

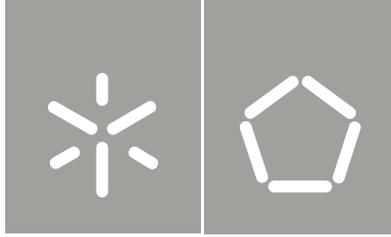


Mário Jorge Forte Martins Cunha

Durabilidade de Geopolímeros Monofásicos

Universidade do Minho
Escola de Engenharia





Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Mário Jorge Forte Martins Cunha

Durabilidade de Geopolímeros Monofásicos

Tese de Mestrado
Ciclo de Estudos Integrados Conducentes ao
Grau de Mestre em Engenharia Civil

Trabalho efetuado sob a orientação do
Professor Doutor José Luís Barroso de Aguiar

Coorientador:
Professor Doutor Fernando M. Alves S. Pacheco Torgal

Agradecimentos

A realização desta dissertação só foi possível devido ao contributo de todos aqueles que de uma forma ou de outra ajudaram à sua concretização, desde já expresso os meus sinceros agradecimentos.

Aos meus orientadores, Professor Doutor José Luís Barroso de Aguiar e Doutor Fernando Pacheco Torgal, o meu sincero agradecimento pelos seus conhecimentos, pela paciência, pelo tempo dispensado e apoio ao longo da realização da dissertação.

Aos meus pais, minha irmã, ao meu cunhado e ao meu sobrinho, pelo enorme apoio, por estarem ao meu lado nos momentos mais complicados, por me fazerem sorrir quando a vontade era pouca e por acreditarem em mim, um muito obrigado.

Aos engenheiros e técnicos presentes no Laboratório de Materiais de Construção da Universidade do Minho exprimo o meu agradecimento por todo o apoio prestado, pela sua amizade e pela motivação que me transmitiram para a realização de todos os ensaios.

Um especial agradecimento ao engenheiro Carlos Jesus, por ter ajudado em tudo aquilo que estava ao seu alcance, por todo o apoio depositado, mas especialmente pela sua amizade e preocupação.

Um enorme agradecimento aos meus amigos David Branco, Susana Marques, Filipe Lopes pelo carinho, pela amizade, pelo apoio que me transmitiram ao longo desta dissertação, e principalmente pelos momentos de divertimento partilhados em grupo.

Agradeço a todos os meus restantes amigos e colegas, que sempre estiverem presentes nos momentos de descontração e contribuíram para o meu bem-estar.

Aos elementos do grupo Nação Capoeira, que sempre estiveram do meu lado dando motivação para seguir em frente, mostrando que é possível conciliar um longo percurso académico com a vida de desportista, muito Axé.

RESUMO

Tendo em conta que o consumo de cimento Portland aumenta ano após ano, levando ao aumento das emissões de CO₂ na produção do mesmo, torna-se necessário encontrar novos materiais ligantes alternativos mais eco-eficientes.

Segundo estudos realizados com materiais de ativação alcalina (também designados por geopolímeros), estes possuem maiores resistências do ponto de vista mecânico, têm maior durabilidade e estabilidade, e atingem estes comportamentos com maior rapidez do que os materiais à base de cimento Portland.

Geopolímeros monofásicos é a designação dada para um novo e recente tipo de geopolímeros objeto de estudo nesta dissertação, diferendo dos geopolímeros clássicos por não conterem silicatos de sódio, constituinte responsável por uma elevada pegada carbónica.

O presente trabalho de investigação tem como principal objetivo determinar a durabilidade de novas argamassas geopoliméricas, de forma a verificar se são mais ou menos vantajosas relativamente ao cimento Portland e relativamente a outras argamassas geopoliméricas, mas também para servir como termo de comparação para novas misturas que possam surgir nesta área.

Nesta dissertação apresentam-se resultados sobre a trabalhabilidade, ensaios de resistência à compressão e à flexão, e sobre alguns parâmetros de durabilidade avaliados com recurso ao ensaio de absorção de água por capilaridade, de absorção de água por imersão, e de resistência ao ataque químico, em argamassas de cimento Portland, argamassas de cimento Portland com cinzas volantes e argamassas de geopolímeros monofásicos.

Os resultados obtidos mostram que as argamassas de geopolímeros monofásicos possuem resistências mecânicas inferiores às argamassas de cimento Portland. No entanto as argamassas geopoliméricas com 4% de metacaulino e hidróxido de sódio apresentam desempenhos muito próximos dos resultados obtidos para cimentos Portland, sendo até mesmos superiores no ensaio de absorção de água por imersão.

PALAVRAS-CHAVE: Geopolímeros monofásicos, trabalhabilidade, resistências mecânicas, durabilidade.

ABSTRACT

Given that the consumption of Portland cement increases year after year, leading to an increase in CO₂ emissions in the production of the same, it is necessary to find new and eco-efficient alternative binder materials.

According to studies performed with materials, alkaline activation (also known as geopolymers), they have greater mechanical resistance, have increased durability and achieve these behaviors faster than Portland cement based materials.

One-part geopolymers is the name given to a new and recent type of geopolymers studied in the present dissertation. They differ from classic geopolymers because they do not contain sodium silicate, which is responsible for a high carbon footprint.

The current research work had as main objective to assess the durability of the new one-part geopolymeric mortars in order to verify whether they are more or less advantageous than Portland cement mortars or other classic geopolymeric mortars. And also to serve as reference work for future mixtures in this field.

This dissertation presents results on workability, compressive and flexural strength and also on some durability parameters assessed with capillary water absorption test, water absorption by immersion test, and resistance to chemical attack in Portland cement mortars, Portland cement mortars with fly ash and one-part geopolymers mortars.

The results show that the one-part geopolymeric mortars show mechanical resistances lower than Portland cement mortars, however one-part geopolymeric mortars with 4% metakaolin and sodium hydroxide exhibit performances very similar to the ones obtained with Portland cement mortars, even superior in terms of water absorption by immersion.

KEYWORDS: One-part geopolymeric mortars, workability, mechanical strength, durability.

Índice

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Enquadramento	1
1.2	Objetivo e metodologia.....	2
1.3	Organização da dissertação.....	3
2	ESTADO DE ARTE.....	5
2.1	Introdução aos Geopolímeros	5
2.2	Aspetos Estruturais dos Geopolímeros	5
2.3	Aplicações dos Geopolímeros.....	8
2.4	Propriedades dos Betões Geopoliméricos.....	10
2.5	Interação com o Ambiente	12
2.6	Vantagens dos Geopolímeros	14
2.7	Durabilidade dos Geopolímeros	15
2.7.1	Resistência aos ácidos	16
2.7.2	Resistência a altas temperaturas	17
2.7.3	Resistência ao fogo.....	18
2.7.4	Resistência ao gelo-desgelo	19
2.7.5	Resistência à abrasão.....	19
2.7.6	Possibilidade da ocorrência da reação álcali-agregado	20
2.8	Geopolímeros monofásicos.....	22
3	MATERIAIS, COMPOSIÇÕES E ENSAIOS	25
3.1	Materiais	25
3.1.1	Cimento	25
3.1.2	Areia Fina.....	26
3.1.3	Água	27
3.1.4	Cinzas volantes.....	27
3.1.5	Hidróxido de Cálcio	29
3.1.6	Metacaulino aditivado com hidróxido de sódio.....	30
3.1.7	Superplastificante	33
3.2	Composições	34
3.2.1	Composição de referência	36
3.2.2	Composição de referência com adição de cinzas volantes.....	36
3.2.3	Composições de misturas geopoliméricas.....	36

3.3	Ensaio em argamassas	38
3.3.1	Amassadura.....	38
3.3.2	Comportamento da argamassa fresca	39
3.3.3	Moldagem, conservação, tipo e dimensão dos provetes.....	42
3.3.4	Resistência à compressão	43
3.3.5	Resistência à flexão em vigas	45
3.3.6	Absorção de água por capilaridade.....	46
3.3.7	Absorção de água por imersão.....	47
3.3.8	Resistência ao ataque químico.....	49
4	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS.....	51
4.1	Ensaio de espalhamento e fluidez.....	51
4.2	Resistência à compressão e flexão	53
4.3	Absorção de água por capilaridade	57
4.4	Absorção de água por imersão	60
4.5	Resistência ao ataque químico	62
5	CONCLUSÕES.....	67
5.1	Trabalhos futuros.....	69
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	71
	ANEXOS.....	75

