desempenho das amostras com reforço por fibras AUX prende-se com a superior espessura das fibras, diminuindo a capacidade de impregnação pela resina. Verifica-se deslizamento das fibras durante o ensaio.

Na Figura 19 são também apresentados os valores da tensão rutura de amostras sujeitas a ciclos de gelo-degelo. De modo geral não se verificam alterações no comportamento das amostras, apenas uma pequena diminuição da resistência à tração na amostra BIAX90. As amostras com resíduos de fibra de vidro com orientação segundo o eixo de tração apresentam maior resistência à tração, tendo a amostra com geotêxtil apresentado valores semelhantes à amostra sem reforço.

O facto de se incorporar fibras de vidro nas membranas oferece um sistema global mais resistente e possivelmente menos permeável, uma vez que resiste a tensões superiores não permitindo assim a fissuração do sistema impermeável.

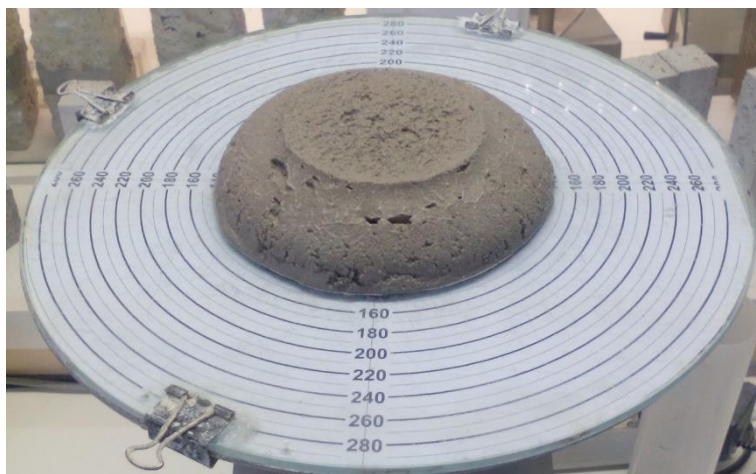
4.2 Argamassas

4.2.1 Cal Classic

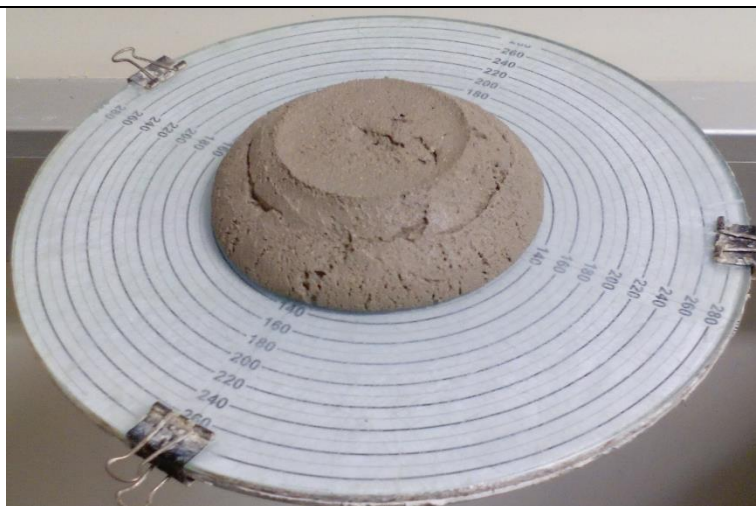
4.2.1.1 Estado fresco

Foram produzidas três amostras para estudar as características em fresco: um produto sem fibras, uma formulação padrão (PAD) e uma formulação com fibras provenientes da Ria Blades, previamente cortadas (FRBS-CM).

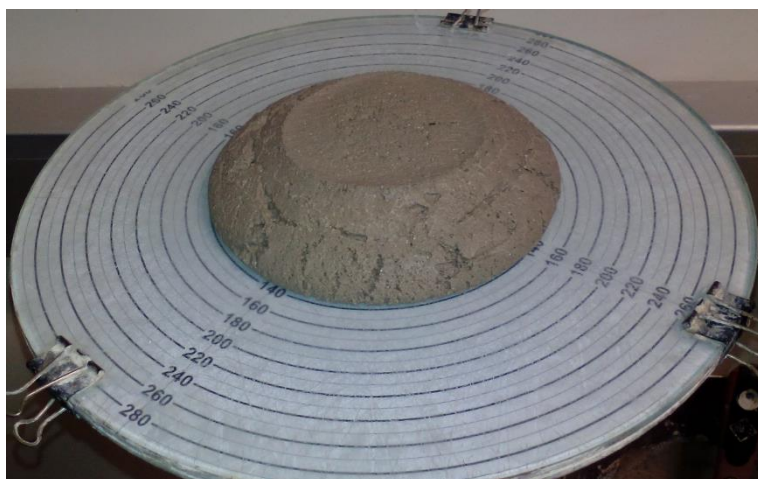
Os ensaios realizados são apresentados na Figura 20 e na Tabela 6.



A) Produto amassado sem reforço: 150 mm de espalhamento



B) Cal Classic PAD: 140 mm de espalhamento



C) Cal Classic FRBS-CM:
140 mm de espalhamento

Figura 20 - Imagem ilustrativa do resultado do flow test das diferentes composições de Cal Classic.

Como se pode ver na Figura 20 a amostra sem fibras é a que apresenta maior espalhamento, cerca de 150 mm. Pode ainda observar-se que a adição de fibras diminui o espalhamento para cerca de 140 mm. No entanto, o facto de se substituírem fibras normalmente usadas nas argamassas pelos rejeitos de fibras de vidro não influencia o espalhamento da argamassa (140mm de espalhamento).

A Tabela 6 mostra os valores de densidade do amassado e a percentagem de ar incluído. A substituição das fibras de polipropileno usadas no produto comercial (fabricado pela Weber) por fibras de vidro origina diminuição da densidade do amassado. Esta diminuição acontece porque as fibras de vidro provocam o aumento de percentagem de ar incluído.

Tabela 6 - Comparação entre o padrão produzido na Weber com a substituição das fibras por resíduos da Ria Blades.

	Densidade do amassado ($g.cm^{-3}$)	Ar incluído (%)
Padrão	1,615	19,5
FRBS-CM	1,448	22,0

4.2.1.2 Propriedades após endurecimento

A Figura 21 ilustra amostras testadas para avaliar a fissuração plástica: a amostra padrão e uma composição contendo fibras de vidro. Não se observam diferenças entre as amostras, não sendo visíveis sinais de fissuração após um dia de cura (considerado o período mais crítico do tempo de cura).



A)



B)

Figura 21 - Estado das amostras submetidas ao ensaio de fissuração plástica após um dia de cura; A) amostra padrão, B) amostra com fibras de vidro.

No que diz respeito à retração, foram realizadas medidas após 14 e 28 dias de cura. A retração acontece devido à reação de hidratação do ligante. Pode ver-se na Figura 22 que as

amostras apresentam retrações semelhantes ao fim de 28 dias. No entanto, os resultados mostram uma menor retração para as amostras reforçadas com fibra de vidro após 14 dias de cura. Nestas amostras a retração ocorre mais lentamente comparativamente com a argamassa padrão, o que é benéfico. Este resultado é coerente com as observações de fissuração plástica.

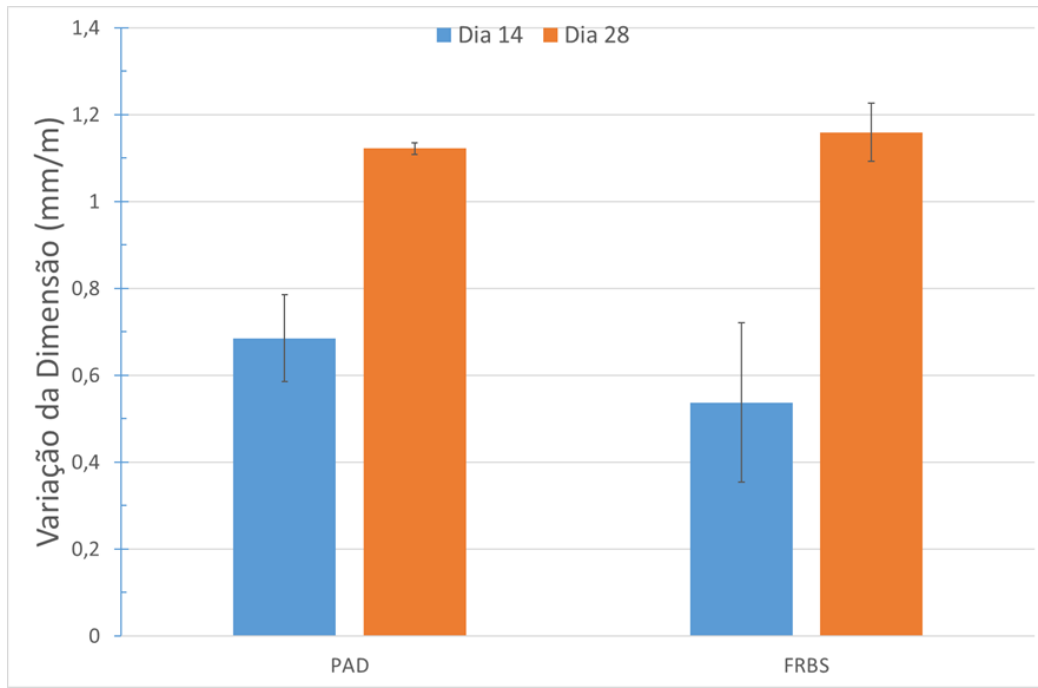


Figura 22 - Variação da dimensão das amostras ao longo do tempo de cura.

Na Figura 23 estão representadas as variações de massa das amostras curadas 14 e 28 dias.

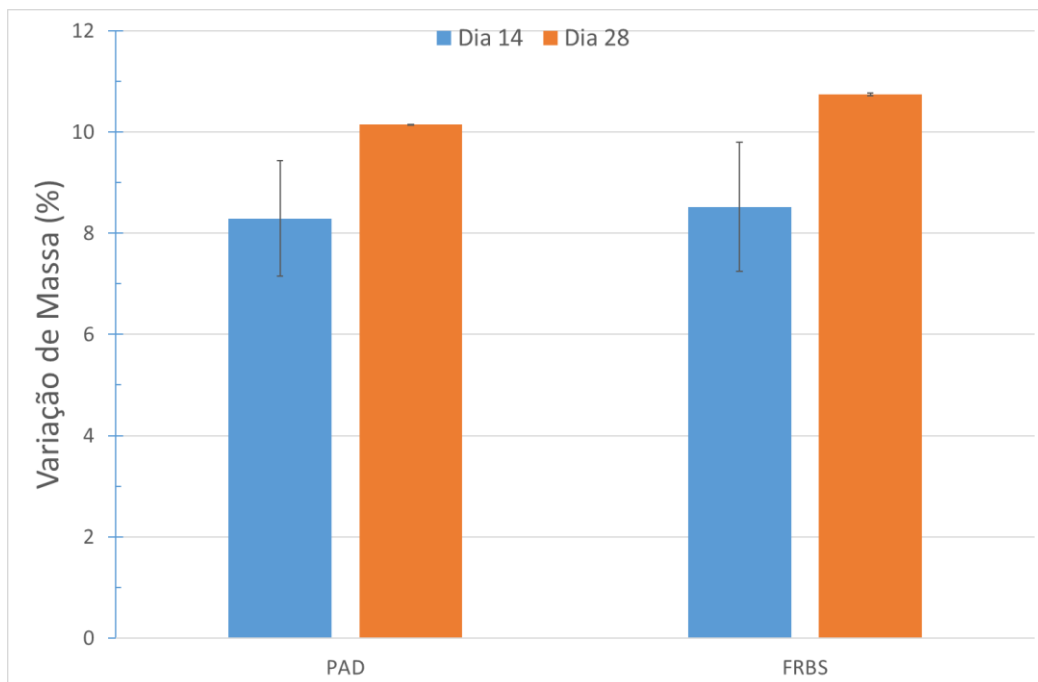


Figura 23 - Variação da massa das argamassas ao longo do tempo de cura.

Observa-se diminuição da massa com o tempo de cura dos provetes, que resulta da perda de água ao longo do processo de cura. A perda de massa é mais acelerada nos primeiros dias de cura, estabilizando e diminuindo com o tempo. Como se pode verificar não existem alterações significativas neste comportamento quando se substitui as fibras poliméricas (comerciais) pelo resíduo de fibras de vidro.

O módulo de Young das amostras foi também avaliado, sendo os valores indicados na Tabela 7. Espera-se observar uma relação direta entre os valores do módulo de Young (que indica a rigidez do material) e a densidade das amostras, sendo esta última propriedade afetada pelo teor de ar incorporado na fase de amassado, já que as diferenças composicionais são ténues. De assinalar o facto da amostra padrão apresentar um módulo de Young mais elevado aos 14 dias de cura (7,5 GPa) comparativamente com a composição onde se incorporaram fibras de vidro (5,2 GPa). No entanto a rigidez da amostra padrão diminui para tempos de cura mais longos ($\approx 8\%$), enquanto o material contendo fibras de vidro mostra ganho de rigidez ($\approx 15\%$).

Tabela 7 - Modulo de Young medido nas amostras de Cal Classic com os diferentes tipos de fibra.

<i>Tempo de cura (d)</i>	<i>Módulo de Young (GPa)</i>	
	PAD	FRBS-CM
14	$\approx 7,5 \pm 0,6$	$\approx 5,2 \pm 0,2$
28	$\approx 7,0 \pm 0,2$	$\approx 6,2 \pm 0,3$

4.2.1.2.1 Ensaio mecânicos

A Tabela 8 mostra os valores de resistência mecânica das amostras curadas 28 dias.

Tabela 8 – Valores de resistência mecânica à flexão e compressão de amostras curadas 28 dias.

	PAD	FRBS-CM
<i>Resistência à Flexão (MPa)</i>	$1,53 \pm 0,18$	$1,49 \pm 0,04$
<i>Resistência à compressão (MPa)</i>	$3,68 \pm 0,01$	$2,96 \pm 0,24$

Como se pode observar, a amostra padrão apresenta resistência à compressão superior à amostra reforçada com fibras de vidro, em sintonia com as diferenças de rigidez. Esta diferença

resulta então de diferenças de densidade no estado fresco, causadas pela desigual quantidade de ar incorporado. As diferenças na resistência à flexão são muito menores. De salientar o facto de que apesar de surgirem fissuras nas amostras elas não fraturaram, tendo as fibras contribuído para esse comportamento.

A Figura 24 mostra os valores da tensão de aderência das amostras. As diferenças são estatisticamente irrelevantes embora o tipo de fratura seja diferente. A amostra padrão apresenta uma fratura 100% adesiva, entre a argamassa e o tijolo, enquanto a amostra com fibras de vidro apresenta uma rutura 50% adesiva, entre a argamassa e o tijolo, e 50% coesiva (na argamassa). Estas diferenças são visíveis na Figura 25. Este resultado sugere que a substituição das fibras poliméricas, atualmente usadas, por fibras de vidro promove um ganho de coesão.