Índice de Figuras

Figura 1.1 - Projeção da produção mundial de cimento Portland [1].....	1
Figura 2.1 – Formação dos geopolímeros [7].....	6
Figura 2.2 - Estrutura do Poli(sialato) [7].....	7
Figura 2.3 - Estrutura do Poli(sialato-siloxo) [7]	7
Figura 2.4 - Estrutura do Poli(sialato-di-siloxo) [7]	7
Figura 2.5 - Aspectos estruturais e nomenclatura [2].....	8
Figura 2.6- Quadro geral de aplicação dos geopolímeros [2].....	10
Figura 2.7- Taxa de dissolução em meio ácido (em solução a 5%) [7].....	11
Figura 2.8 - Estrutura de zeólitos e geopolímeros [7]	12
Figura 2.9 - Evolução da concentração de gases na atmosfera responsável pelo efeito de estufa, nos últimos 1000 anos [8].....	13
Figura 2.10 - Resistência aos ácidos: Cimento Portland Vs Ligante ativado alcalinamente (geopolímero) [11].....	16
Figura 2.11 - Placas obtidas por ativação alcalina (geopolímero) sujeitas a fase térmica [14]	18
Figura 2.12 - Resistência ao desgaste por impacto no ensaio de Los Angeles de betões de cimento Portland normal e ligantes ativados alcalinamente [12]	20
Figura 2.13 - Análise da reatividade: ligantes ativados alcalinamente Vs cimento Portland [17]	21
Figura 3.1 - Hidróxido de Cálcio.....	30
Figura 3.2 - Trituração do hidróxido de sódio.....	32
Figura 3.3 - Hidróxido de sódio em pó.....	32
Figura 3.4 - Colocação da mistura no formo	33
Figura 3.5 – Superplastificante.....	34
Figura 3.6 – Betoneira	38
Figura 3.7 - Ensaio de fluidez (V-Funnel).....	40
Figura 3.8 - Mesa de Espalhamento	41
Figura 3.9 - Moldes cúbicos (50×50×50) (mm ³).....	42
Figura 3.10 – Moldes cúbicos (100×100×100) (mm ³)	42
Figura 3.11 - Molde paralelepípedo (100×100×850) (mm ³).....	43
Figura 3.12 - Máquina para ensaio de compressão	44
Figura 3.13 - Ensaio de resistência à flexão	46
Figura 3.14 - Provetes submetidos ao ensaio de absorção de água por capilaridade	47

Figura 4.1 - Resistência à compressão das diferentes argamassas.....	54
Figura 4.2 - Resultados da resistência à flexão	55
Figura 4.3 - Flexão dos provetes de argamassa	56
Figura 4.4 - Ensaio de absorção de água por capilaridade ao longo de 72 horas de ensaio.....	58
Figura 4.5 - Linha de tendência do coeficiente de absorção de água por capilaridade entre 10 a 90 minutos.....	59
Figura 4.6 - Coeficiente de absorção de água por capilaridade	60
Figura 4.7 - Absorção de Água por Imersão	61
Figura 4.8 - Ensaio ao Ataque Químico.....	65

Índice de Quadros

Quadro 2.1 - Coeficientes de permeabilidade, cm/s [7]	12
Quadro 2.2 - Percentagem da resistência residual de amostras submetidas a um aumento de temperatura [12]	17
Quadro 2.3 - Resistência à compressão após ciclos e gelo-desgelo [12]	19
Quadro 2.4 - Alguns acontecimentos importantes acerca dos ligantes obtidos por ativação alcalina e ligantes alcalinos [20].....	22
Quadro 3.1 - Características Químicas	26
Quadro 3.2 - Características mecânicas.....	26
Quadro 3.3 - Características Físicas	26
Quadro 3.4 - Tipo de materiais de co-combustão.....	28
Quadro 3.5 - Valores característicos especificados pelo LNEC.....	29
Quadro 3.6 - Propriedades do hidróxido de sódio	30
Quadro 3.7 - Análise química do caulino	31
Quadro 3.8 - Distribuição granulométrica do caulino	31
Quadro 3.9 - Outras propriedades do caulino.....	31
Quadro 3.10 – Características técnicas do superplastificante:	33
Quadro 3.11 - Percentagens de material de cada composição (%).....	35
Quadro 3.12 - Composição da mistura de referência em gramas (g)	36
Quadro 3.13 - Composição da mistura com adição de cinzas volantes em gramas (g).....	36
Quadro 3.14 - Quantidades de material utilizado nas misturas geopoliméricas (g)	37
Quadro 4.1 - Ensaio de fluidez	51
Quadro 4.2 - Resultados do ensaio de espalhamento	52
Quadro 4.3 - Resultados dos ensaios de Compressão	53
Quadro 4.4 - Resultados dos ensaios à Flexão	55
Quadro 4.5 - Coeficiente de absorção de água por capilaridade	58
Quadro 4.6 - Absorção de Água por Imersão	61
Quadro 4.7 - Provetes de argamassas submetidos ao Ataque Químico.....	63
Quadro 4.8 - Ensaio de Ataque Químico.....	65

1 INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento

No âmbito da dissertação de Mestrado Integrado da Universidade do Minho foi realizar ensaios de durabilidade em provetes de argamassas com composições de geopolímeros monofásicos.

Esta dissertação tem como objetivo determinar argamassas com diferentes tipos de ligantes e com interesse de obter resultados de durabilidade mais favoráveis, quando comparados com argamassas de cimentos Portland.

Tendo em conta que o consumo de cimento Portland aumenta ano após ano, levando ao aumento das emissões de CO₂ na produção do mesmo, neste momento tem-se cerca 2600 milhões de toneladas/ano e, além disso, a previsão é de que este valor possa vir a ser duplicado nos próximos 40 anos (Figura 1.1) [1], torna-se necessário encontrar novos materiais ligantes alternativos sustentáveis como substitutos. Sendo assim, torna-se importante promover o desenvolvimento de novos sistemas ligantes, cumprindo os mesmos objetivos de desempenho, sendo menos poluentes, criando uma maior diversidade de materiais para a produção de argamassas [2].

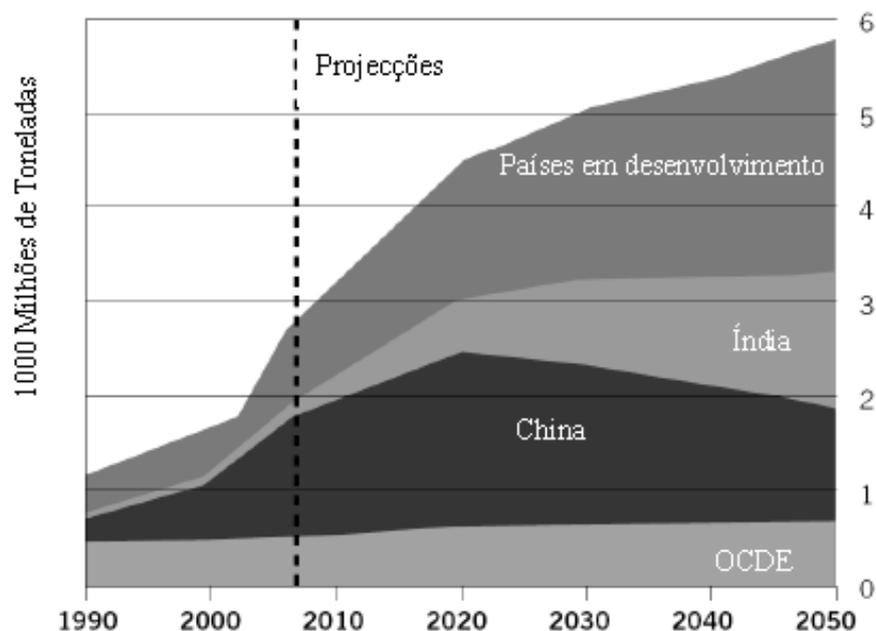


Figura 1.1 - Projeção da produção mundial de cimento Portland [1]

Segundo estudos realizados com materiais de ativação alcalina (ou geopolímeros), estes possuem maiores resistências do ponto de vista mecânico, têm maior durabilidade e estabilidade, e atingem estes comportamentos com maior rapidez do que os materiais realizados com utilização de cimento Portland [2].

Sabendo que a durabilidade dos geopolímeros é algo ainda em estudo, e que os materiais ligantes introduzidos para a realização de misturas geopoliméricas são vantajosos para alguns ensaios, mas para outros conferem-lhes alguns problemas, torna-se importante adaptar misturas geopoliméricas que permitam ter bons resultados de durabilidade, quando presentes a diferentes ensaios.

Geopolímeros Monofásicos é a designação dada para um novo e recente tipo de geopolímeros estudados na presente dissertação, em que a sua constituição difere de outros geopolímeros por não conterem adição de silicatos de sódio, constituinte responsável por uma elevada pegada carbónica.

1.2 Objetivo e metodologia

O desenvolvimento desta dissertação tem como principal objetivo avaliar a durabilidade de novas argamassas geopoliméricas, e também algumas das suas resistências mecânicas, de forma a verificar se são mais ou menos vantajosas relativamente ao cimento Portland e outras argamassas geopoliméricas clássicas, mas também para servir de base de dados para comparação com novas misturas que possam surgir nesta área.

Nesta dissertação espera-se que os resultados dos ensaios em geopolímeros sejam favoráveis, quando comparados com os ensaios realizados em argamassas à base de cimento de Portland e até mesmo relativamente a argamassas constituídas com cimento Portland e cinzas volantes. Se esses ensaios forem favoráveis é espectável que estas argamassas possam ser uma mais-valia para determinados ambientes, e também para redução do consumo de ligantes com um fabrico que provoque imensa poluição e despesa.

Por fim, e tendo em conta que o estudo de geopolímeros tem vindo a desenvolver-se muito rapidamente procura-se determinar qual a mistura de geopolímeros monofásicos que possui melhor desempenho nos ensaios de durabilidade, e perceber o quanto podem variar as

características de determinadas argamassas de geopolímeros monofásicos em função das percentagens de ligantes atribuídas.

Para esta dissertação foram realizados alguns ensaios mecânicos e de durabilidade deste tipo de geopolímeros, e posteriormente comparados com resultados de argamassas de cimento Portland.

1.3 Organização da dissertação

Esta dissertação encontra-se distribuída em 7 Capítulos, com o intuito de separar as diferentes partes que a mesma contém, tornando-a simples e organizada.

O capítulo 1 apresenta informação relativa ao conteúdo, objetivo e organização da dissertação.

No capítulo 2 apresenta-se o estado de arte, que contém uma introdução relativa à história dos geopolímeros, informação sobre a organização estrutural, aplicações, propriedades dos betões geopoliméricos, interação com o ambiente e vantagens dos mesmos. Neste capítulo apresenta-se também informação sobre determinados ensaios de durabilidade de geopolímeros convencionais e algumas informações sobre geopolímeros monofásicos, que são o principal interesse de desenvolvimento nesta dissertação.

O capítulo 3 refere-se aos materiais utilizados na preparação das argamassas, as composições de argamassas adotadas para os ensaios, e os ensaios efetuados nas argamassas em estado fresco e em estado endurecido, e o tipo de provetes usados para cada ensaio.

O capítulo 4 refere-se à apresentação e análise de resultados de todas as argamassas, para os diferentes ensaios realizados, com o intuito de proceder à comparação de resultados obtidos entre argamassas de referência com argamassas de geopolímeros monofásicos.

O capítulo 5 refere-se às conclusões obtidas para cada um dos ensaios realizados nas argamassas e justificação da obtenção dos mesmos, e também às propostas de trabalhos futuros.

O capítulo 6 apresenta informação relativa às referências bibliográficas utilizadas na presente dissertação.

2 ESTADO DE ARTE

2.1 Introdução aos Geopolímeros

Os ligantes geopoliméricos, também usualmente designados por ligantes obtidos por ativação alcalina, remontam à década de 40 com trabalhos realizados por Purdon na Bélgica, que utilizou escórias ativadas alcalinamente com hidróxido de sódio [3]. No entanto, o primeiro investigador a analisar ligantes utilizados em construções históricas (análises efetuadas nas pirâmides egípcias e nos templos romanos), foi Glukhovsky, concluindo serem construções compostas por aluminossilicatos cálcicos hidratados à semelhança dos que ocorrem no cimento Portland e fases cristalinas do tipo analcite, uma rocha natural existente na crosta terrestre que explicaria a durabilidade daquele ligante [4].

Em termos históricos, os ligantes geopoliméricos, foram objeto de inúmeras análises por parte de investigadores do Leste da Europa, no entanto, apenas quando em 1978 Joseph Davidovits introduziu o termo “geopolímero” tendo patenteado investigações sobre a polimerização do metacaulino é que a temática dos ligantes alcalinos sofreu uma inflexão, quer a nível de investigação produzida, quer a nível da divulgação mediática, o que justifica a vulgarização do termo “geopolímero” à semelhança do que aconteceu com o termo “cimento Portland” nos cimentos tradicionais [5].

De acordo com Davidovits, os geopolímeros são polímeros pelo facto de se transformarem, policondensarem, ganharem forma e endurecerem rapidamente a baixa temperatura. Adicionalmente também são geo-polímeros, isto é, inorgânicos, duros e estáveis até temperaturas de 1250°C e não inflamáveis [6].

2.2 Aspetos Estruturais dos Geopolímeros

A ativação alcalina é também conhecida por geopolímerização, termo atribuído por Davidovits para este tipo de reação, dada a sua grandeza e semelhança com a síntese de polímeros orgânicos de condensação relativamente a condições hidrotérmicas de partida [7].

Relativamente à constituição química, os geopolímeros podem ser identificados como o equivalente amorfo de alguns zeólitos sintéticos. Embora com a mesma composição química, pois são como os zeólitos aluminossilicatos hidratados, divergem destes no aspeto da estrutura

que não é alcalina, mas é quase totalmente amorfa. Isto relaciona-se com a velocidade com que se processa a reação, lenta e em abundante fase aquosa (favorecendo a formação de cristais) nos zeólitos, rápida e com a fase líquida apenas indispensável à hidratação dos vetores de reação nos geopolímeros, que são praticamente amorfos [7].

Ainda de acordo com Davidovits, os geopolímeros são constituídos por uma malha tridimensional em que os átomos de silício alternam com os de alumínio em coordenação tetraédrica, compartilhando todos os oxigénios (Figura 2.1). Esta é uma representação simplificada, mas ajuda a perceber os princípios básicos que estão envolvidos [7].

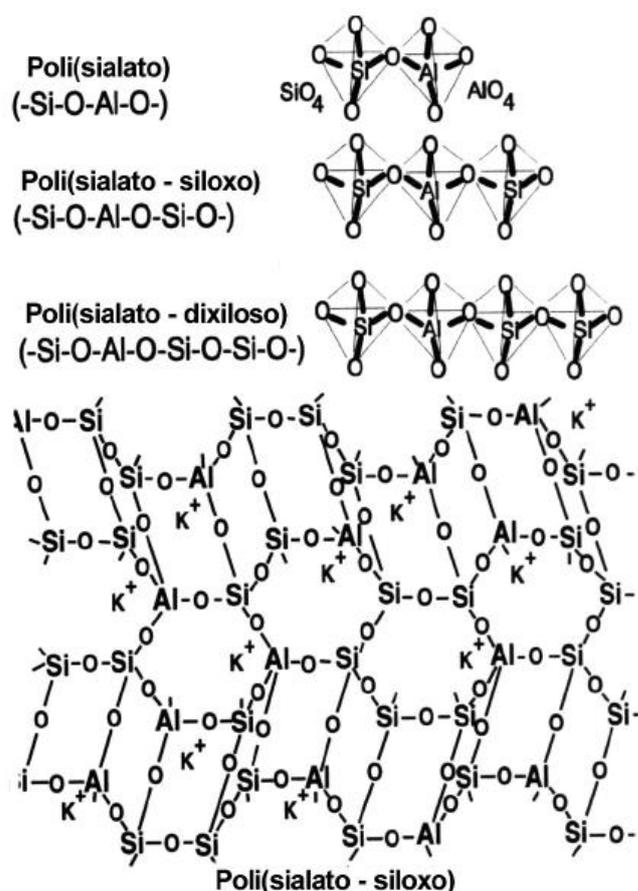


Figura 2.1 – Formação dos geopolímeros [7]

Como o alumínio (Al^{3+}) e o silício (Si^{4+}) têm coordenação 4 com oxigénio (O^{2-}), ou seja, estão ligados cada um a 4 átomos de oxigénio dispostos nos vértices de um tetraedro imaginário, gera-se um défice de carga (5^- no alumínio e 4^- no silício) que tem de ser compensado com catiões do tipo Na^+ , K^+ , ou Ca^{++} para alcançar o equilíbrio elétrico na matriz [7].

Os três tipos básicos de estruturas geopoliméricas são propostas consoante o monómero de repetição, como se pode verificar na Figura 2.2, Figura 2.3 e Figura 2.4:

Estrutura (1) – Poli(sialato) com [-Si-O-Al-O-] como unidade de repetição

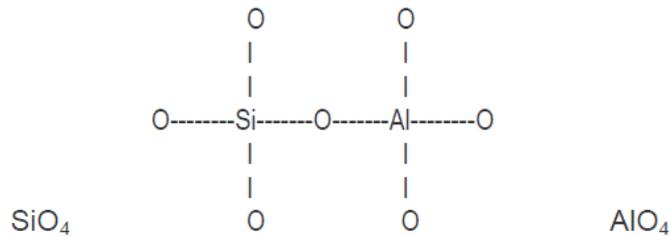


Figura 2.2 - Estrutura do Poli(sialato) [7]

Estrutura (2) – Poli(sialato-siloxo) com [-Si-O-Al-O-Si-O-] como unidade de repetição

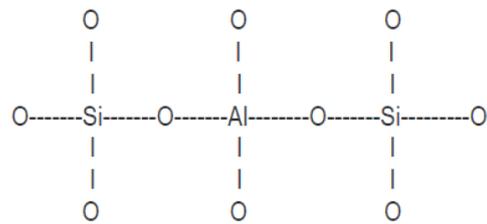


Figura 2.3 - Estrutura do Poli(sialato-siloxo) [7]

Estrutura (3) – Poli(sialato-di-siloxo) onde [-Si-O-Al-O-Si-O-Si-O-] é o grupo repetido

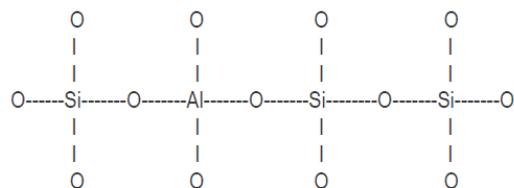


Figura 2.4 - Estrutura do Poli(sialato-di-siloxo) [7]

A organização espacial correspondente a estas estruturas apresenta-se na Figura 2.5, sendo evidente as semelhanças com os zeólitos de síntese.