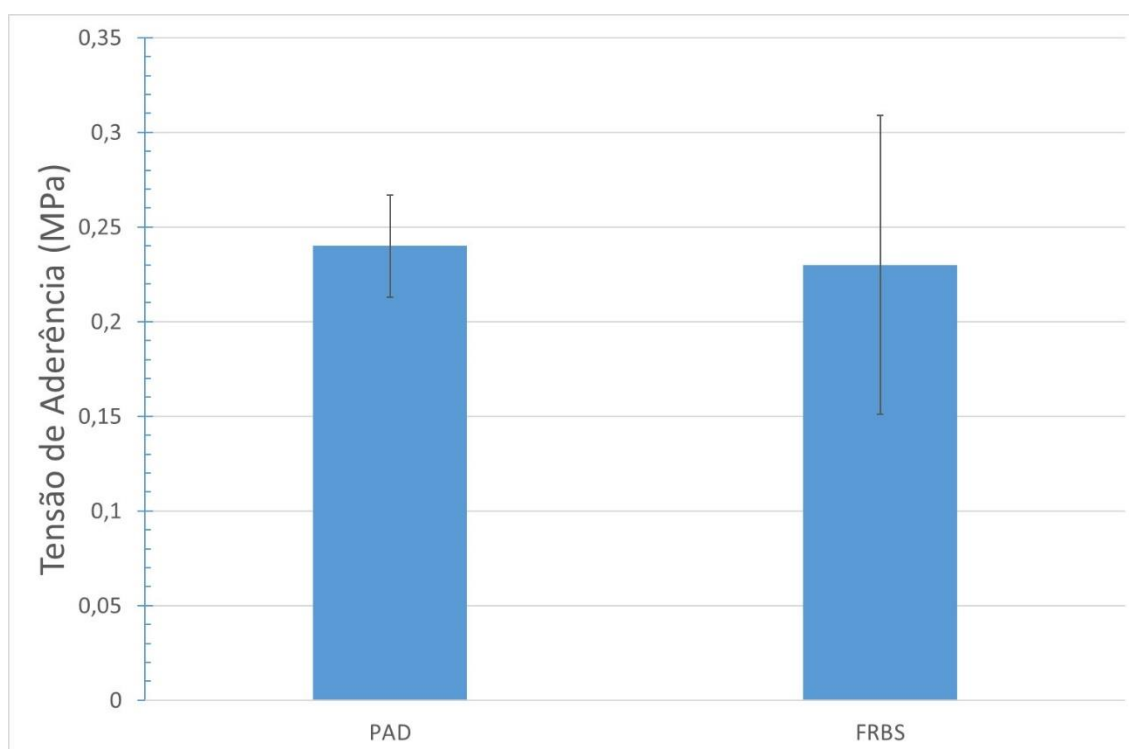


Figura 24 – Tensão de aderência das diferentes amostras de Cal Classic.



Figura 25 - Tipo de rutura apresentada pelas amostras após os testes de aderências: à esquerda a amostra padrão, à direita a amostra com fibras de vidro.

4.2.1.2.2 Absorção de água por capilaridade

A amostra padrão possui maior a densidade e, em consequência, apresenta menor absorção de água por capilaridade que a argamassa reforçada com fibras de vidro (Figura 26).

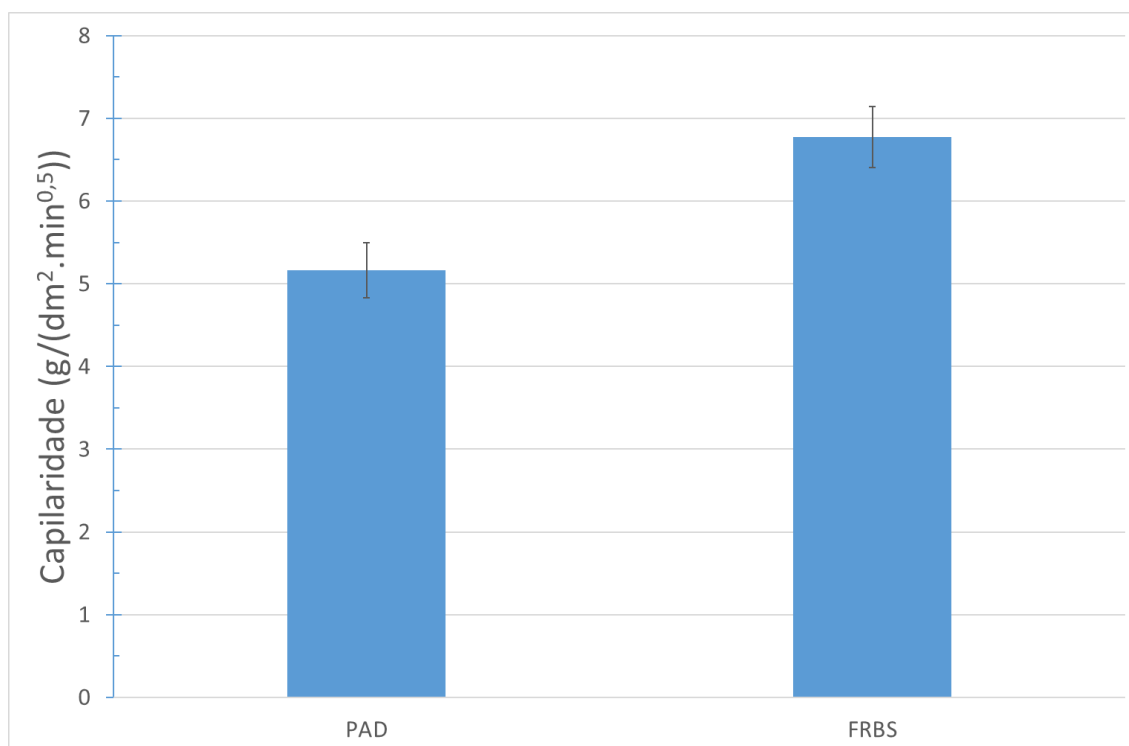


Figura 26 - Coeficiente de absorção de água por capilaridade de argamassas curadas 28 dias.

Na Figura 27 pode ver-se o interior de um provete de cada uma das amostras, após os ensaios de capilaridade. Estas imagens permitem verificar a altura atingida pela água por ascensão capilar.

Como se pode verificar, os valores são semelhantes nas duas amostras: absorção de água até um limite de $\approx 2,5$ cm de altura, com uma maior ascensão capilar pela parte exterior.

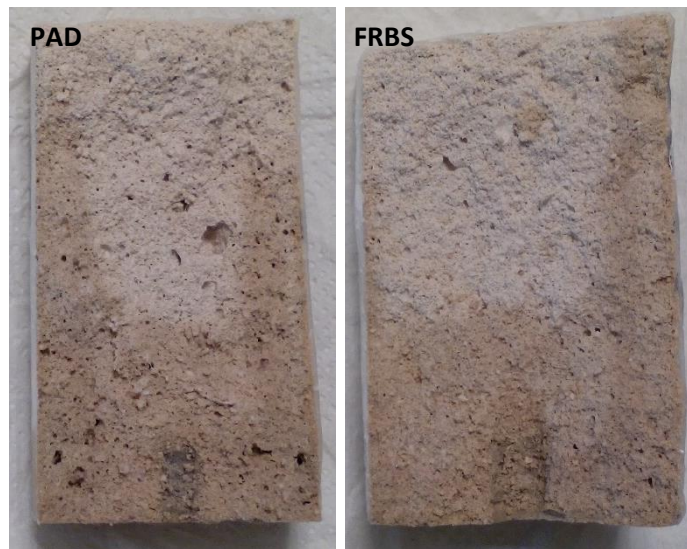


Figura 27 - Interior das amostras após ensaio de capilaridade.

4.2.2 Cal Decor

4.2.2.1 Caracterização no estado fresco

Os valores de densidade dos amassados são dados na Tabela 9.

Tabela 9 - Densidades dos amassados de Cal Decor.

	<i>Densidade do amassado</i> <i>(g.cm⁻³)</i>
<i>Padrão</i>	1,589
<i>FRBS-CM</i>	1,577

Como se pode verificar os valores são muito semelhantes, sugerindo condições de mistura equivalentes e valores próximos de ar introduzido nos materiais.

4.2.2.2 Propriedades do material endurecido

A Figura 28 mostra as variações de dimensão das amostras após 14 e 28 dias de cura.

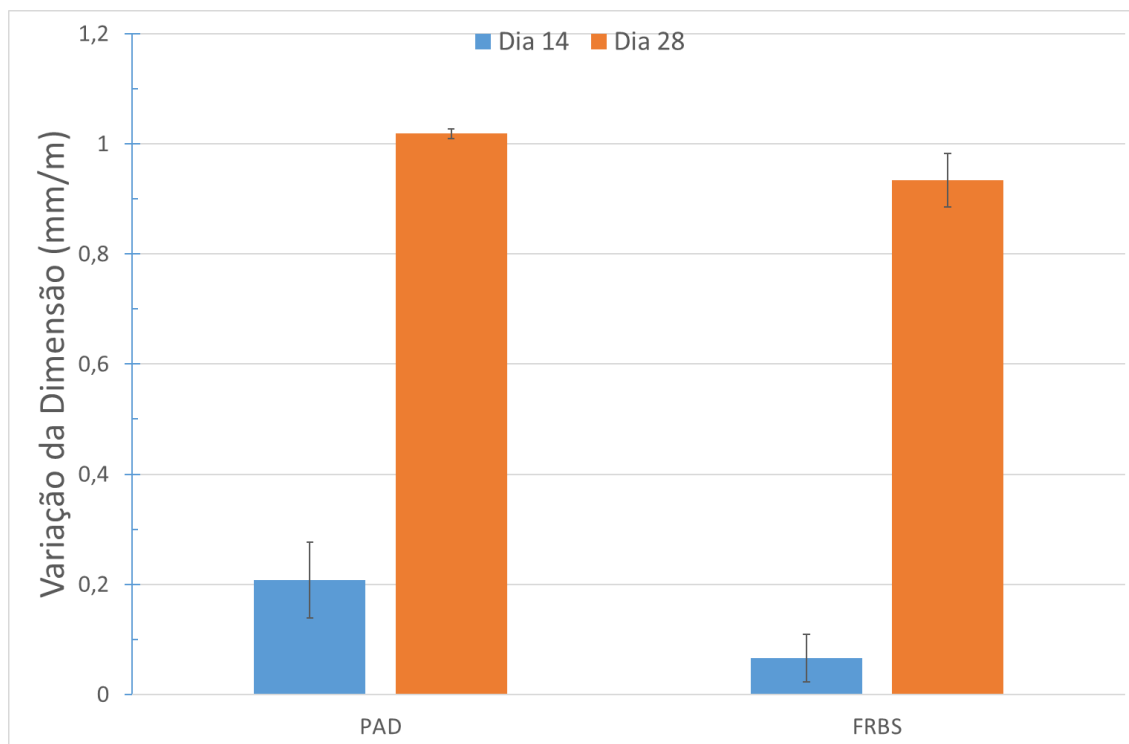


Figura 28 – Retração das amostras Cal Decor com o tempo de cura.

Tal como no caso anterior, a incorporação de fibras de vidro restringe a retração no período inicial de cura.

A perda de massa durante a cura está representada na Figura 29, sendo menor ao fim de 14 dias na amostra com fibras de vidro. No entanto após 28 dias os valores entre os dois materiais são semelhantes.

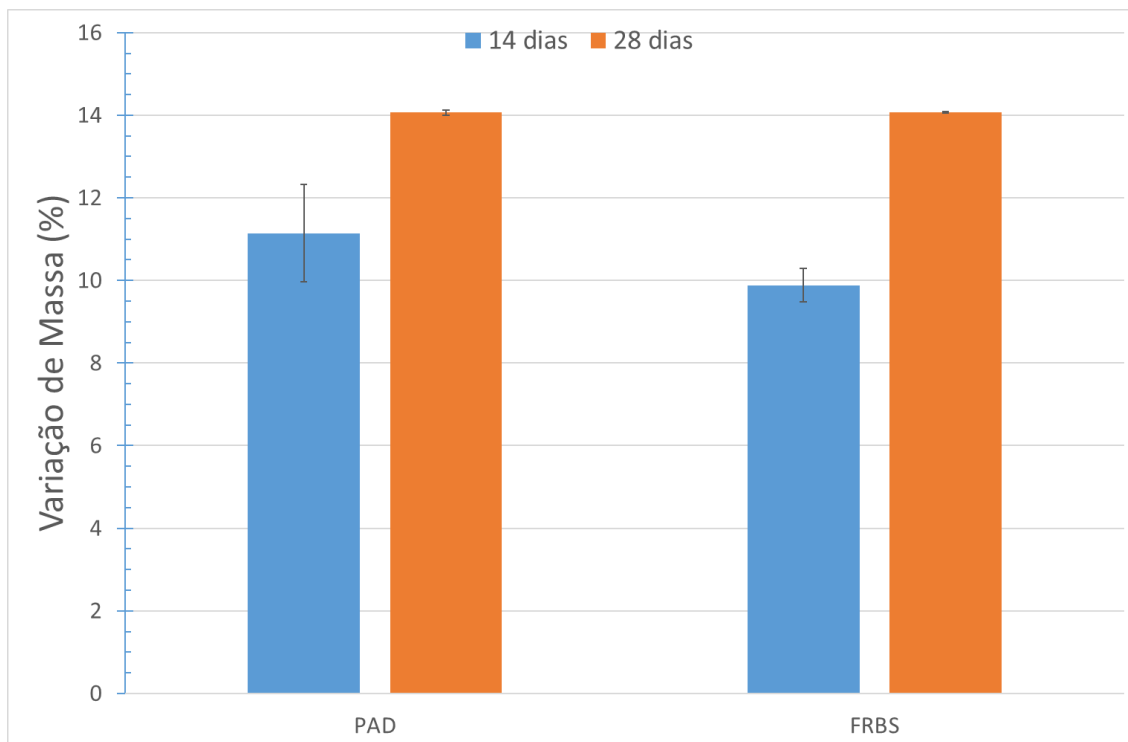


Figura 29 - Variação de massa ao longo do tempo de cura das amostras de Cal Decor.

A Tabela 10 mostra os valores do módulo de Young das amostras ao fim de 14 e 28 dias de cura. As diferenças são pouco expressivas, tal como se esperava pela semelhança de densidades dos materiais.

Tabela 10 - Módulo de Young medido nas amostras de Cal Decor curadas durante 14 e 28 dias.

Tempo de cura (d)	Módulo de Young (GPa)	
	PAD	FRBS-CM
14	≈5,6	≈5,5
28	≈6,2	≈6,0

4.2.2.2.1 Resistência mecânica

A Tabela 11 mostra os valores de resistência à flexão e compressão das amostras curadas 28 dias. Os produtos apresentam resultados semelhantes, em concordância com as ténues diferenças observadas nas características já discutidas.

Tabela 11 – Valores de resistência mecânica das amostras de Cal Decor após 28 dias de cura.

	PAD	FRBS-CM
Resistência à Flexão	1,75±0,014MPa	1,76±0,085MPa
Resistência à compressão	3,05±0,120MPa	3,08±0,042MPa

4.2.2.2.2 Absorção de água por capilaridade

A Figura 30 apresenta os valores do coeficiente de absorção de água por capilaridade das amostras curadas. São de novo ténues as diferenças observadas.