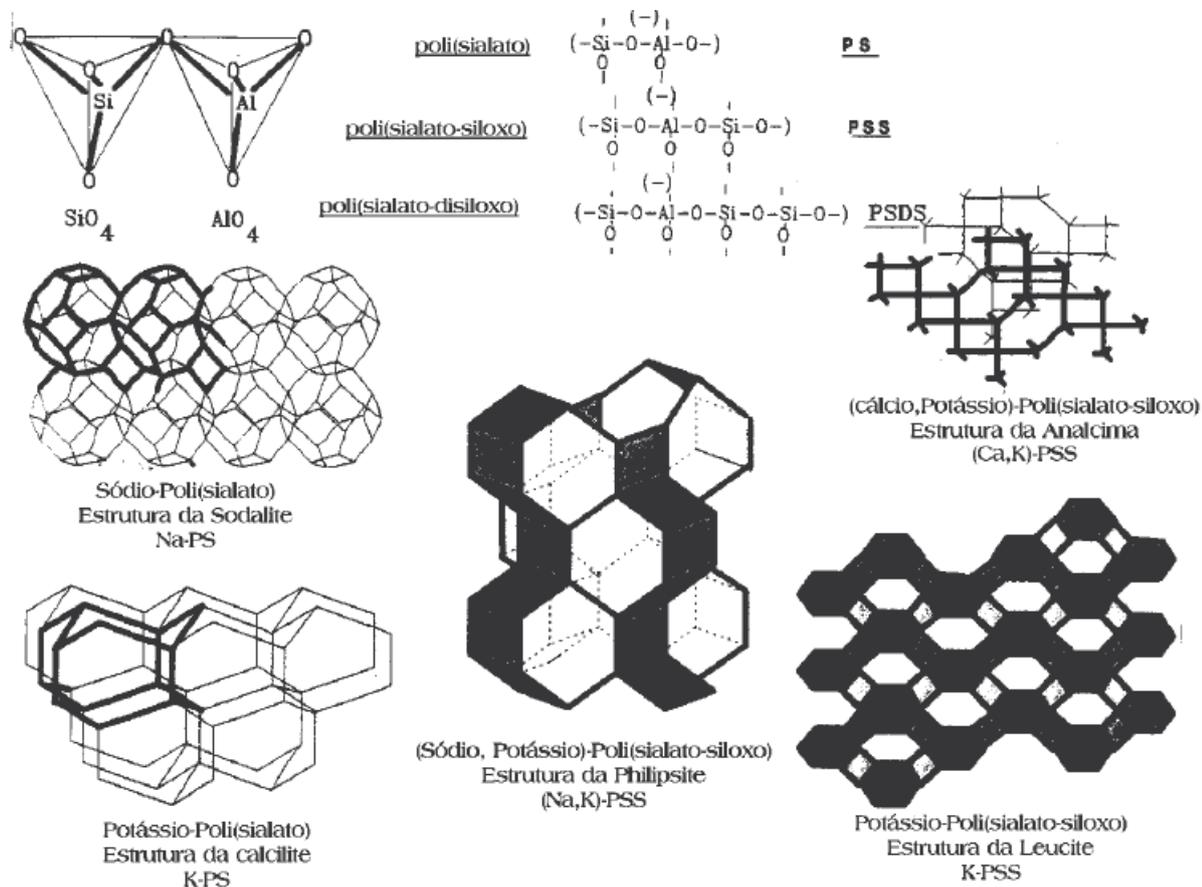


Figura 2.5 - Aspectos estruturais e nomenclatura [2]

2.3 Aplicações dos Geopolímeros

Os ligantes geopoliméricos podem ser utilizados em praticamente todos os domínios da indústria (indústria da construção, indústria automóvel, indústria aeronáutica, etc.). Apresentam elevadas resistências mecânicas, resistências ao gelo-desgelo, elevada inércia química e excelente comportamento ao fogo, podendo ser considerados materiais refratários. A sua estrutura, de natureza similar aos zeólitos e feldspatóides, confere-lhe apreciáveis propriedades de intercâmbio iónico, e portanto, permite a imobilização de resíduos tóxicos, do tipo metais pesados e do tipo radioativo, dentro da matriz do próprio polímero.

De forma resumida, pode-se dizer que o desenvolvimento destes materiais orienta-se através de duas linhas de atuação:

- A primeira linha destina-se à obtenção de materiais de baixo custo, para a utilização em grandes quantidades, como materiais de construção. Neste tipo de materiais as matérias-primas de base podem ser, além dos metacaulinos, as escórias granuladas, as cinzas volantes e, de uma forma geral, todos os aluminosilicatos em que a razão atômica Si/Al varie de 1 a 3 (escombros de pedreira, de demolição, cinzas de queima ou de inceneração, restos de betão corrente de cimento Portland, etc.) [2].
- A segunda linha está dirigida à obtenção de materiais mais sofisticados, mesmo sendo mais caros, em que a razão atômica referida pode alcançar valores até 35, podendo inclusive admitir-se a incorporação de fibras de diferentes tipos (amianto, carbono, vidro, etc.). Segundo Davidovits, estes materiais plásticos têm a vantagem de poder substituir certos metais e até mesmo produtos cerâmicos. Neste modo de atuação, o material básico é o metacaulino, que sofrerá as correções do teor em sílica que cada tipo de material pode implicar [2].

Davidovits apresenta num quadro muito elucidativo os tipos de possíveis materiais, em função das razões Si/Al, do campo de aplicação (em função das características de cada produto) e envolvendo maior ou menor intervenção tecnológica [2].

Como tal, para relações Si/Al mais baixas, são obtidas estruturas tridimensionais, do tipo zeólitos, que favorecem a obtenção de altas resistências mecânicas. São utilizados em ligantes, materiais de construção ou no encapsulamento de produtos tóxicos [2].

Com o aumento da razão atômica Si/Al (até 35), vão-se obtendo materiais com maior caráter polimérico, formando cadeias mais largas e, por sua vez, mais adequadas a outros tipos de aplicações, como se verifica na Figura 2.6 [2].

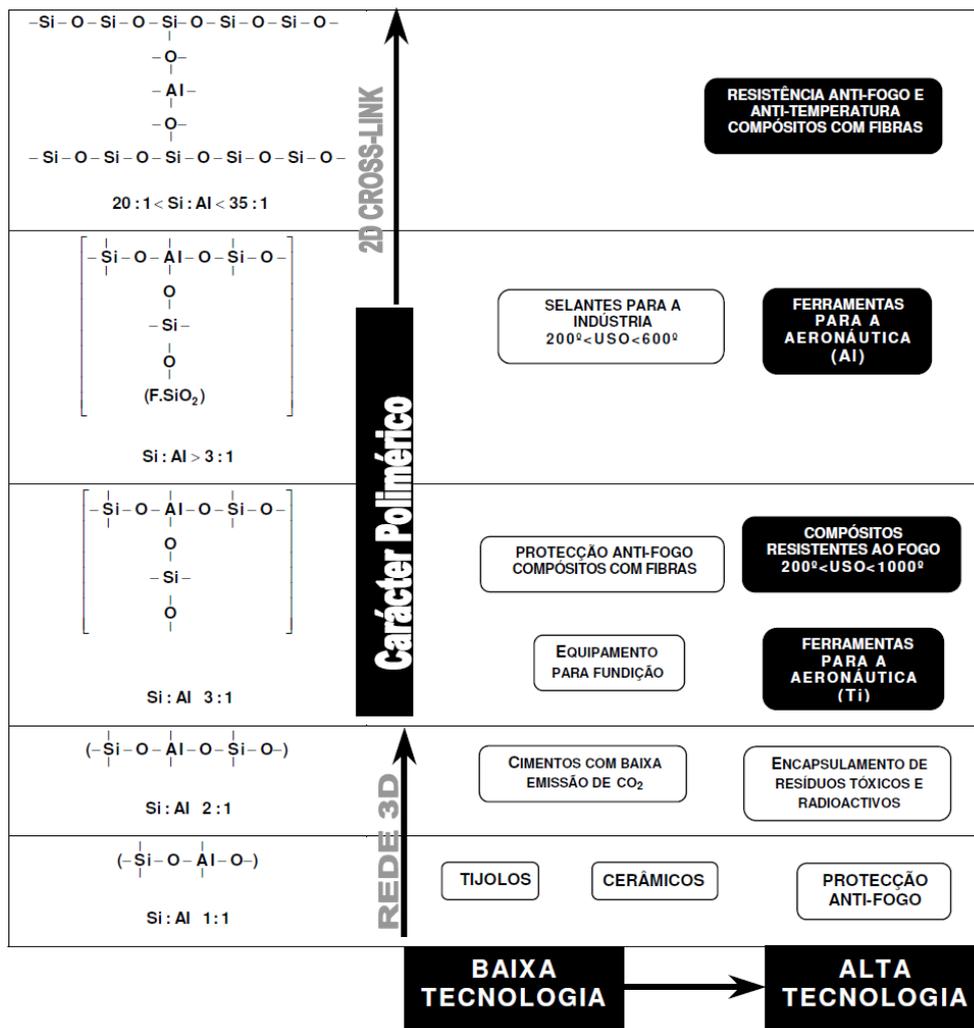


Figura 2.6- Quadro geral de aplicação dos geopolímeros [2]