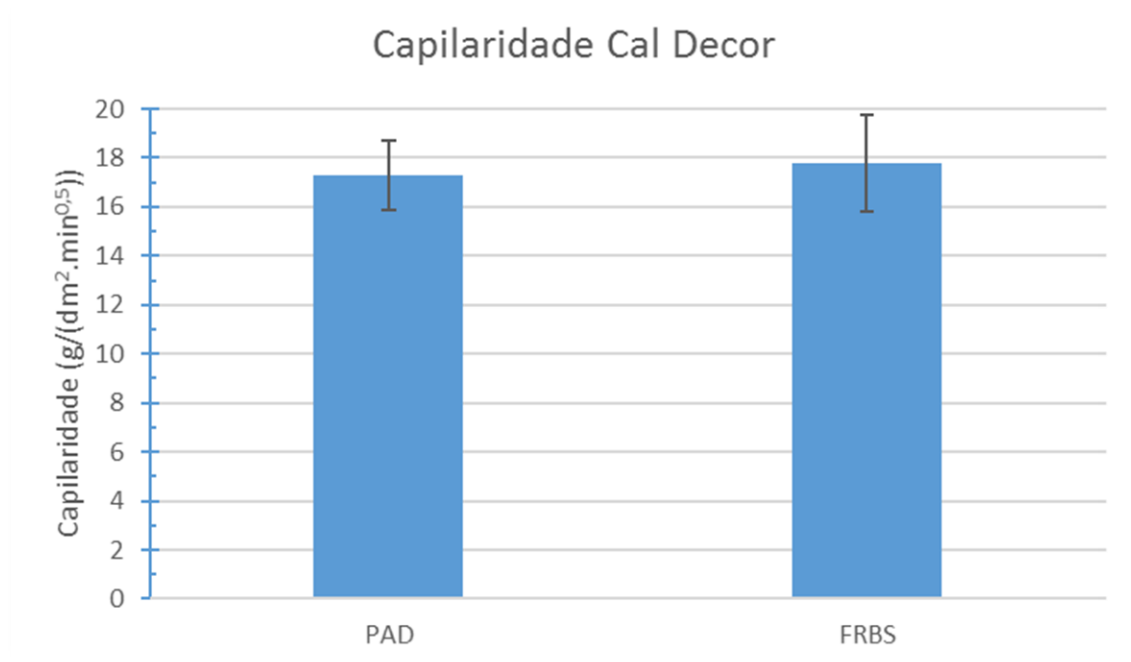


Figura 30 - Coeficiente de absorção de água por capilaridade das amostras de Cal Decor curadas 28 dias.

Neste caso, não foi possível observar a altura que a água atingiu nos provetes após o ensaio de capilaridade, uma vez que não se notavam diferenças de coloração entre as diferentes zonas da amostra.

Tendo as amostras apresentado comportamento mecânico semelhante e valores de retração inferiores, tendo ainda um benefício económico e ambiental. Pode então concluir-se que a incorporação de fibra de vidro nas argamassas deste tipo é tecnologicamente possível.

4.2.3 Therm Pro

4.2.3.1 Propriedades no estado fresco

A Tabela 12 lista os valores de massa específica e a percentagem de ar incluído das argamassas produzidas, no estado de pasta. As diferenças de densidade são mínimas, ainda que a amostra contendo fibras BIAx apresente menos (cerca de 4%) ar incluído. Isto sugere que o uso de tipos distintos de fibra de vidro pode induzir alterações nas condições de amassadura, a requerer ajuste caso se pretenda ajustar a densidade e porosidade do material.

Tabela 12 - Densidade e percentagem de ar incluído nos amassados das amostras Therm Pro.

	<i>Massa específica</i> <i>(g.cm⁻³)</i>	<i>Ar incluído</i> <i>(%)</i>
<i>Padrão</i>	1,401	24,0
<i>FRBS-CM</i>	1,374	25,0
<i>FRBS-BIAx</i>	1,411	21,0

4.2.3.2 Propriedades do material endurecido

4.2.3.2.1 Testes de aderência

Os testes de aderência destas argamassas foram efetuados em dois substratos, uma vez que este produto está em contacto com diferentes matrizes na sua aplicação. Usou-se poliestireno expandido (EPS do inglês Expanded Polystyrene) e betão.

As amostras foram sujeitas a dois tipos de ambiente. Parte das amostras foram curadas 7 dias ao ar e imersas em água durante 21 dias, enquanto outro conjunto de amostras foi curado 14 dias em condições ambiente e depois a 70°C durante outros 14 dias. Aquelas condições são referidas como “H₂O” e “Calor”, respetivamente. Este ensaio é comum nas argamassas de colagem, tal como preconiza a NP EN 12004:2008.

As Figuras 31 e 32 apresentam os valores das tensões de aderência quando se utilizou, respetivamente, EPS e betão como substrato.

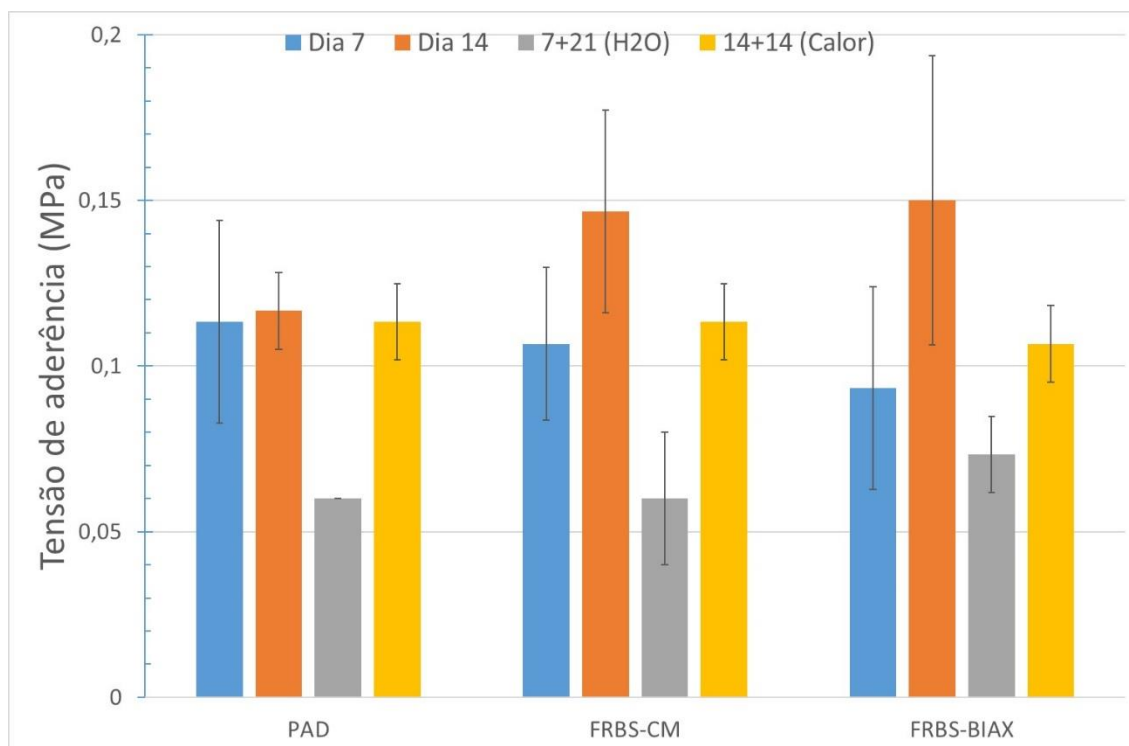


Figura 31 - Aderências sobre o substrato de EPS.

O uso de substratos diferentes condiciona fortemente o processo de adesão, dadas as diferenças de composição química e as particularidades físicas (porosidade, rugosidade). Sabe-se que os ligantes hidráulicos não estabelecem ligações químicas com materiais de natureza orgânica, pelo que não surpreende que todas as argamassas ensaiadas apresentem adesões relativamente modestas ao EPS (Figura 31), quando comparadas com o betão (Figura 32). Com EPS a rutura é coesiva e ocorre no substrato, tanto após 7 como 14 dias de cura.

No EPS, a adesão da amostra padrão não parece alterar-se entre os 7 e 14 dias de cura. Já nas amostras que contêm fibras de vidro observa-se ganho de resistência à tração por aderência, de $\approx 0,1$ MPa para $\approx 0,15$ MPa.

Após imersão em água todas as amostras mostram deterioração dos valores de resistência à tração por aderência. As forças de ligação desenvolvidas entre os dois materiais são menos intensas nesta condição de cura.

Já a ação do calor nas amostras previamente curadas ao ar durante 14 dias sobre o substrato é muito menos influente na degradação da ligação. Apenas as argamassas contendo fibras de vidro parecem denotar uma ligeira diminuição na resistência à aderência por tração. Podendo ter-se verificado neste tipo de argamassas o mesmo fenómeno que ocorreu na argamassa Cal Classic, que

apresentava módulos de elasticidade diferentes aos 14 dias para a amostra padrão e com fibras de vidro, influenciando assim o comportamento mecânico das amostras.

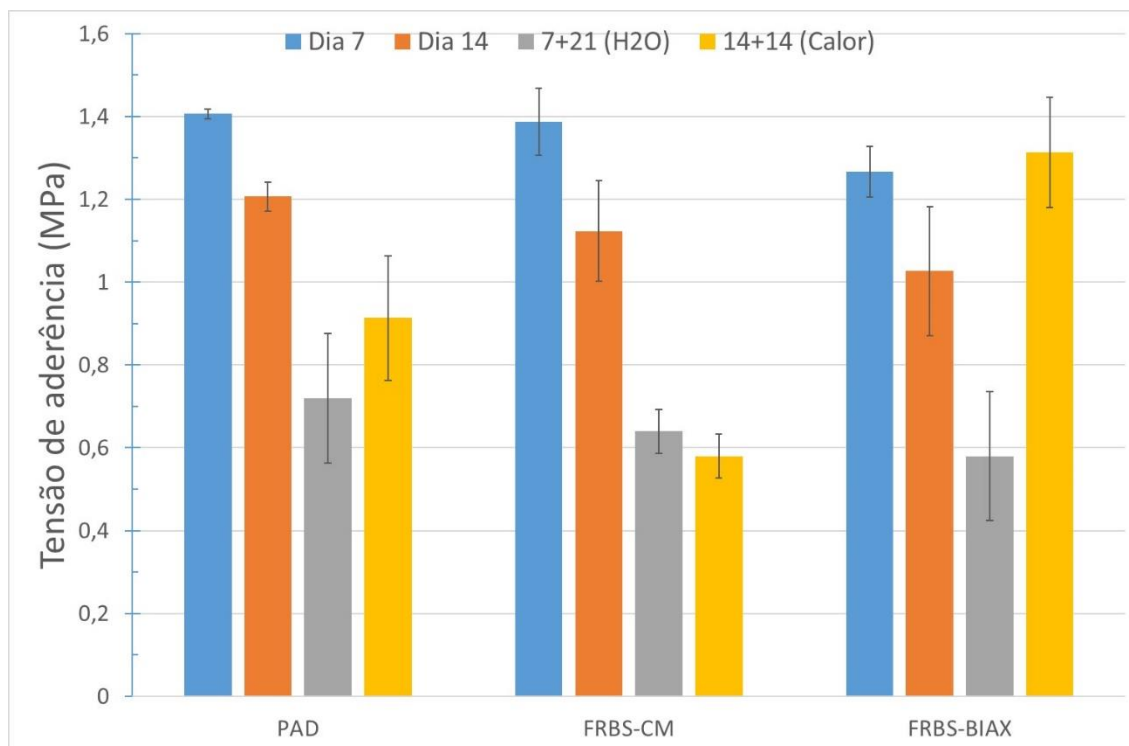


Figura 32 - Aderência sobre o substrato de betão.

No substrato de betão os valores da tensão de aderência das argamassas curadas 7 e 28 dias são semelhantes (Figura 32). Apenas a amostra FRBS-BIAX parece apresentar ligeira perda de adesão. Tal como com EPS, a imersão em água das amostras curadas ao ar no substrato durante 7 dias causa significativa perda de adesão, sem que o reforço fibroso acrescente algo ao desempenho.

No que diz respeito aos resultados de aderência ao calor os resultados não são conclusivos, pois as amostras com fibras de vidro na sua composição apresentam resultados bastantes diferentes. A comparação entre as amostras FRBS-CM e padrão volta a sugerir ser ineficaz o uso de fibras de vidro. No entanto a amostra FRBS-BIAX apresenta aderência bastante superior, sendo também a única amostra que desenvolve ganho de resistência sob a ação do calor. Podendo este fenómeno estar associado ao ar incluído nas amostras uma vez que a amostra FRBS-BIAX apresenta menor teor de ar incorporado quando comparada com as amostras padrão e FRBS-CM (24% e 25% respetivamente).

4.2.3.2.2 Testes de impacto

A Tabela 13 resume as observações registadas após os testes de impacto efetuados nas argamassas.

Tabela 13 - Observações efetuadas no ensaio de impacto das diferentes argamassas.

Ensaio de impacto	PAD	FRBS-CM	FRBS-BIAX
Choque 3 J com rede	Afundamento circular sem fissuração com cerca de 3,44 cm de diâmetro e 2,9 mm de profundidade	Afundamento circular sem fissuração com cerca de 3,38cm de diâmetro e 2,9mm de profundidade	Afundamento circular com fissuração, em algumas zonas, com cerca de 3,89 cm de diâmetro e 3,2 mm de profundidade
Choque 10 J com rede	Afundamento circular sem fissuração com cerca de 4,12 cm de diâmetro e 3,8 mm de profundidade	Afundamento circular sem fissuração com cerca de 4,24 cm de diâmetro e 3,9 mm de profundidade	Afundamento circular com fissuração estendida para o exterior com cerca de 4,38 cm de diâmetro e 3,5 mm de profundidade

A comparação entre a amostra padrão e FRBS-CM sugere serem pequenas as diferenças de comportamento dos materiais. No entanto, a amostra FRBS-BIAX denota a formação de fissuras, compatível com a maior fragilidade deste material.

4.3 Geopolímeros

4.3.1 Caracterização das matérias-primas

A Figura 33 mostra espectros de raios X dos componentes sólidos usados na formulação dos geopolímeros. O metacaulino apresenta elevado grau de amorfismo, sendo quartzo e muscovite as fases cristalinas identificadas, sendo também possível a existência da anatase. O resíduo moído de fibra de vidro é completamente amorfo.

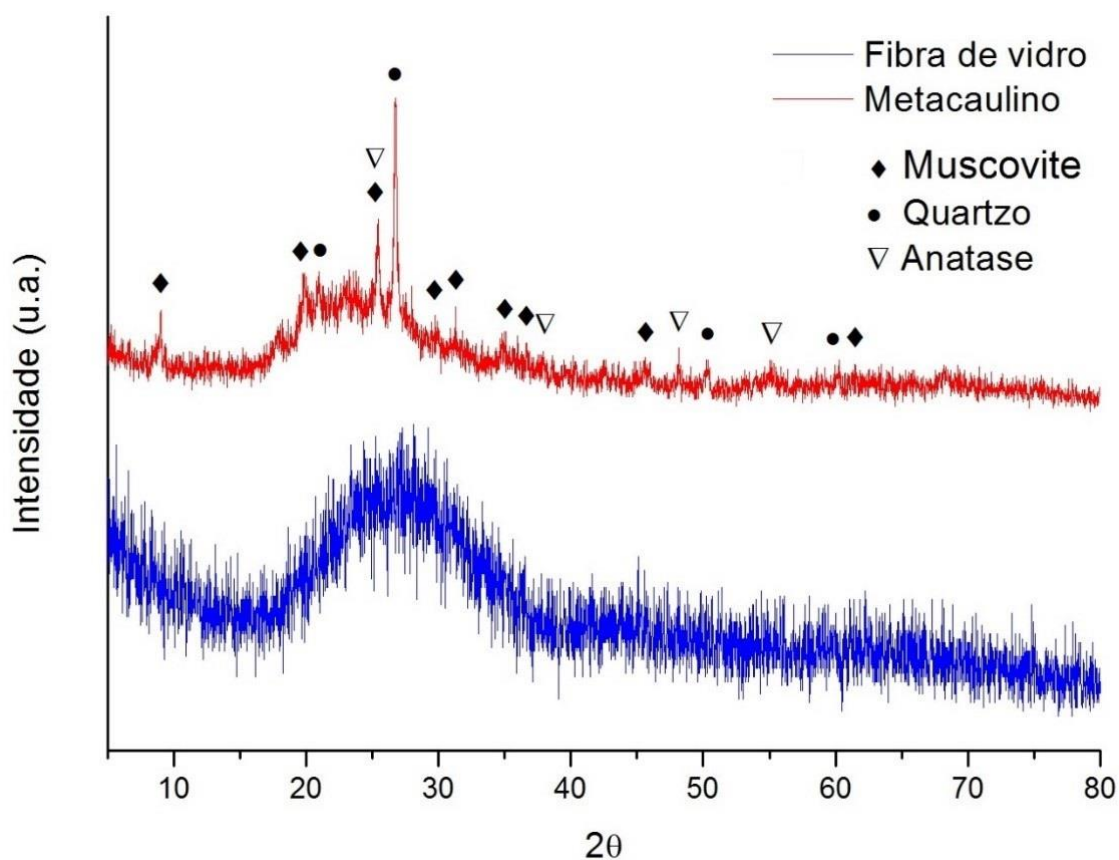


Figura 33 - DRX dos componentes sólidos usados na formulação de geopolímero: metacaulino em cima e pó moído de resíduo de fibra de vidro em baixo.

A composição química dos materiais foi estimada por FRX, estando representados na Tabela 14, os teores ponderais dos elementos maioritários presentes. As fibras de vidro são compostas por SiO_2 (cerca de 54%), CaO e Al_2O_3 , que juntos perfazem 35%, cerca de 3% de MgO e 0,9% de K_2O . Os restantes componentes perfazem 1,3% da composição, nomeadamente Fe_2O_3 , SO_3 , Cl , TiO_2 , MnO e Sr e ainda W , que pode ter sido introduzido como impureza no processo de moagem, efetuado num moinho de anéis de carboneto de tungstênio.

A Tabela 14 mostra também a composição do metacaulino, constituído essencialmente por SiO_2 e Al_2O_3 , 54,40% e 39,40% respetivamente. Quando comparadas as composições das fibras de vidro com o metacaulino pode constatar-se uma grande diferença na quantidade de alumina. Assim sendo, a substituição de metacaulino por fibra de vidro em algumas formulações de geopolímeros pode resultar numa relativa deficiência de alumina, com eventual prejuízo na reatividade do sistema. A presença de CaO nas fibras de vidro pode influenciar a reacção, embora não necessariamente de forma negativa.

Tabela 14 – Composição química do metacaulino e dos resíduos de fibra de vidro.

	SiO_2	Al_2O_3	TiO_2	Fe_2O_3	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	W	Perda ao rubro
Metacaulino (%)	54,40	39,40	1,55	1,75	0,14	0,10	0,00	1,03	0,00	2,66
Fibra de Vidro (%)	54,01	12,20	0,32	0,32	2,95	22,82	0,16	0,88	0,07	5,79

As Figuras 34 e 35 mostram análises de EDS realizadas aos pós dos materiais em estudo. Os resultados são globalmente coerentes com as análises de FRX.

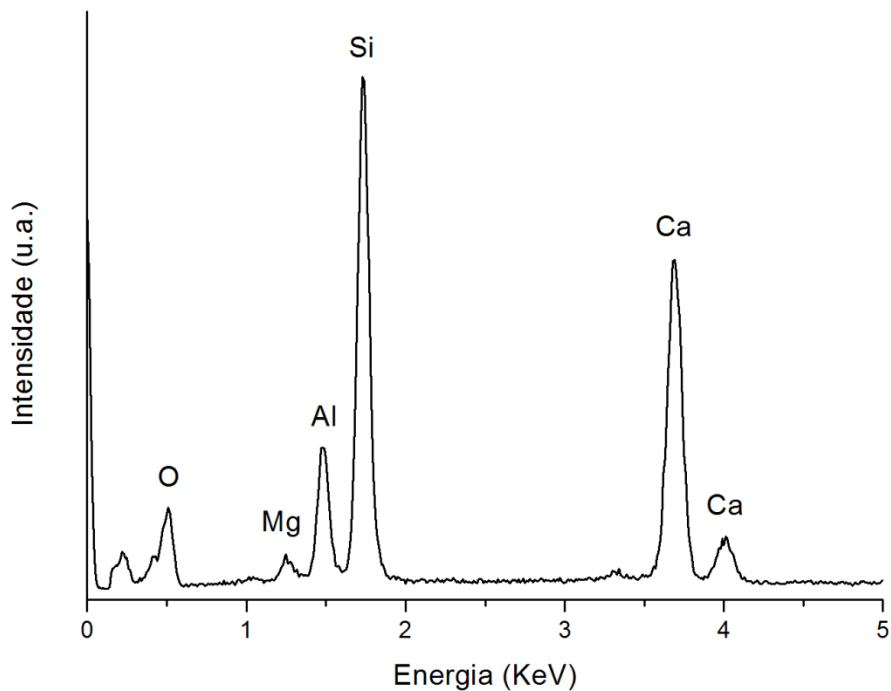


Figura 34 - Espectro de EDS realizado à amostra de Fibra de Vidro.

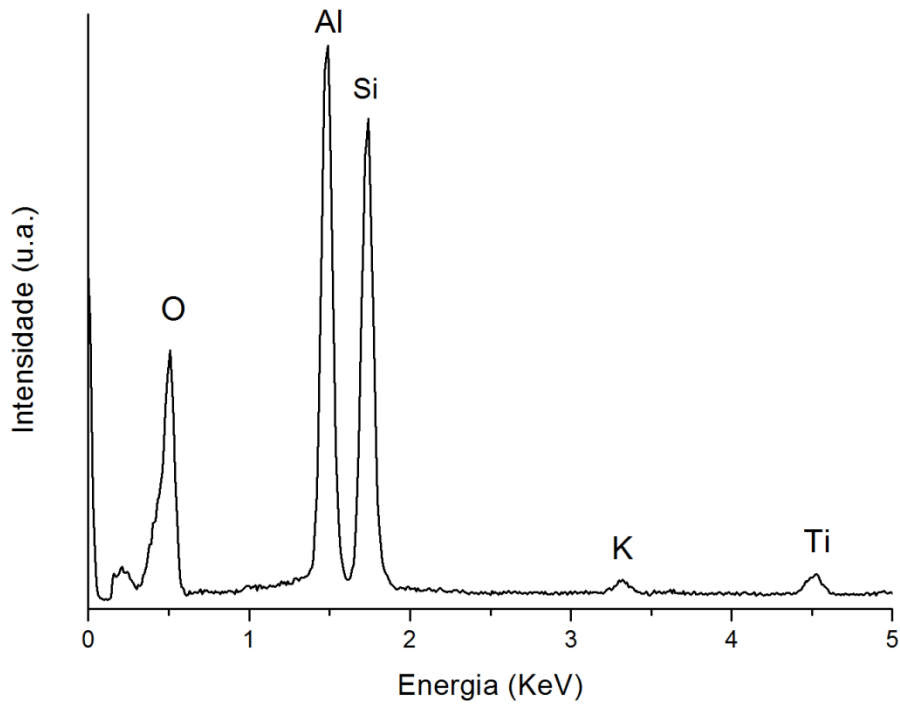


Figura 35 - Espectro EDS realizado ao pó de metacaulino.

A Figura 36 mostra as curvas cumulativas (superior e inferior) de distribuição granulométrica das partículas de fibra de vidro, podendo verificar-se que o tamanho máximo é menor do que $60\mu\text{m}$, enquanto o tamanho médio é de $10,3\mu\text{m}$. Já o metacaulino (Figura 37) possui partículas de tamanho não superior a $25\mu\text{m}$, sendo $5,51\mu\text{m}$ o diâmetro médio. A superior finura deste componente, aliada ao melhor ajuste composicional para a geopolimerização, fazem antever que o metacaulino é mais reativo.

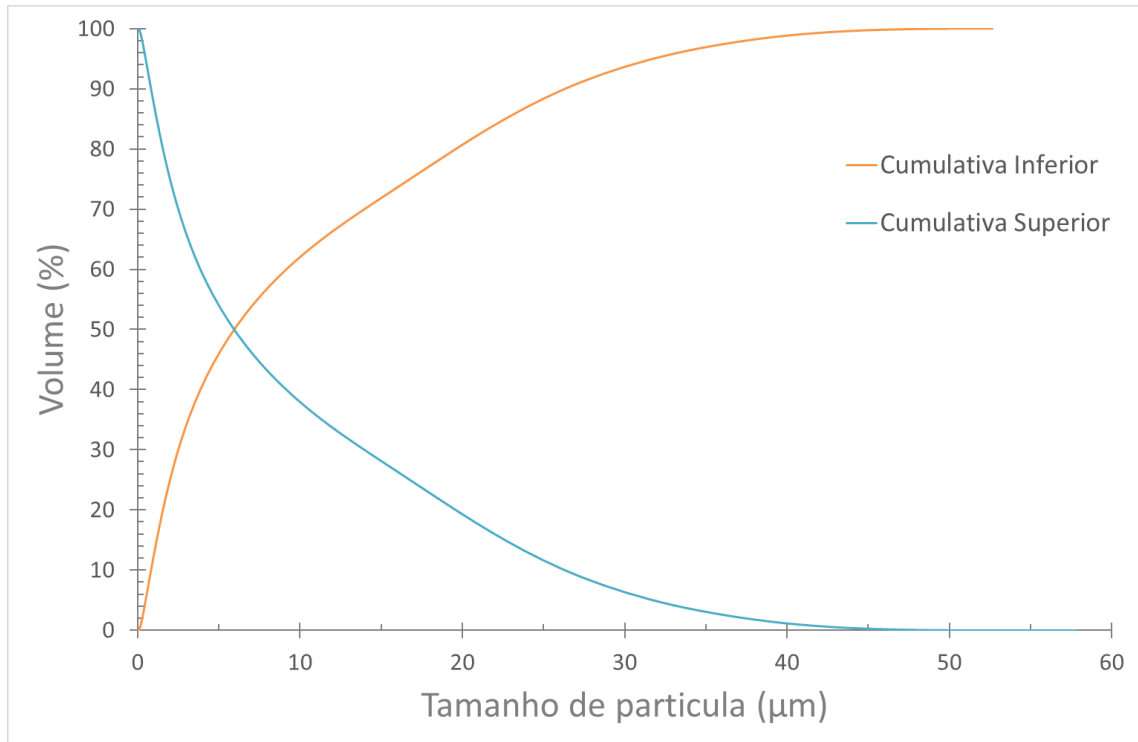


Figura 36 - Distribuição granulométrica das partículas de fibra de vidro após moagem e peneiração.

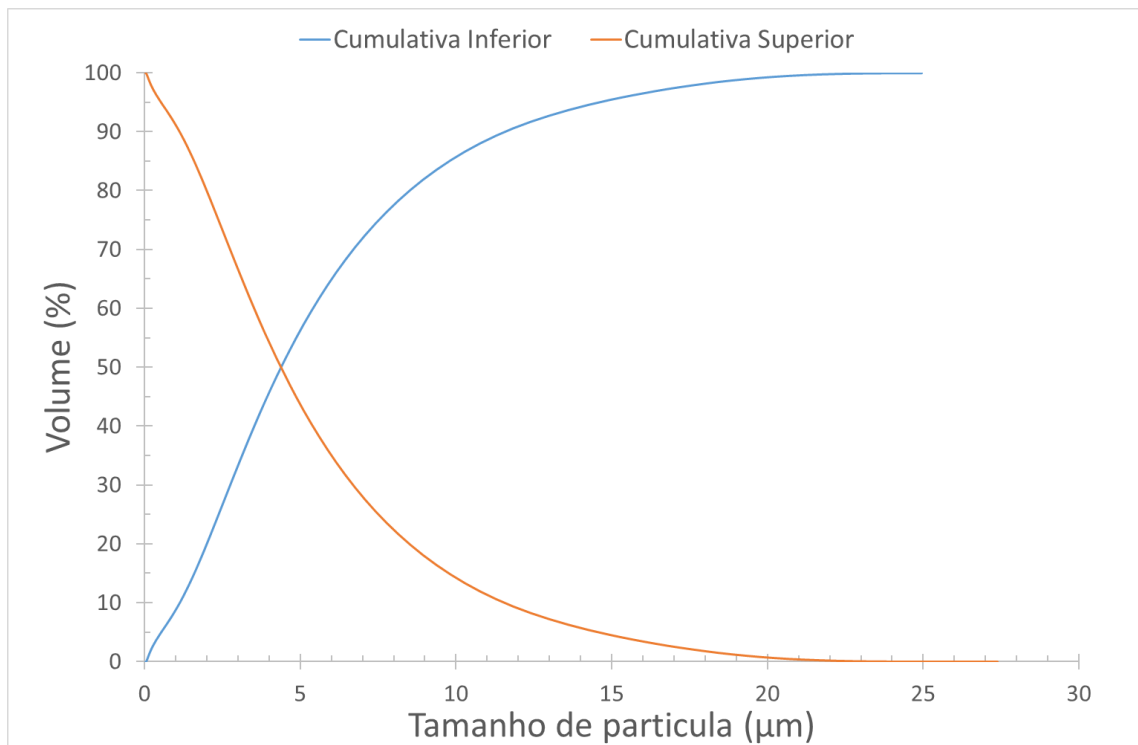


Figura 37 - Distribuição granulométrica das partículas de metacaulino.

As imagens de SEM, apresentadas na Figura 38, indicam que as partículas de fibra de vidro moída estão bem dispersas e apresentam elevada variedade na forma e tamanho. Já as partículas de metacaulino, visíveis por SEM na Figura 39, possuem formas mais regulares e tendência para aglomeração, mais comum entre grãos mais finos.

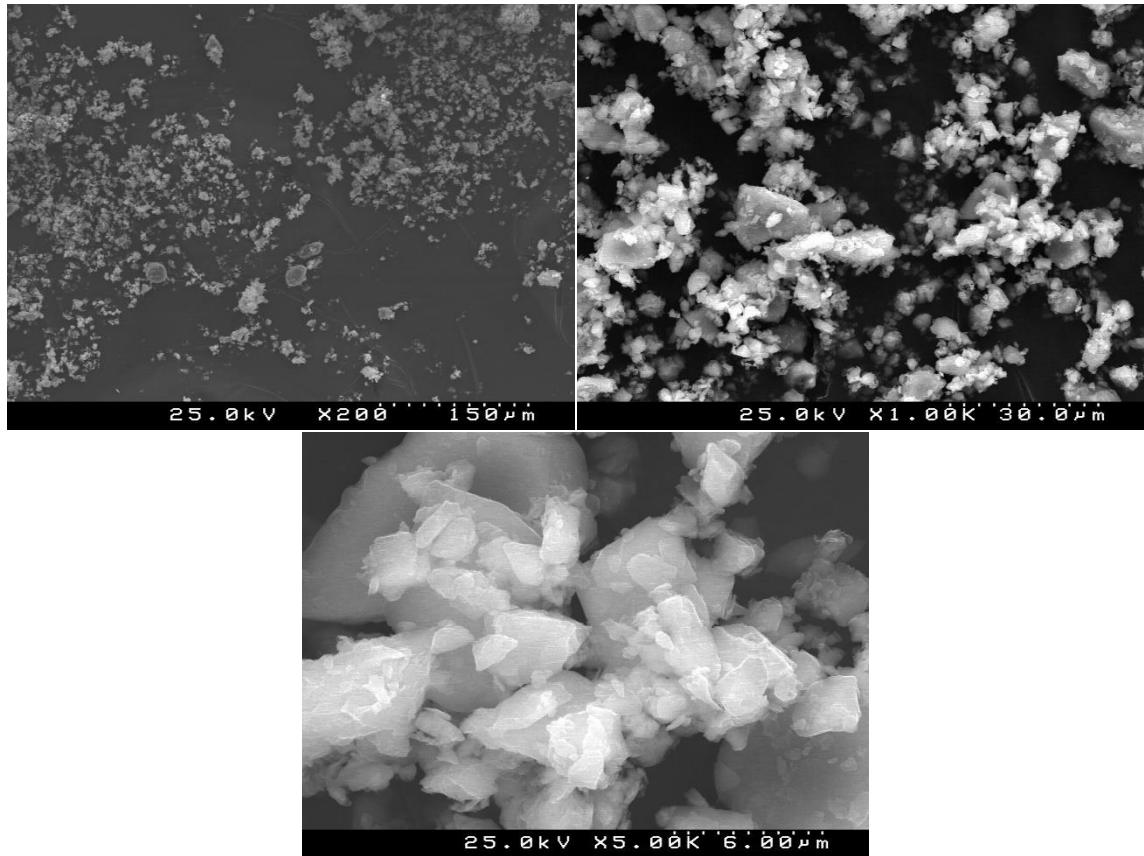


Figura 38 - Imagens obtidas em SEM das fibras de vidro moídas.