2.4 Propriedades dos Betões Geopoliméricos

Dependendo das condições de síntese e de cura, os betões geopoliméricos possuem facilmente valores de resistência mecânica na ordem dos 60 a 80 MPa em compressão simples e 7 a 8 MPa em flexão/tração. A sua fabricação é normalmente realizada a temperatura e pressão ambiental, podendo, eventualmente, aplicarem-se pressões no caso de se desejar um produto final com porosidade muito baixa. Em muitos casos 70% da resistência final é atingida nas primeiras 4 horas, embora se verifique um acréscimo com a idade, no entanto é menos significativo do que no cimento Portland [7].

O fator mais importante e que constitui uma mais-valia dos materiais geopoliméricos está relacionado com a inércia química que apresentam à maior parte das agressões ambientais. Mesmo em termos de reações álcalis-agregado, o forte ambiente alcalino não influencia de nenhuma forma as reações com a sílica porque o processo, do ponto de vista cronológico, é diferente [7].

Na Figura 2.7 apresenta-se um gráfico que representa o comportamento (taxa de dissolução) de amostras de geopolímeros e solução ácida de H_2SO_4 (ácido sulfúrico) e HCL (ácido clorídrico) a 5%, comparando os resultados com cimento Portland, com escórias de alto-forno e com um aluminato de cálcio [7].

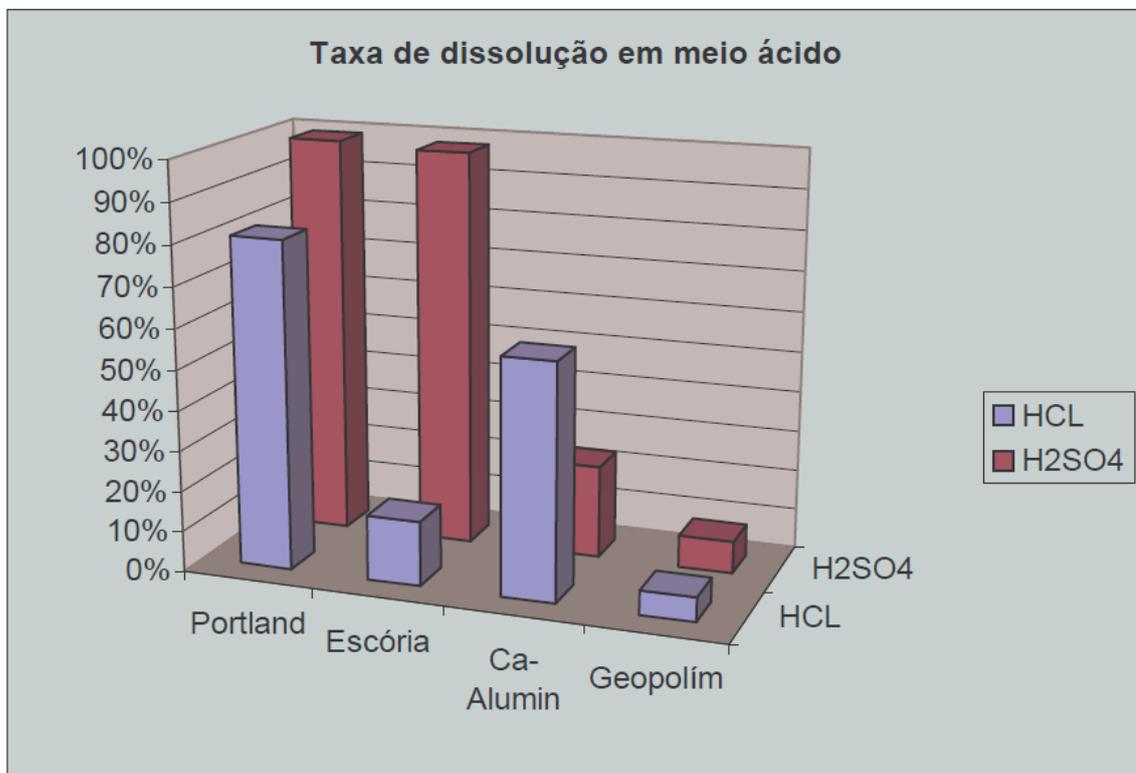


Figura 2.7- Taxa de dissolução em meio ácido (em solução a 5%) [7]

Como referido anteriormente os geopolímeros são o equivalente artificial de muitos zeólitos naturais (Figura 2.8), o que lhes permite um elevado grau de fixação de catiões de metais pesados, como o cobre, arsénio, zinco, níquel, titânio, vanádio, crómio, onde ocorrem trocas de iões de modo a compensar as cargas negativas dos hidróxilos OH^- e O^{2-} . Como tal, os metais pesados não só são encapsulados na matriz, como se pensa constituem também parte integrante da mesma contribuindo como elementos importantes na ligação. Os geopolímeros possuem

níveis muito baixos de lixiviação por águas correntes, caso que deve ser sempre verificado visto que as características finais do produto estão dependentes da composição de materiais de partida [7].

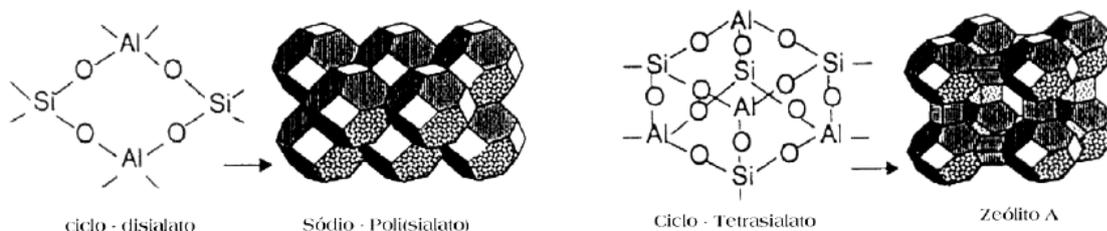


Figura 2.8 - Estrutura de zeólitos e geopolímeros [7]

Os geopolímeros apresentam valores baixos de permeabilidade, quando comparados com outros materiais correntes (Quadro 2.1). Esta propriedade tem a vantagem de favorecer o uso destes materiais como forma de imobilização e encapsulamento de resíduos perigosos [7].

Quadro 2.1 - Coeficientes de permeabilidade, cm/s [7]

Areia	10^{-1} a 10^{-3}
Argila	10^{-6} a 10^{-8}
Granito	10^{-8} a 10^{-10}
Cimento Portland	10^{-9} a 10^{-10}
Geopolímeros	10^{-9} a 10^{-9}

2.5 Interação com o Ambiente

Tendo como objetivo fundamental a redução da emissão de gases na atmosfera (nomeadamente o CO_2) que contribuem para o efeito de estufa, os betões geopoliméricos apresentam uma solução relativamente mais vantajosa quando comparada com betões de cimento Portland. Na Figura 2.9 pode-se verificar a evolução da concentração de gases na atmosfera responsáveis pelo efeito de estufa [8].

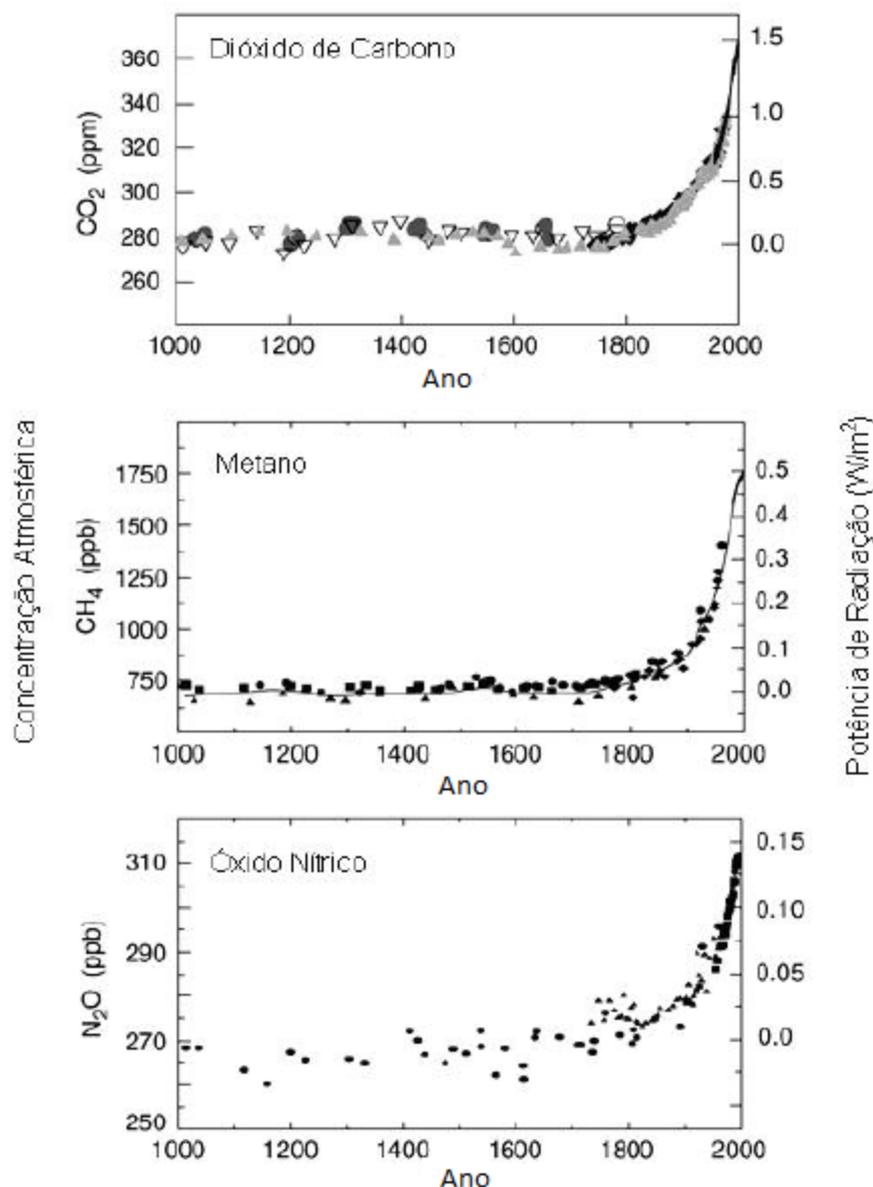


Figura 2.9 - Evolução da concentração de gases na atmosfera responsável pelo efeito de estufa, nos últimos 1000 anos [8]

No que diz respeito às emissões de dióxido de carbono lançado para a atmosfera, Davidovits estima que na produção de uma tonelada de betão geopolimérico, são emitidas 0,184 toneladas de CO₂ para a atmosfera (enquanto a produção de betões com cimento Portland produz, para a mesma tonelada de betão, 0,39 toneladas de CO₂) [9]. Também a utilização de precursores geopoliméricos (escórias, cinzas volantes, etc.) que não necessitam de tratamento térmico, provocam um impacto ainda menor no ambiente [8].

2.6 Vantagens dos Geopolímeros

As vantagens dos geopolímeros a considerar relativamente ao cimento Portland são:

- Uso de matéria-prima abundante: é possível criar um geopolímero através do uso de uma vulgar pozolana ou através de produtos cuja composição contenha quantidades de sílica e alumina;
- Economia de energia e sustentabilidade ambiental: a produção de geopolímeros não requer grandes quantidades de energia. A energia utilizada resume-se à necessária para obter temperaturas de cerca de 600°C para a obtenção de certas pozolanas. As emissões de CO₂ para a atmosfera são igualmente insignificantes, comparando com a produção de cimento Portland;
- Processo de produção simples: basta realizar uma mistura de pozolana com o fluido alcalino. O processo de mistura assemelha-se à produção do vulgar betão que utiliza como ligante o cimento Portland;
- Boa estabilidade volumétrica do geopolímero: geopolímeros possuem um coeficiente de retração 4/5 inferior ao do cimento Portland;
- Ganhos rápidos de resistência: estudos indicam que os geopolímeros adquirem cerca de 70% da resistência à compressão em 4 horas;
- Excelentes propriedades de durabilidade: possuem uma resistência a ataques de ácidos significativamente superiores à resistência de betões convencionais;
- Elevada resistência ao fogo: conseguem resistir a temperaturas de 1000°C a 1200°C sem perder características funcionais;
- Baixa condutibilidade térmica;
- Não dá origem à formação de reações alcali-agregado
- Não dá origem à formação de fenómenos de carbonatação. Os geopolímeros não possuem hidróxidos de cálcio livres;
- Possuem excelente comportamento ao ataque de sulfatos;
- Os geopolímeros têm um campo de aplicação bastante vasto que vai desde reforço estrutural, geotecnia, reabilitação, utilização em estruturas que sejam sujeitas a ataques ácidos.

2.7 Durabilidade dos Geopolímeros

A durabilidade de um material de construção (da família dos ligantes), só pode ser considerada quando, o mesmo consegue garantir ao longo do seu período de vida útil, capacidade de resistência à ação de forças e a sua integridade estrutural mesmo após ser sujeito a vários fenómenos de degradação mecânicos, físicos e químicos quando colocados em funcionamento, quer por ação do ambiente ou decorrente da atividade humana [10].

Para o betão, a durabilidade deste, depende essencialmente da sua constituição ou composição, das condições de colocação em obra e da cura do mesmo.

Os mecanismos de degradação nas estruturas de betão que afetam a durabilidade do mesmo estão relacionados essencialmente com:

- Ação do gelo-desgelo (efeitos físicos e desgaste);
- Efeito da molhagem-secagem;
- Ação do choque térmico
- Ataques dos sulfatos (efeitos químicos);
- Ataques microbiológicos induzidos;
- Reações do tipo álcalis-agregados;
- Corrosão das armaduras de aço embebidas no betão (efeitos eletroquímicos e físicos): ataques por carbonatação do betão e por ação dos cloretos;
- Abrasão (avaliação do desgaste físico);
- Ação de cargas mecânicas (efeitos físicos);
- Outros [2].

No âmbito do estudo da durabilidade de geopolímeros foram efetuados inúmeros ensaios por diversos investigadores que, de uma forma geral, garantiram melhores resultados na eficiência dos geopolímeros relativamente ao cimento Portland Normal [10].

Segundo alguns investigadores um dos principais fatores que influencia a durabilidade de estruturas de betão armado é a deterioração por corrosão das armaduras. Tal acontece nas estruturas de betão à base de cimento Portland, porque este apresenta-se vulnerável ao ataque químico por possuir uma elevada quantidade de cal. É a partir daqui que se torna importante a utilização de materiais estruturais mais duráveis e mais amigos do ambiente, como é o caso dos geopolímeros [10].

Algumas publicações referem inúmeros ensaios de durabilidade realizados a geopolímeros comparados com cimento Portland normal. De forma a comparar estes dois materiais, apresento nos seguintes pontos alguns ensaios de durabilidade efetuados aos mesmos.

2.7.1 Resistência aos ácidos

Os ligantes geopoliméricos ou geopolímeros, obtidos por ativação alcalina são sintetizados a partir de aluminossilicatos com soluções altamente alcalinas à base de hidróxidos e silicatos [10].

Vários investigadores garantem que a resistência ao ataque por ácidos é uma das maiores vantagens dos geopolímeros comparativamente com outros ligantes à base de cimento Portland. Davidovits et al. [11] mencionam perdas de massa de 6 a 7% em ligantes ativados alcalinamente imersos durante 4 semanas em soluções de 5% de ácido clorídrico e sulfúrico, enquanto os betões à base de cimento Portland têm perdas de massa na ordem dos 78 a 95%, sendo uma diferença bastante acentuada (Figura 2.10) [10].