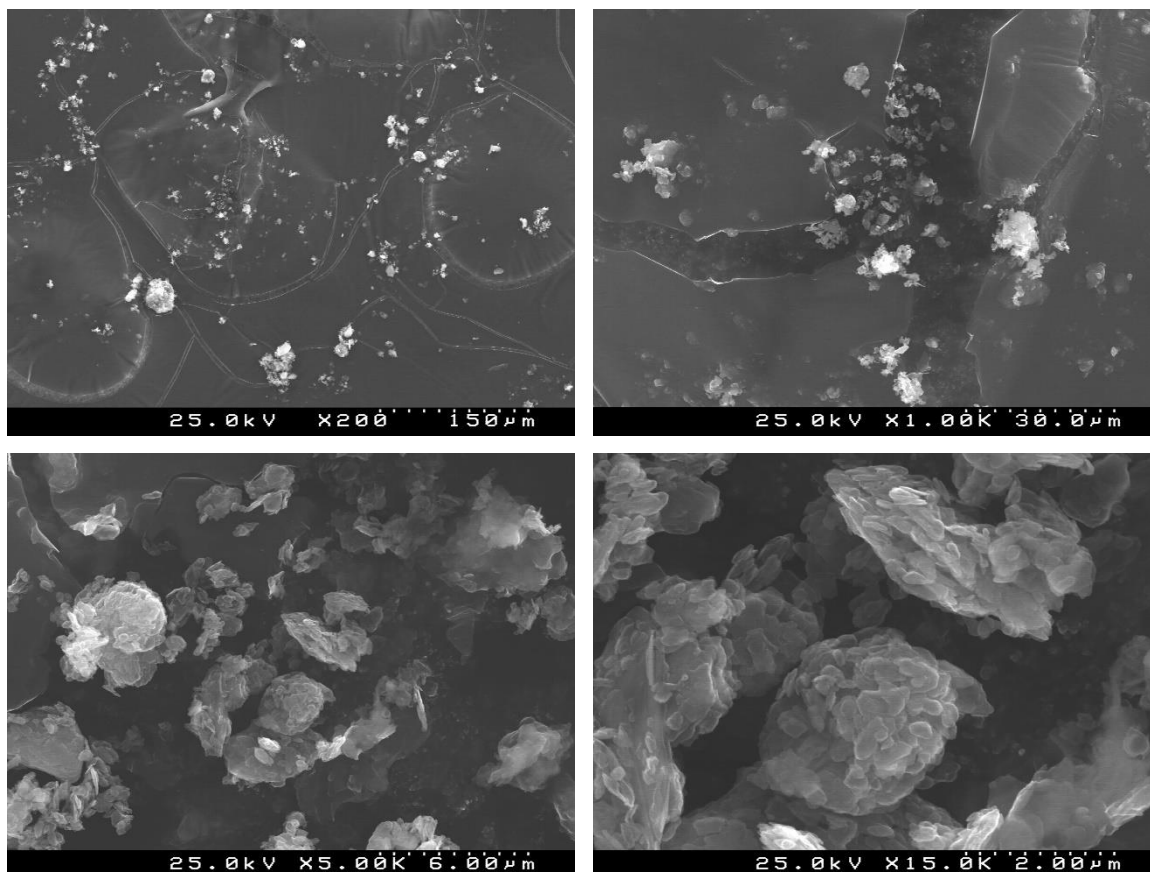


Figura 39 - Imagens obtidas por SEM das partículas de metacaulino.

4.3.2 Caracterização dos geopolímeros endurecidos

4.3.2.1 Fibra de vidro como substituinte parcial do metacaulino

A Tabela 15 fornece, para as várias formulações, os valores das relações molares entre óxidos, consideradas relevantes no processo de geoplimerização. Nestas misturas as quantidades de NaSiO_3 , NaOH e de H_2O mantiveram-se constantes. Sendo no teor de alumina que existe a maior diferença entre o metacaulino e as fibras, é nas razões que envolvem aquele óxido que se observam as maiores variações entre as diferentes formulações.

Tabela 15 – Relações molares relevantes no processo de geopolimerização correspondentes às diferentes formulações testadas.

<i>Relação Molar</i>	<i>Incorporação de resíduos de vidro (% massa)</i>				
	0	10	20	30	40
<i>SiO₂/Al₂O₃</i>	3,31	3,56	3,84	4,17	4,57
<i>Na₂O/SiO₂</i>	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33
<i>Na₂O/Al₂O₃</i>	1,10	1,18	1,28	1,39	1,53
<i>H₂O/Na₂O</i>	16,44	16,43	16,42	16,41	16,40

A Figura 40 apresenta a evolução da densidade das amostras com o tempo de cura. Em geral as diferenças entre as diferentes amostras são pequenas, porquanto são mais relevantes alguns parâmetros físicos dos materiais (ex. distribuição granulométrica, etc.) nas condições de processamento do que os efeitos composicionais. Em todos os casos regista-se acentuada diminuição de densidade entre 1 e 7 dias de cura, compatível com a libertação de água das amostras, sendo depois a variação muito menor até 28 dias de cura. Nas amostras curadas as diferenças de densidade são mínimas, independentemente da composição.

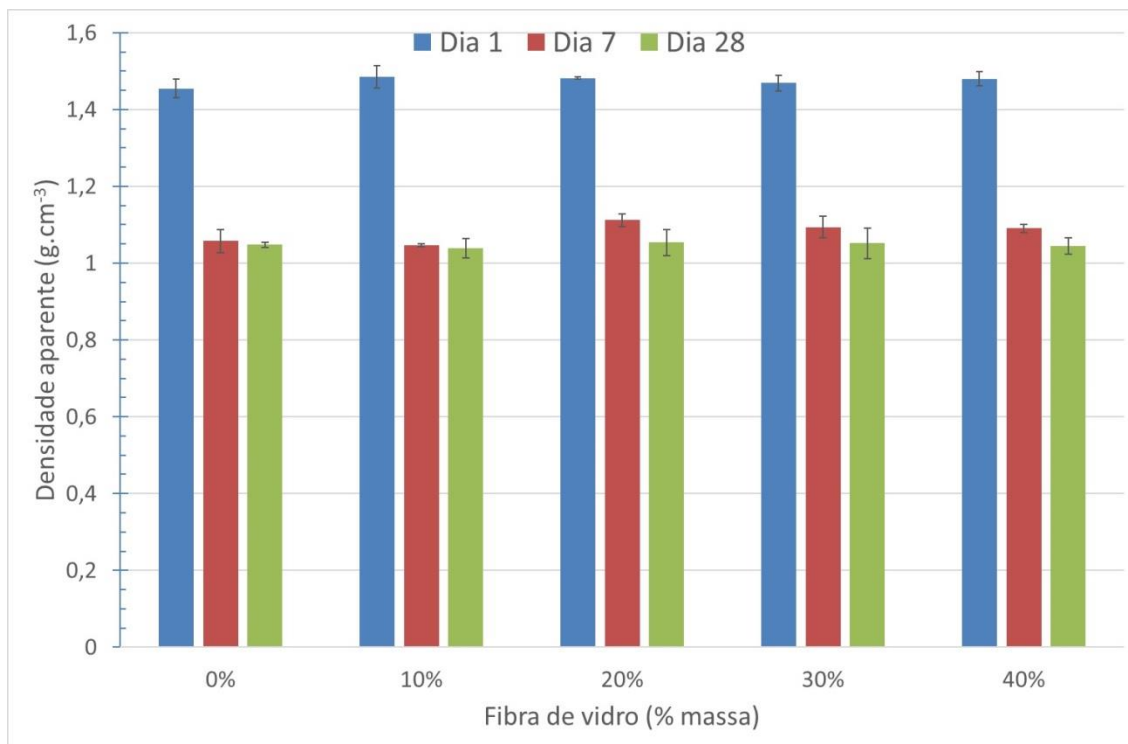


Figura 40 - Evolução da densidade aparente dos geopolímeros com o tempo de cura.

A Figura 41 mostra os valores da resistência à compressão das amostras curadas por tempos distintos. Em geral, observa-se ganho de resistência com o tempo de cura, compatível com um esperado acréscimo de reatividade das misturas. A substituição de metacaulino por resíduo moído de fibras de vidro tende a gerar materiais menos resistentes, esperada pelas mencionadas diferenças composicionais e maior granulometria do resíduo. Amostras contendo 40% de fibra de vidro apresentam valores de resistência abaixo de 5 MPa, sugerindo potenciais aplicações como leitos de coberturas de aterro ou de remoção de metais pesados.

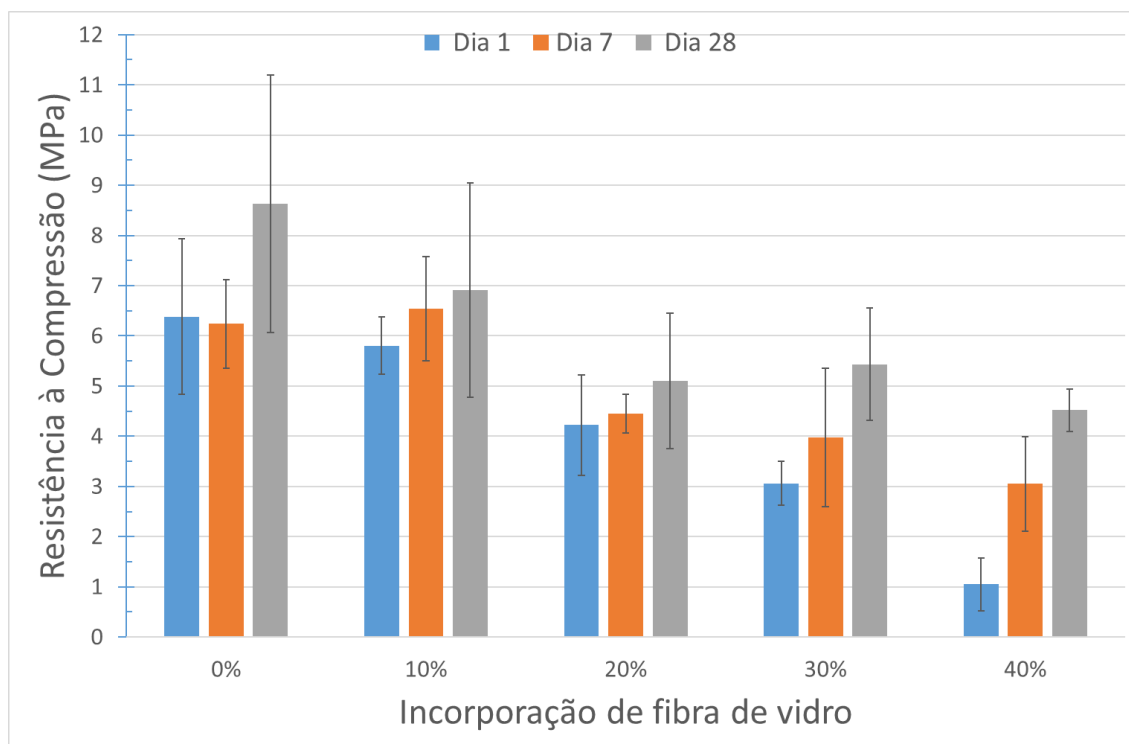


Figura 41 - Evolução da resistência à compressão ao longo do tempo e com o teor de resíduo de fibra de vidro em substituição de metacaulino.

As Figuras 42 e 43 mostram a superfície de fratura das amostras curadas durante 28 dias e ensaiadas à compressão. As diferenças entre os distintos materiais são pouco acentuadas, mas em alguns destaca-se a presença de partículas de fibra de vidro de dimensões consideráveis, que não terão sido recolhidas na operação de crivagem.

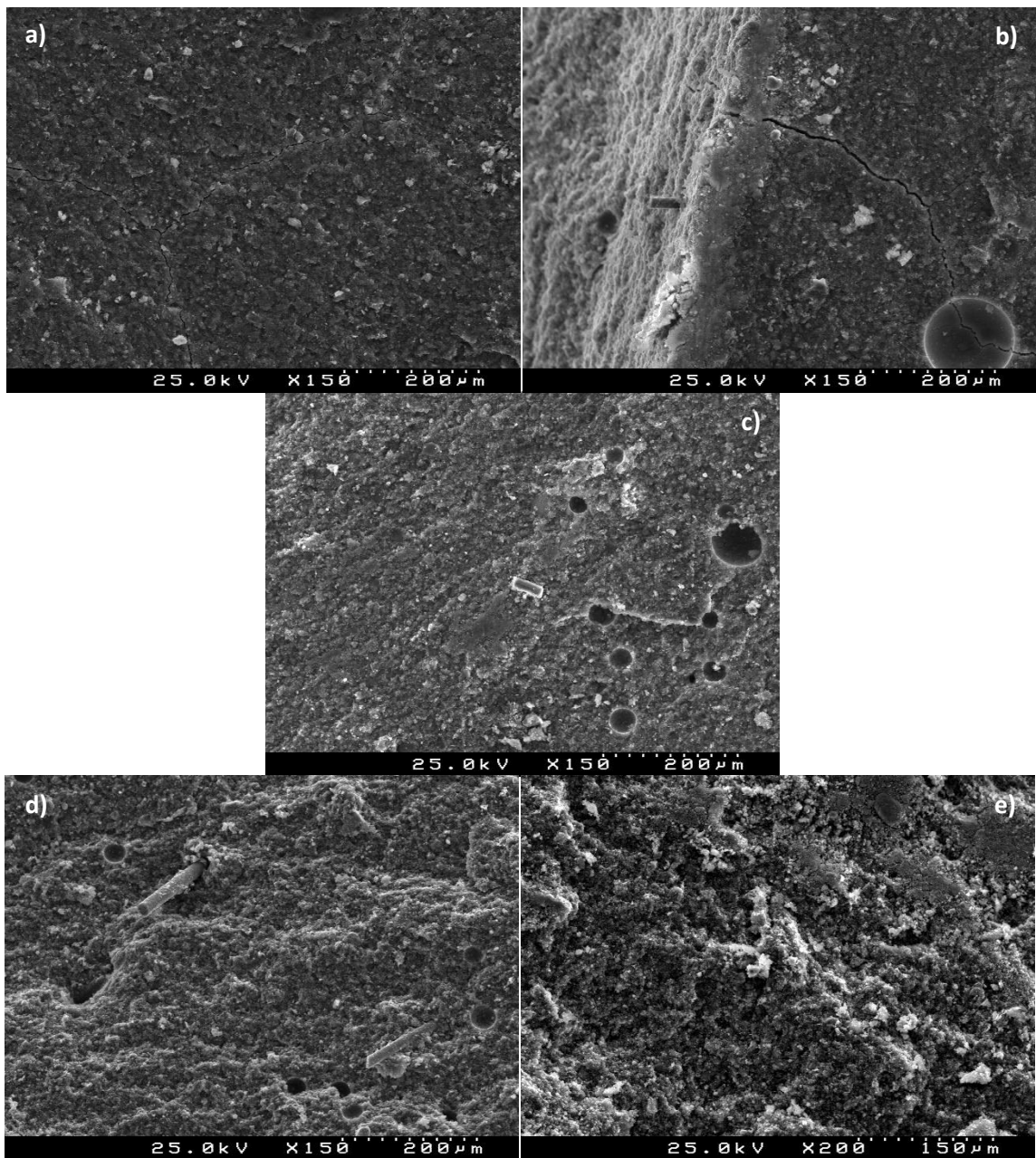


Figura 42 - Imagens obtidas por SEM da superfície de fractura das amostras sujeitas a compressão após 28 dias de cura; a)100% metacaulino; b)10% fibra de vidro; c)20% fibra de vidro; d)30% fibra de vidro; e)40% fibra de vidro.