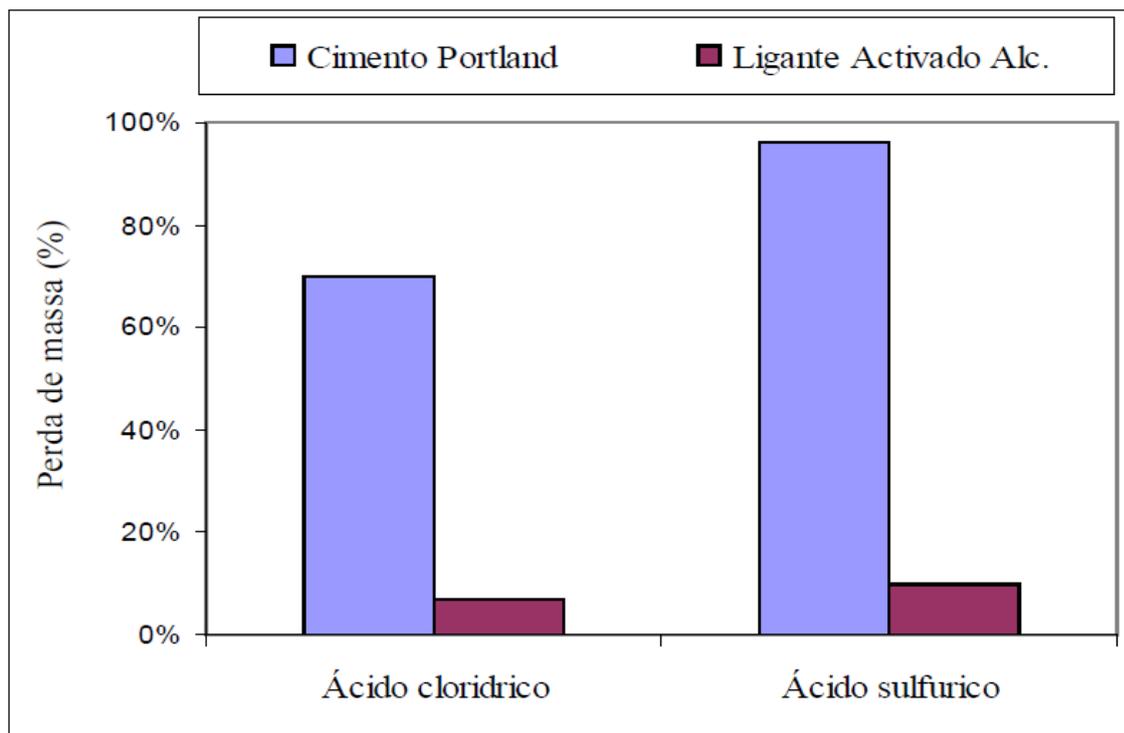


Figura 2.10 - Resistência aos ácidos: Cimento Portland Vs Ligante ativado alcalinamente (geopolímero) [11]

Outros investigadores, efetuaram mais recentemente outros ensaios relativos a ataques por ácidos, obtendo inúmeros resultados e garantindo que os geopolímeros possuem melhores capacidades de resistência que o cimento Portland normal, reforçando os estudos inicialmente efetuados por Davidovits [10].

2.7.2 Resistência a altas temperaturas

Enquanto os betões correntes à base de cimento Portland normal apresentam fraco desempenho quando sujeitos a um aumento de temperatura, iniciando a sua desintegração para temperaturas acima dos 300°C, os geopolímeros são termicamente mais estáveis [10].

Um grupo de investigadores [12] efetuou vários ensaios analisando o desenvolvimento de ligantes à base de metacaulino e resíduos de xisto, tendo verificado um ótimo desempenho mecânico nos ligantes à base de metacaulino quando sujeitos a uma fase térmica (Quadro 2.2) [10].

Quadro 2.2 - Percentagem da resistência residual de amostras submetidas a um aumento de temperatura [12]

Amostra	Resistência residual à flexão (%)			Resistência residual à compressão (%)		
	T=600°C	T=900°C	T=1200°C	T=600°C	T=900°C	T=1200°C
H160	90	90	157	81	82	110
H110	93	93	145	88	76	122
K80	-	91	155	-	76	85

Os provetes sofreram ligeiras perdas de resistência no intervalo de temperaturas entre os 600 e os 1000°C, mas em alguns casos apresentam ganhos de resistência para uma temperatura de 1200°C [10].

Variados autores apresentam também soluções relativas à resistência a altas temperaturas e os mesmos comprovam a situação referida anteriormente. Por outro lado, um grupo de investigadores referencia que uma das vantagens dos geopolímeros relativamente aos betões de

cimento Portland normal, está no facto de que estes podem apresentar comportamento explosivo, algo que não acontece nos geopolímeros [10].

2.7.3 Resistência ao fogo

Krivenko & Guziy [13], procederam à análise do comportamento ao fogo dos geopolímeros, verificando que estes obtiveram um bom desempenho no ensaio. Dessa forma, sugeriram que este tipo de material é ótimo para ser utilizado em obras cuja ocorrência de incêndio seja extremamente gravosa, como em edifícios altos e túneis [10].

Também no mesmo ano (2007) outro grupo de investigadores, analisaram a possibilidade de utilizar geopolímeros como materiais antifogo. De forma a garantirem a sua análise procederam à realização de ensaios. Segundo as normas da República Checa, um material só apresenta comportamento antifogo se a face oposta à ação do fogo não ultrapassar os 120°C. Nos ensaios realizados, essa temperatura só foi atingida ao fim de aproximadamente 120 minutos, confirmando que os geopolímeros possuem bom desempenho ao fogo (Figura 2.11) [10].



Figura 2.11 - Placas obtidas por ativação alcalina (geopolímero) sujeitas a fase térmica [14]

2.7.4 Resistência ao gelo-desgelo

No que diz respeito à resistência dos geopolímeros ao gelo-desgelo, também foram efetuados ensaios por diversos investigadores para comprovar a sua durabilidade.

Como tal, Dolezal et al. [15], efetuaram ensaios e observaram a perda de 30% da resistência de ligantes obtidos por ativação de cinzas volantes, após 150 ciclos de gelo-desgelo. Outros autores (Bortnovsky et al. [12] analisaram a resistência de ligantes obtidos por ativação de escórias e resíduos de xisto, quando submetidos a ciclos de gelo-desgelo, apresentando bom desempenho mecânico mesmo após 100 ciclos (Quadro 2.3) [10].

Quadro 2.3 - Resistência à compressão após ciclos e gelo-desgelo [12]

Amostra	Resistência aos 180 dias de cura (MPa)	Resistência após 50 Ciclos (MPa)	Resistência após 100 Ciclos (MPa)
K80	91	82	75
H110	105	84	90
K125	88	84	90
H160	110	85	79

Contudo, outro grupo de investigadores, criticou que o desempenho obtido não era linear, mencionando que existem casos de ligantes ativados alcalinamente (geopolímeros) que apresentam um baixo desempenho quando submetidos a ataques de gelo-desgelo. Sendo que a explicação para tal sucedido está relacionada com a porosidade e a microestrutura do ligante testado, a qual condiciona a resistência a ciclos de gelo-desgelo [10].

2.7.5 Resistência à abrasão

Para verificar a resistência à abrasão, Torgal et al. [16], efetuaram o ensaio de Los Angeles, e confirmaram o bom desempenho dos ligantes ativados alcalinamente (geopolímeros) quando comparados com provetes de betão de cimento Portland normal de classe de resistência C20/25 e C30/37 (Figura 2.12). Ao fim de 1000 rotações verificaram que os provetes de material ativado alcalinamente tinham perdido menos de 30 % da sua massa, no caso mais desfavorável (CL-agregados de calcário) [10].

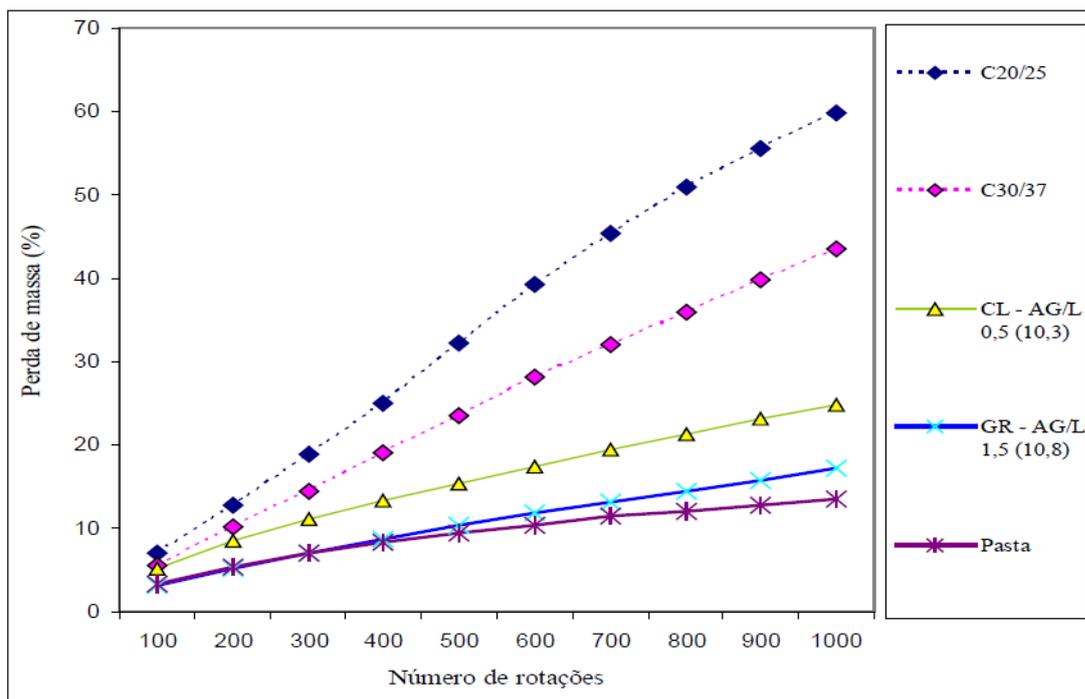


Figura 2.12 - Resistência ao desgaste por impacto no ensaio de Los Angeles de betões de cimento Portland normal e ligantes ativados alcalinamente [12]

Outros autores, também procederam ao estudo da resistência ao impacto de vários tipos de ligantes ativados alcalinamente, confirmando a sua elevada resistência [10].