Os valores de absorção de água das amostras, que traduzem a porosidade aberta do material, são dados na Tabela 16. Ainda assim convém alertar para o reduzido significado prático destes valores, uma vez que as amostras fraturaram quando imersas em água para estimar aquela propriedade (ver Figura 44). Esta indesejável ocorrência deve-se à expansão sofrida pelo material, induzida pela absorção muito rápida de água através da abundante microporosidade existente. A

estimativa da absorção de água foi obtida por capilaridade, embora apenas com os provetes restantes da formulação contendo 40% de fibra de vidro.

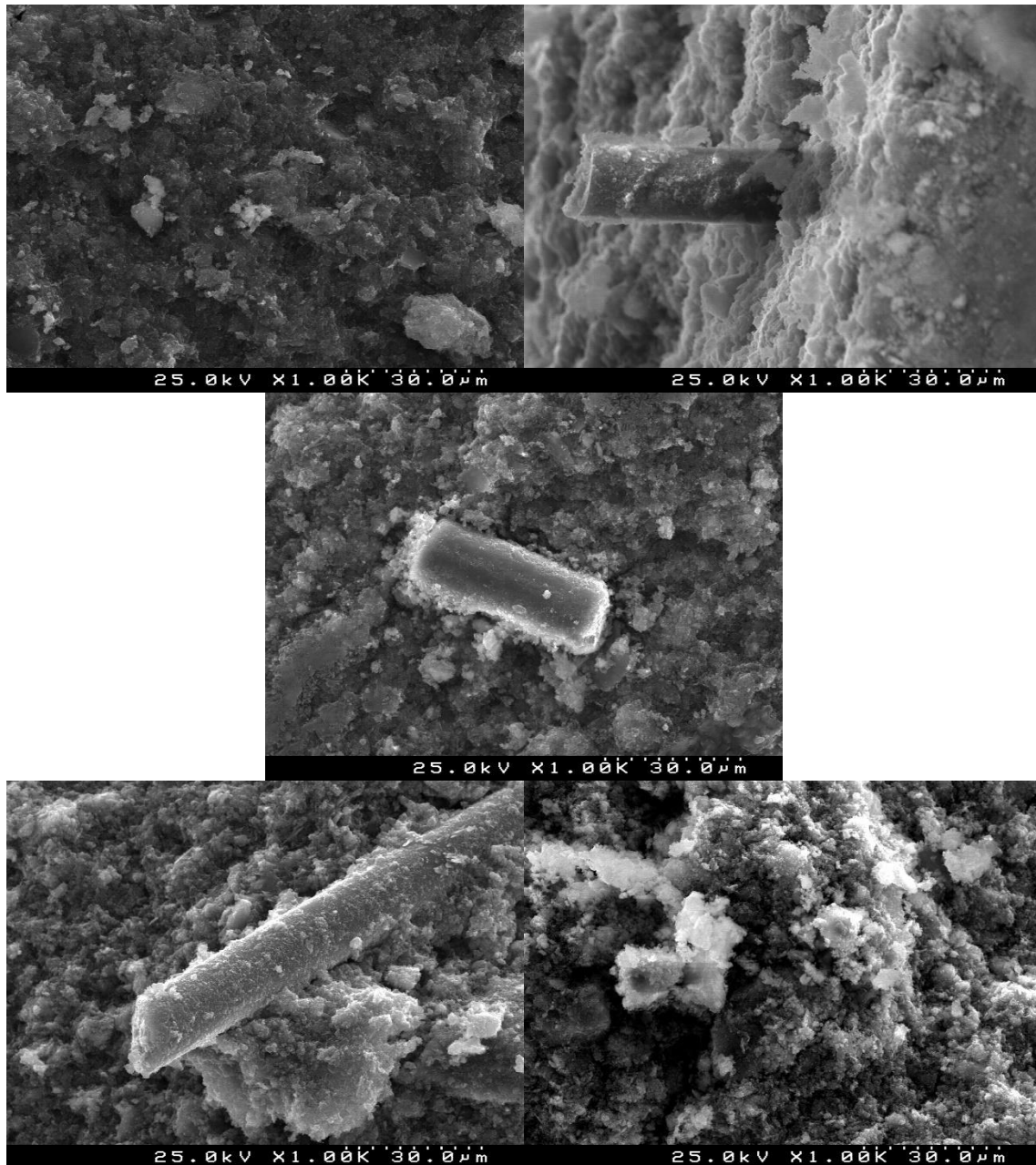


Figura 43 - Imagens obtidas por SEM da superfície de fractura das amostras sujeitas a compressão após 28 dias de cura, com superior ampliação que a Figura 42.

A estimativa de absorção de água para a amostra com 40% de fibras de vidro foi de 43,1%, algo acima de 39,6% estimada de forma convencional. Esta forma de avaliação revelou outro problema: a expressiva formação de eflorescências, como se pode verificar na Figura 45.

Tabela 16 – Valores de absorção de água das amostras curadas durante 28 dias.

Percentagem de fibra de vidro	Massa inicial (g)	Massa final (g)	AA (%)	AA _{med} (%)	Desvio padrão (%)
0%	18,88	26,97	42,85	42,86	0,19
	18,63	26,65	43,05		
	20,13	28,72	42,67		
10%	16,84	24,03	42,70	42,61	0,46
	19,34	27,66	43,02		
	18,38	26,12	42,11		
20%	19,46	27,55	41,57	41,40	0,94
	19,77	28,12	42,24		
	20,18	28,33	40,39		
30%	19,75	27,59	39,70	39,70	0,01
	19,55	27,31	39,69		
	20,02	27,97	39,71		
40%	17,03	23,73	39,34	39,55	0,27
	19,87	27,71	39,46		
	19,37	27,09	39,86		



Figura 44 - Provete fraturado após imersão em água.

A análise química efetuada por EDS às efluorescências revelou uma quantidade expressiva de sódio, pelo que se decidiu reduzir a quantidade de silicato de sódio na mistura de ativadores usados em novas formulações, contendo 20% de fibras de vidro em substituição de metacaulino. A nova formulação contém relações molares iguais a: 3,61 SiO₂/Al₂O₃; 0,29 Na₂O/SiO₂; 1,07 Na₂O/Al₂O₃; 16,43 H₂O/Na₂O.



Figura 45 - Amostras de geopolímeros com efluorescências após absorção de água por capilaridade.

A Figura 46 compara os valores da resistência à compressão desta nova formulação (designada por “otimização”) com a anteriormente preparada. Estudou-se a formulação contendo 20% de resíduo de fibras, uma vez que corresponde a incorporação de quantidade considerável e já apresentava resistência mecânica cerca de 5 MPa após 28 dias. Observa-se um claro ganho de resistência mecânica com o decréscimo da quantidade de Na_2O na mistura. Ao mesmo tempo, a nova mistura parece mais reativa, na medida em que se atinge máxima resistência ao fim de 7 dias de cura.

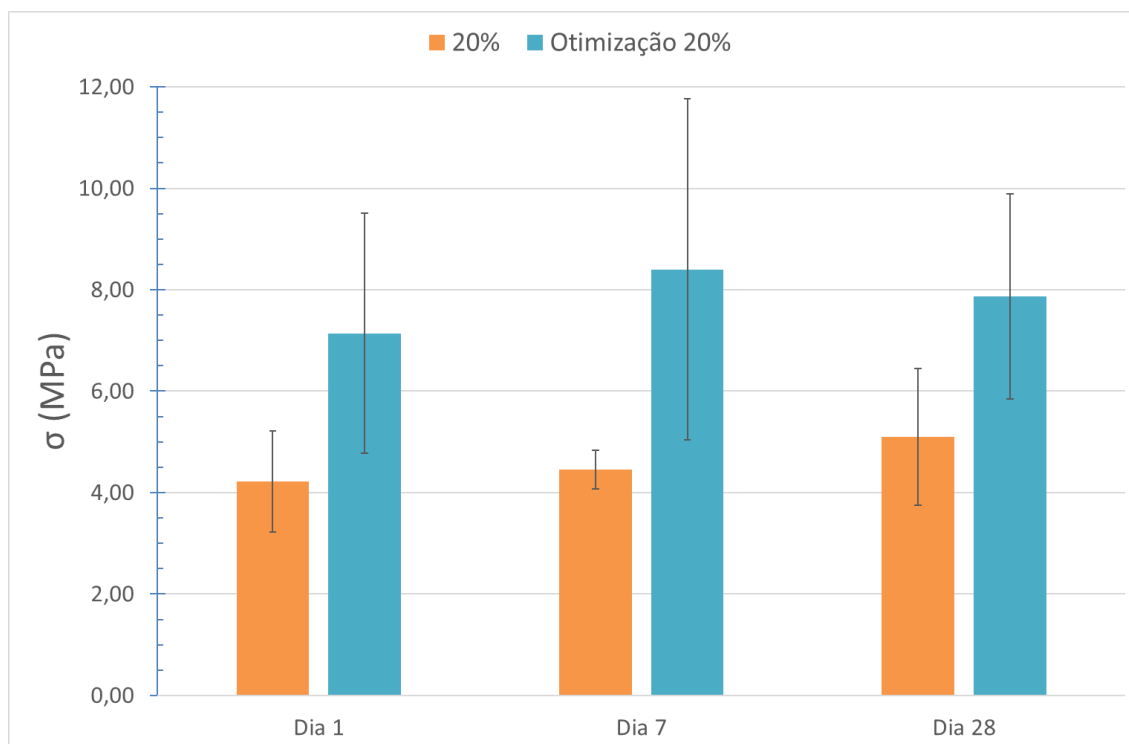


Figura 46 - Comparação da resistência à compressão entre amostras contendo 20% de fibra de vidro em substituição de metacaulino, curadas 28 dias, mas preparadas com quantidades distintas de silicato de sódio.

A Tabela 17 apresenta a evolução da densidade das amostras com o tempo de cura. As diferenças são pouco expressivas, mas o ganho verificado com a nova formulação sugere maior reatividade e melhor desenvolvimento microestrutural.

Tabela 17 - Comparação de densidades aparentes das amostras produzidas com 20%FV, inicialmente e sua otimização.

	Densidade média (g.cm ⁻³)		
	Dia 1	Dia 7	Dia 28
<i>Amostra inicial com 20% FV</i>	1,48±0,003	1,11±0,016	1,05±0,033
<i>Otimização da amostra com 20% FV</i>	1,51±0,017	1,16±0,039	1,10±0,018

A Tabela 18 mostra os valores de absorção de água das amostras curadas durante 28 dias. As diferenças são pouco expressivas e o ensaio da formulação otimizada volta a revelar a formação de eflorescências, o que sugere futuras alterações processuais no sentido de minimizar/evitar esta ocorrência.

Tabela 18 - Comparação entre a absorção de água das amostras contendo 20% de fibra de vidro, antes e após otimização da formulação.

<i>Porcentagem de fibra de vidro</i>	<i>Massa inicial (g)</i>	<i>Massa final (g)</i>	<i>AA (%)</i>	<i>AA_{med} (%)</i>	<i>Desvio padrão (%)</i>
<i>Amostra inicial com 20% FV</i>	19,46	27,55	41,57	41,40	0,94
	19,77	28,12	42,24		
	20,18	28,33	40,39		
<i>Otimização da amostra com 20% FV</i>	20,10	28,59	42,24	42,13	0,16
	19,03	27,06	42,20		
	20,43	29,00	41,95		

Apesar do carácter preliminar das experiências efetuadas, parece possível obter geopolímeros que incorporam até 20% de fibra de vidro em substituição de metacaulino.

4.3.2.2 Fibra de vidro como agente de reforço

Na Figura 47 são comparadas as densidades aparentes das diferentes formulações e a evolução das mesmas com o do tempo de cura.

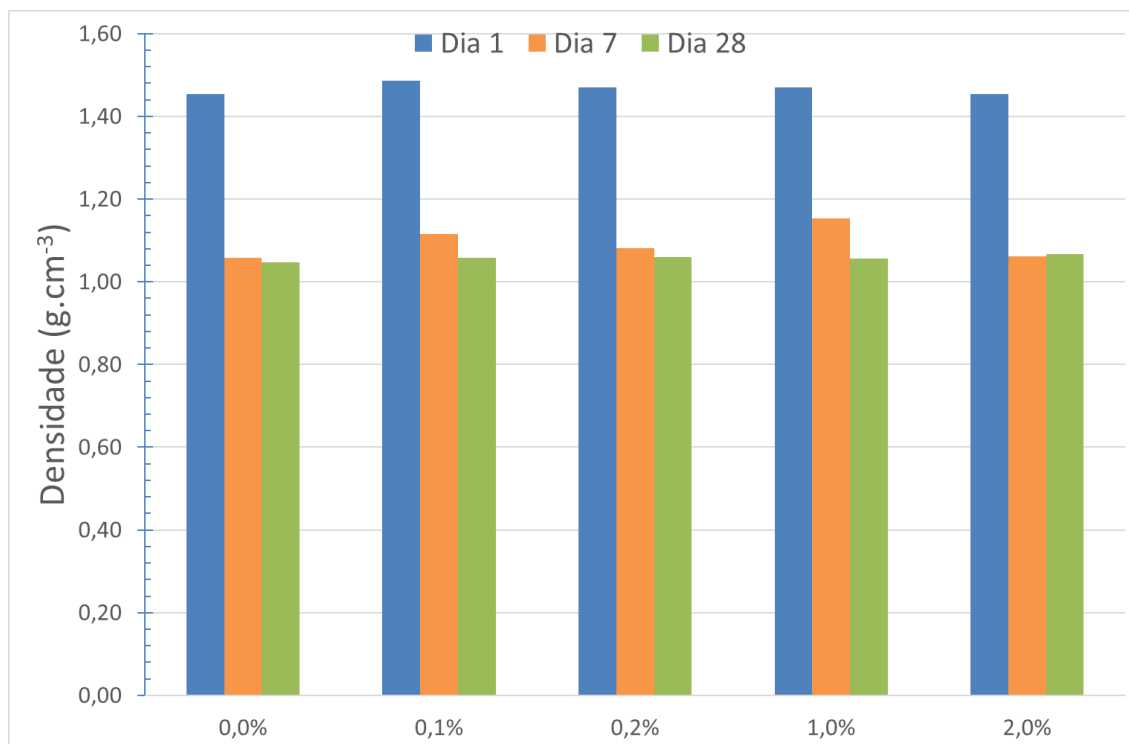


Figura 47 - Comparação das densidade aparentes das diferentes formulações contendo fibras de vidro como agente de reforço.

Pode verificar-se que as amostras não apresentam alterações significativas de densidade aparente com a variação do teor de fibras de vidro na sua composição, como era de prever pelos teores relativamente baixos de agente de reforço (até 3% em massa). Como anteriormente, observa-se perda de densidade com o aumento do tempo de cura, mais expressiva entre 1 e 7 dias. Isto deve-se ao facto de a água atuar como um reagente durante a o processo de dissolução e ser libertada ao longo do tempo durante o processo de policondensação.

A Figura 48 mostra os valores de resistência à compressão das amostras com reforço de fibras de vidro. A ação de reforço mecânico é expressa pelo ganho de resistência observado com aumento do teor de fibras, obtendo-se valores acima de 20 MPa com 2% de fibras. Ainda assim o ganho é de apenas 17,5% comparativamente à amostra contendo 0.1% de fibras. Naquela, a progressão com o tempo de cura é menos acentuada.

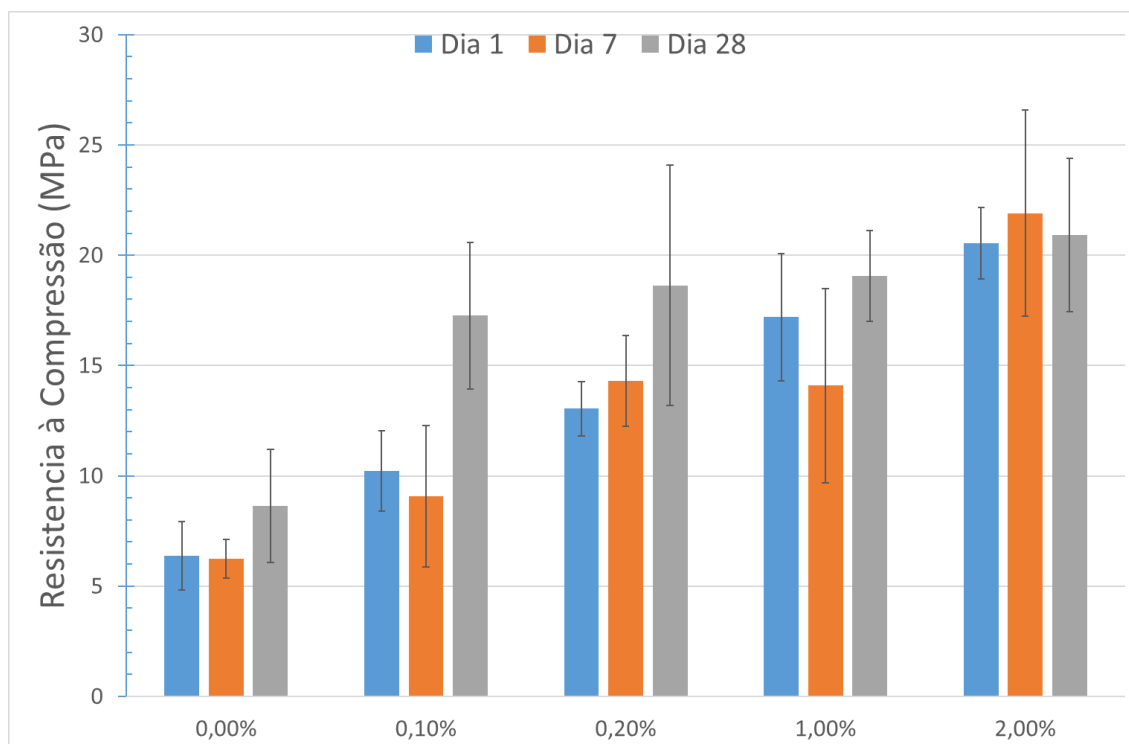


Figura 48 - Resistência à compressão de amostras geopoliméricas contendo diferentes quantidades de fibra de vidro (6mm) como agente de reforço e para distintos tempos de cura.

A Figura 49 mostra os resultados da resistência à compressão de amostras contendo fibras de vidro com maior tamanho (20mm de comprimento). A tendência geral é de ganho de resistência com o teor em fibras, embora menos expressivo que o verificado com fibras mais pequenas. Agora, 1% parece ser o teor ótimo de agente de reforço. A trabalhabilidade das amostras diminui como o aumento do tamanho das fibras e as dificuldades de processamento afetam negativamente o desempenho mecânico. O decréscimo de resistência à compressão com teores de fibras acima de 1% foi também observado em trabalhos anteriores, embora estudando materiais cimentícios e fibras naturais [41-42].

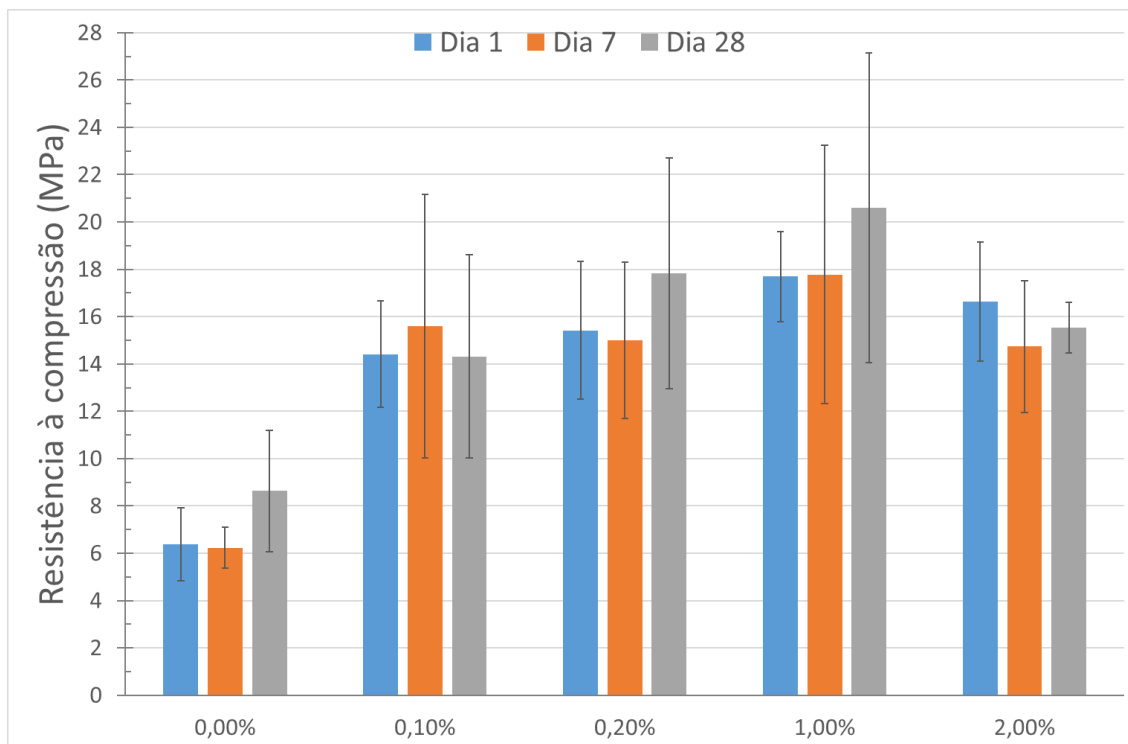


Figura 49 - Resistência à compressão de amostras contendo diferentes quantidades de fibra de vidro (20mm) como agente de reforço, curadas por tempos distintos.

Para além do ganho de resistência, a incorporação de quantidades crescentes de fibras diminui a quantidade e tamanho das fissuras, como era de esperar numa verdadeira ação de reforço mecânico. A Figura 50 mostra o aspeto dos provetes sem reforço e com reforço (2% de fibras) após o ensaio de compressão.

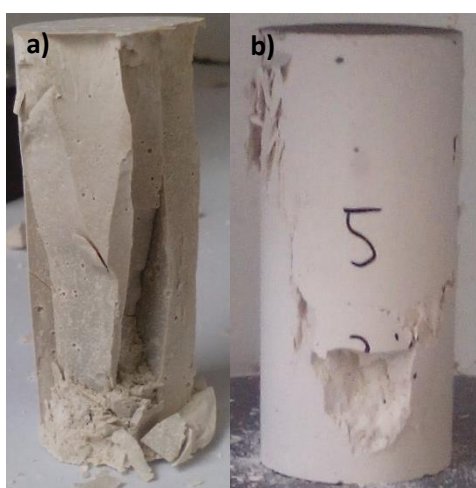


Figura 50 - Estado final dos provetes após os ensaios de compressão: a) amostra não reforçada; b) amostra reforçada com fibra de vidro (2% em massa, fibras de 6 mm).

As Figuras 51 e 52 mostram imagens de SEM de amostras ensaiadas à compressão. Para além da presença de fibras de vidro é possível observar a ocorrência de alguns “pullouts” (Figura 51). Este fenómeno indica que em determinadas zonas da amostra as fibras de vidro não proporcionaram um reforço eficiente.



Figura 51 - Imagens obtidas por SEM das amostras sujeitas a compressão após 28 dias de cura; a) 0,20% fibra de vidro; b) 1,00% fibra de vidro.

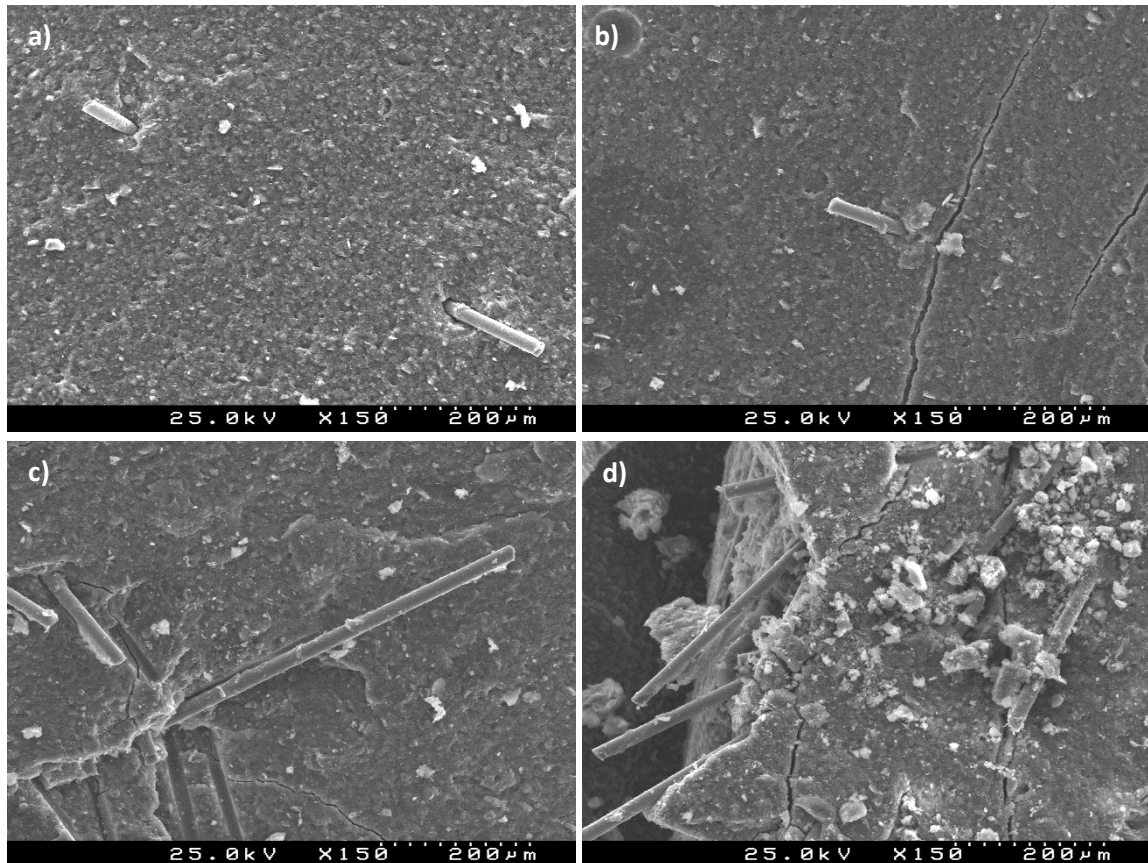


Figura 52 - Imagens obtidas por SEM das amostras sujeitas a compressão após 28 dias de cura; a) 0,10% fibra de vidro; b) 0,20% fibra de vidro; c) 1,00% fibra de vidro; d) 2,00% fibra de vidro.

A Figura 53 mostra os valores da resistência à flexão de amostras contendo fibras de 6mm de comprimento. Tal como na resistência à compressão, nota-se tendência geral de ganho de resistência com o aumento do teor de fibras. A resistência é máxima com 2% de fibras, mas a amostra contendo apenas 0,1% de agente de reforço já apresenta valores que não estão longe do máximo. Em todas as amostras com fibras não há ganho de resistência para tempos mais longos de cura, o que realça o papel do reforço sobre a reatividade química no desempenho mecânico do material.

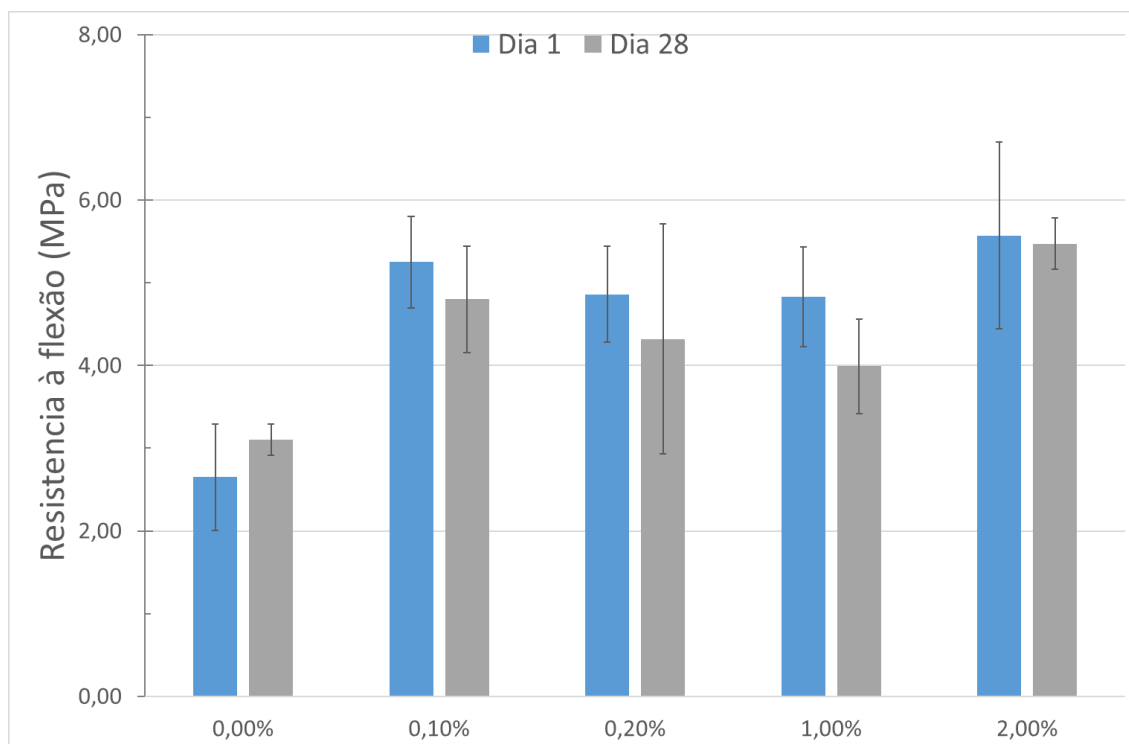


Figura 53 - Resistência à flexão das amostras contendo diferentes quantidades de fibra de vidro (6mm) como agente de reforço e curadas em dois períodos distintos.

A Figura 54 mostra os valores de resistência à flexão das amostras reforçadas com fibras de 20mm de comprimento. Agora, parece haver alguma vantagem na utilização de fibras de maior dimensão, o que se compreende por se tratar de esforço de flexão. O ganho com o teor de fibras é progressivo e mais acentuado para tempos de cura menores. Estranhamente, parece haver perda de desempenho para tempos de cura mais longos, embora o ensaio de amostras distintas possa responder pelas discrepâncias observadas.

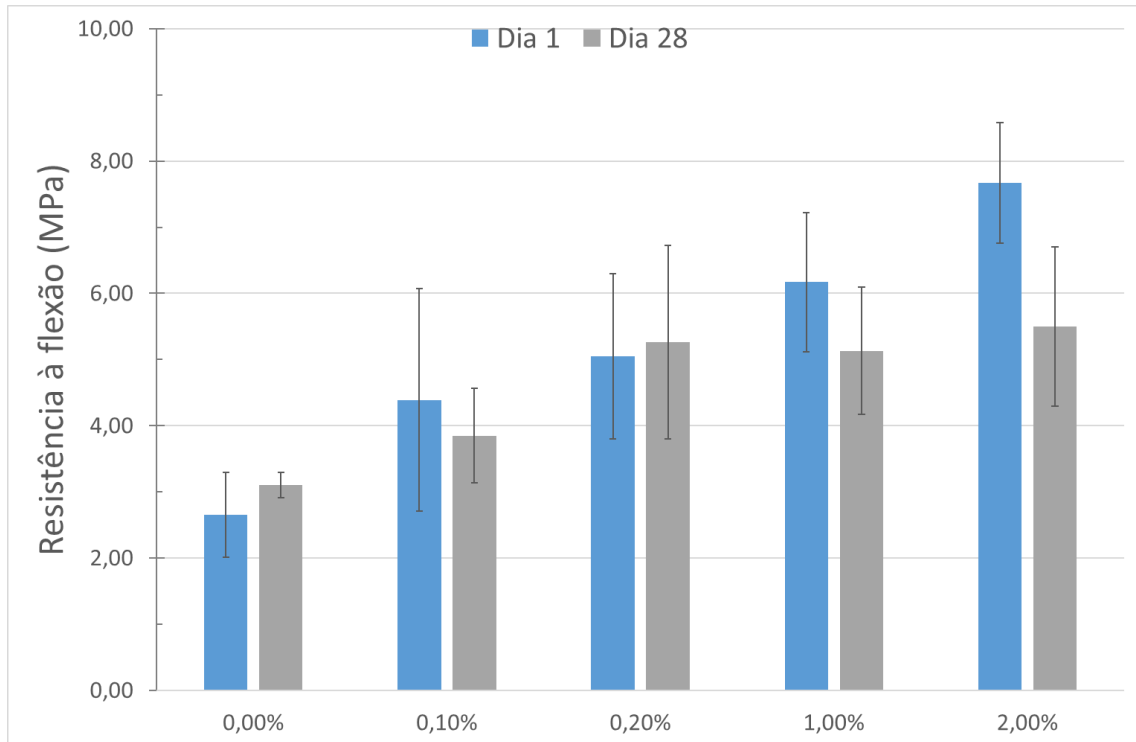


Figura 54 - Resistência à flexão das amostras com diferentes quantidades de fibra de vidro (20mm) como agente de reforço, curadas em períodos distintos.

5 Conclusões e Trabalho Futuro

Este trabalho permite concluir ser promissora a reciclagem de resíduos de fibra de vidro em diferentes produtos, minimizando as quantidades a depositar em aterro e contribuindo para melhorar o desempenho ambiental das empresas que produzem pás para geradores eólicos.

O primeiro produto ensaiado foram telas de impermeabilização de base polimérica, tendo-se verificado um ganho de resistência à tração com a incorporação de resíduo. Apesar de existirem algumas dificuldades de impregnação da resina em alguns tipos de fibra de vidro (AUX e BIA45), a requerer trabalho futuro de otimização processual (até agora muito rudimentar e exploratório), as amostras com fibra de vidro apresentam superior aderência ao betão relativamente à amostra padrão (Geotêxtil). Em particular as amostras contendo BIA 90 mostraram superior resistência à fissuração, merecendo estudos aprofundados de avaliação de diferentes parâmetros de desempenho, englobando aspetos de durabilidade. Importa dizer que o carácter promissor de algumas soluções testadas incentivou a Weber a prosseguir com ensaios de aplicação de telas em estruturas reais.

Nas argamassas a incorporação de fibra de vidro não aparenta prejudicar o seu desempenho, sendo semelhante ao de amostras produzidas com outros reforços fibrosos (poliméricos). Embora as quantidades incorporadas nesta aplicação sejam relativamente modestas, a reciclagem dos resíduos de fibras pode ainda assim ter impacto económico positivo nas duas empresas. De um lado, minimizam-se os custos de aquisição de material de reforço fibroso, enquanto na empresa geradora do resíduo pode conseguir-se escoar material a menor custo do que a deposição em aterro. Acrescem óbvios benefícios ambientais, já antes referidos. Ainda assim, é necessário efetuar um estudo mais aprofundado para explicar e controlar a evolução de algumas propriedades das argamassas, bem como de otimização processual e de aferição da durabilidade do produto para tempos mais longos.

Numa vertente ainda sem grande comercialização em Portugal, o desenvolvimento de geopolímeros contendo resíduos de fibra de vidro parece viável. Como substituto de metacaulino, o pó moído de fibras de vidro não altera significativamente a densidade aparente das amostras. No entanto verifica-se uma descida na resistência à compressão com o aumento de resíduo de fibra de vidro. Até 20% de incorporação é possível obter valores de resistência superiores a 4MPa ao fim do primeiro dia de cura. Com a otimização da formulação desta amostra foi possível duplicar o valor da resistência à compressão (> 8MPa). Acima de 20% regista-se perda notória de resistência. Esta possível solução de reciclagem obriga a equacionar os custos de moagem e peneiração do resíduo.

Ainda assim são conhecidos os negativos impactos da utilização de metacaulino, decorrentes da necessidade de calcinar e moer o material. Também uma futura otimização processual é necessária, que evite a formação de eflorescências e promova maior extensão do processo reativo.

O reforço mecânico de matrizes geopoliméricas pode ser uma função complementar das fibras de vidro residuais. Os resultados preliminares obtidos mostram ganhos de resistência à compressão de 4 vezes quando se incorporam (até 2% em massa) fibras de 6mm de comprimento, relativamente a amostras sem reforço. O uso de fibras mais longas (20mm) é mais eficaz no aumento da resistência à flexão, pelo que se sugere uma combinação de ambas para garantir ação mais completa de melhoria de desempenho.

Bibliografia

- [1] M. Prado, "Fábrica de pás eólicas em Aveiro reforça produção e emprego - Empresas - Jornal de Negócios," 2012. [Online]. Available: http://www.jornaldenegocios.pt/empresas/detalhe/faacutefbrica_de_paacutes_eoacutelicas_em_aveiro_reforccedila_produccedilatildeo_e_emprego.html. [Accessed: 18-Oct-2016].
- [2] F. T. Wallenberger, R. J. Hicks, and A. T. Bierhals, "Design of environmentally friendly fiberglass compositions: Ternary eutectic $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-CaO}$ compositions, structures and properties," *J. Non. Cryst. Solids*, vol. 349, no. 1–3, pp. 377–387, 2004.
- [3] F. T. Wallenberger and P. A. Bingham, *Fiberglass and glass technology: Energy-friendly compositions and applications*. 2010.
- [4] B. C. McLellan, R. P. Williams, J. Lay, A. Van Riessen, and G. D. Corder, "Costs and carbon emissions for geopolymer pastes in comparison to ordinary portland cement," *J. Clean. Prod.*, vol. 19, no. 9–10, pp. 1080–1090, 2011.
- [5] J. He, J. Zhang, Y. Yu, and G. Zhang, "The strength and microstructure of two geopolymers derived from metakaolin and red mud-fly ash admixture: A comparative study," *Constr. Build. Mater.*, vol. 30, pp. 80–91, 2012.
- [6] M. Cyr, R. Idir, and T. Poinot, "Properties of inorganic polymer (geopolymer) mortars made of glass cullet," *J. Mater. Sci.*, vol. 47, no. 6, pp. 2782–2797, 2012.
- [7] B. Taha and G. Nounu, "Utilizing Waste Recycled Glass as Sand/Cement Replacement in Concrete," *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 21, no. 12, pp. 709–721, 2009.
- [8] Q. Nie, W. Hu, T. Ai, B. Huang, X. Shu, and Q. He, "Strength properties of geopolymers derived from original and desulfurized red mud cured at ambient temperature," *Constr. Build. Mater.*, vol. 125, pp. 905–911, 2016.
- [9] J. G. Lopes, J. R. Correia, and M. X. B. MacHado, "Dimensional stability of waterproofing bituminous sheets used in low slope roofs," *Constr. Build. Mater.*, vol. 25, no. 8, pp. 3229–3235, 2011.
- [10] L. C. Hollaway, "Key issues in the use of fibre reinforced polymer (FRP) composites in the rehabilitation and retrofitting of concrete structures," *Woodhead Publ. Ser. Civ. Struct. Eng.*, pp. 3–74, 2011.
- [11] C. A. Harper, *Modern Plastics Handbook*. 2000.
- [12] P. K. Saxena, K. G. Raut, S. R. Sdnlvasan, S. Sivaram, R. S. Rawat, and R. K. Jain, "Polyurethane

- waterproofing coating for building applicon,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 5, no. 4, pp. 3–5, 1991.
- [13] R. S. N. Paulo, “Caracterização de Argamassas Industriais,” Universidade de Aveiro, 2006.
- [14] D. R. Pires de Paula e Cunha, “Estudo de argamassas com base em cal hidráulica e suas aplicações,” Universidade de Aveiro, 2013.
- [15] J. Davidovits, “Global Warming Impact on the Cement and Aggregates Industries,” *World Resour. Rev.*, vol. 6, no. 2, pp. 263–278, 1994.
- [16] F. Iucolano, B. Liguori, and C. Colella, “Fibre-reinforced lime-based mortars: A possible resource for ancient masonry restoration,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 38, pp. 785–789, 2013.
- [17] N. G. Ozerkan, B. Ahsan, S. Mansour, and S. R. Iyengar, “Mechanical performance and durability of treated palm fiber reinforced mortars,” *Int. J. Sustain. Built Environ.*, vol. 2, no. 2, pp. 131–142, 2014.
- [18] H. I. N. Gonçalves, “Revestimento de parede como componente passivo para controlo de humidade ambiente,” 2010.
- [19] M. do R. da Silva Veiga, “Comportamento de argamassas de revestimento de paredes,” Universidade do Porto, 1998.
- [20] P. K. Mehta and P. J. M. Monteiro, *Concrete: microstructure, properties, and materials*. 2006.
- [21] L. Senff, R. C. E. Modolo, D. M. Tobaldi, G. Ascensão, D. Hotza, V. M. Ferreira, and J. A. Labrincha, “The influence of TiO₂ nanoparticles and poliacrilonitrile fibers on the rheological behavior and hardened properties of mortars,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 75, no. JANUARY, pp. 315–330, 2015.
- [22] O. Kelestemur, S. Yildiz, B. Gökçer, and E. Arici, “Statistical analysis for freeze-thaw resistance of cement mortars containing marble dust and glass fiber,” *Mater. Des.*, vol. 60, pp. 548–555, 2014.
- [23] B. Liguori, D. Caputo, and F. Iucolano, “Fiber-reinforced lime-based mortars: Effect of zeolite addition,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 77, pp. 455–460, 2015.
- [24] K. Komnitsas and D. Zaharaki, “Geopolymerisation: A review and prospects for the minerals industry,” *Miner. Eng.*, vol. 20, no. 14, pp. 1261–1277, 2007.
- [25] D. Papias and I. Giannopoulou, “Geopolymers: a new generation of inorganic polymeric novel materials,” *Adv. Miner. Resour. Manag. Environ. Geotechnol.*, no. January, pp. 407–412, 2004.
- [26] J. Davidovits, “GEOPOLYMERS Inorganic polymeric new materials,” *J. Therm. Anal.*, vol. 37, pp. 1633–1656, 1991.

- [27] H. Xu and J. S. J. Van Deventer, "Geopolymerisation of Aluminosilicate Minerals," vol. 42, p. 270, 2002.
- [28] S. M. Mansour, "Improvement of Rheological behaviour of Cement Pastes by Incorporating Metakaolin," *J. Sci. Res.*, vol. 42, no. 3, pp. 442–452, 2010.
- [29] B. Sabir, S. Wild, and J. Bai, "Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete: A review," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 23, no. 6, pp. 441–454, 2001.
- [30] R. Siddique and J. Klaus, "Influence of metakaolin on the properties of mortar and concrete : A review," *Appl. Clay Sci.*, vol. 43, no. 3–4, pp. 392–400, 2009.
- [31] R. M. Novais, G. Ascensão, M. P. Seabra, and J. A. Labrincha, "Waste glass from end-of-life fluorescent lamps as raw material in geopolymers," *Waste Manag.*, vol. 52, pp. 245–255, 2016.
- [32] G. B. Maranan, A. C. Manalo, B. Benmokrane, W. Karunasena, and P. Mendis, "Evaluation of the flexural strength and serviceability of geopolymer concrete beams reinforced with glass-fibre-reinforced polymer (GFRP) bars," *Eng. Struct.*, vol. 101, pp. 529–541, 2015.
- [33] J. I. Silva Marques, "Geopolimerização de Cinzas e Dregs da Indústria de Pasta de Papel," Universidade de Aveiro, 2013.
- [34] O. Cristina, "Valorização de resíduos da indústria de celulose por geopolimerização Valorização de resíduos da indústria de celulose por geopolimerização," 2014.
- [35] P. Duxson, A. Fernández-Jiménez, J. L. Provis, G. C. Lukey, A. Palomo, and J. S. J. Van Deventer, "Geopolymer technology: The current state of the art," *J. Mater. Sci.*, vol. 42, no. 9, pp. 2917–2933, 2007.
- [36] M. Torres-Carrasco and F. Puertas, "Waste glass in the geopolymer preparation. Mechanical and microstructural characterisation," *J. Clean. Prod.*, vol. 90, pp. 397–408, 2015.
- [37] H. Hao, K.-L. Lin, D. Wang, S.-J. Chao, H.-S. Shiu, T.-W. Cheng, and C.-L. Hwang, "Utilization of Solar Panel Waste Glass for Metakaolinite-Based Geopolymer Synthesis," *Environ. Process Sustain. Energy*, vol. 32, pp. 797–803, 2013.
- [38] K. L. Lin, H. S. Shiu, J. L. Shie, T. W. Cheng, and C. L. Hwang, "Effect of composition on characteristics of thin film transistor liquid crystal display (TFT-LCD) waste glass-metakaolin-based geopolymers," *Constr. Build. Mater.*, vol. 36, pp. 501–507, 2012.
- [39] C. Bobiričă, J.-H. Shim, J.-H. Pyeon, and J.-Y. Park, "Influence of waste glass on the microstructure and strength of inorganic polymers," *Ceram. Int.*, vol. 41, no. 10, pp. 13638–13649, 2015.
- [40] Maris Polymers, "Mariseal® 250 Technical Data Sheet." 2011.

- [41] M. A. Ismail, "Compressive and Tensile Strength of Natural Fibre-reinforced Cement base Composites," *Al-Rafidain Eng. vol. 15*, 2005.
- [42] S. M. Islam, R. R. Hussain, and M. a. Z. Morshed, "Fiber-reinforced concrete incorporating locally available natural fibers in normal- and high-strength concrete and a performance analysis with steel fiber-reinforced composite concrete," *J. Compos. Mater.*, vol. 46, pp. 111–122, 2012.