2.7.6 Possibilidade da ocorrência da reação álcali-agregado

A reação álcali-agregado é um processo químico que ocorre entre alguns minerais dos agregados, os iões alcalinos (Na^+ e K^+) e hidróxilos (OH^-) que estão dissolvidos na solução dos poros de betão. Os iões de hidróxilos podem ser provenientes do cimento, da água de amassadura, dos próprios agregados e materiais pozolânicos entre outros [10].

Davidovits [17] efetuou análises comparativas entre ligantes geopoliméricos e ligantes à base de cimento Portland, quando sujeitos ao ensaio preconizado na ASTM C227 (ensaio de variação dimensional de barra de argamassa, contendo agregados cuja reatividade se pretende avaliar), tendo observado retrações nos ligantes geopoliméricos e expansões significativas nos ligantes de cimento Portland. No entanto, Davidovits não refere neste ensaio, se a composição do ligante geopolimérico contém cálcio (Figura 2.13) [10].

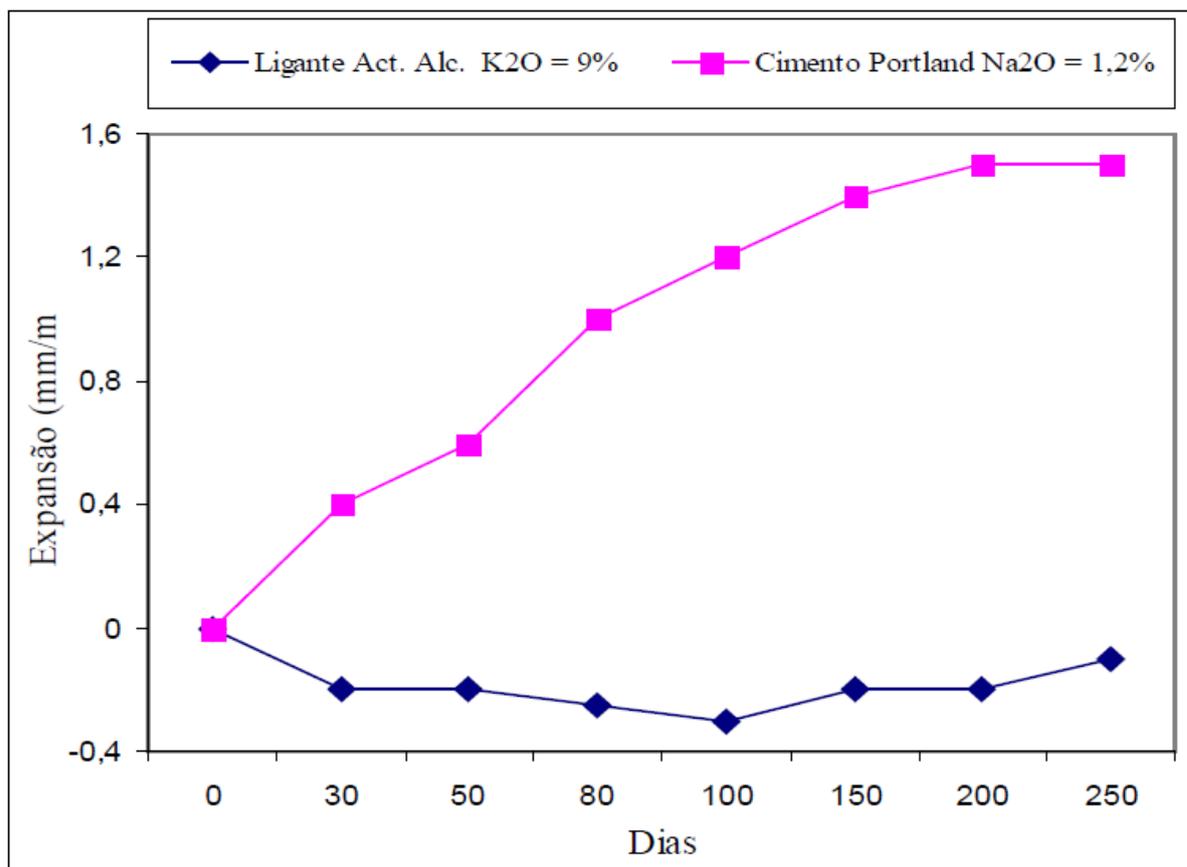


Figura 2.13 - Análise da reatividade: ligantes ativados alcalinamente Vs cimento Portland [17]

Outros autores procederam aos mesmos ensaios e observaram expansões nos ligantes geopoliméricos. No entanto, continuam sendo inferiores às dos ligantes de cimento Portland. Deste modo, Li et al [18] consideram que, como os alcalis são fixados na estrutura durante o processo de endurecimento dos ligantes de geopolímeros, não sobram quantidades suficientes para gerar reações de expansão [10].

Alguns anos depois Fernandez-Jimenez & Palomo [19] referem que a ausência de expansões nos ligantes geopoliméricos pode ser caracterizada pela ausência de cálcio na sua composição [10].

2.8 Geopolímeros monofásicos

Geopolímeros monofásicos são geopolímeros sem silicato de sódio, composto responsável por uma elevada pegada carbónica. Estes materiais foram abordados pela primeira vez em 2008 (Quadro 2.4) contudo as publicações sobre estes materiais são muito escassas, não existindo quaisquer ensaios de durabilidade sobre os mesmos.

Quadro 2.4 - Alguns acontecimentos importantes acerca dos ligantes obtidos por ativação alcalina e ligantes alcalinos [20]

Autor	Ano	Descrição
Feret	1939	Cimentos com escórias
Purdon	1940	Combinações alcalis-escórias
Glukhovsky	1959	Bases teóricas e desenvolvimento de cimentos alcalinos
Glukhovsky	1965	Primeiros cimentos alcalinos
Davidovits	1979	Termo “ Geopolímero”
Malinowski	1979	Caracterização de aquedutos milenares
Forss	1983	Cimento tipo F
Langton e Roy	1984	Caracterização de materiais em edifícios milenares
Davidovits e Sawyer	1985	Patente do cimento “ Pyrament “
Krivenko	1986	Sistemas $R_2O - RO - SiO_2 - H_2O$
Malolepsy e Petri	1986	Ativação de escórias sintéticas
Malek et al.	1986	Cimentos de escórias com resíduos radioativos
Davidovits	1987	Comparação entre betões correntes e betões milenares
Deja e Malolepsy	1989	Resistência ao ataque de cloretos
Kaushal et al.	1989	Cura adiabática de ligantes alcalinos com resíduos nucleares
Roy e Langton	1989	Analogias dos betões milenares
Majundar et al.	1989	Ativação de escórias – $C_{12}A_7$
Talling e brandstetr	1989	Ativação alcalina de escórias
Wu et al.	1990	Ativação de cimento de escórias
Roy et al.	1991	Presa rápida de cimentos ativados alcalinamente
Roy e Silsbee	1992	Revisão sobre cimentos ativados alcalinamente
Palomo e Glasser	1992	Metacaulino com CBC
Roy e Malek	1993	Cimento de escórias
Glukhovsky	1994	Betões milenares, modernos e futuros
Krivenko	1994	Cimentos alcalinos

Wang e Scrivener	1995	Microestrutura de escórias ativadas alcalinamente
Shi	1996	Força, estrutura dos poros e permeabilidade das escórias de ativação alcalina
Fernández-Jiménez e Puertas	1997	Estudos cinéticos de cimentos de escórias ativados alcalinamente
Katz	1998	Microestrutura de cinzas volantes ativadas alcalinamente
Davidovits	1999	Aspetos químicos dos sistemas geopolímeros, tecnologia
Roy	1999	Oportunidades e desafios dos cimentos ativados alcalinamente
Palomo	1999	Cinzas volantes ativadas alcalinamente – um cimento para o futuro
Gong e Yang	2000	Cimento de escória-lama vermelha ativada alcalinamente
Puertas	2000	Cimento de escórias/cinzas volantes ativados alcalinamente
Bakharev	2001-2002	Betão de escórias ativados alcalinamente
Palomo e Palacios	2003	Imobilização de resíduos perigosos
Grutzeck	2004	Formação de Zeólitos
Sun	2006	Tecnologia dos Sialitos
Duxson	2007	Tecnologia dos Geopolímeros: Estado de Arte
Hajimohammadi, Provis e Deventer	2008	Geopolímeros monofásicos
Provis e Deventer	2009	Geopolímeros: Estrutura, propriedades e aplicações industriais

Ao longo do desenvolvimento do plano de dissertação a mesma temática vai ser abordada e desenvolvida no contexto da durabilidade, e verificar quais as diferenças relativamente aos geopolímeros atuais.

O estudo de geopolímeros monofásicos fundamenta-se na necessidade de desenvolvimento de novas argamassas, com utilização de ligantes menos poluentes, e que possuam boas capacidades físicas, mecânicas, e de durabilidade. Para tal é necessária a preparação de tais argamassas e, posteriormente, analisar as mesmas ao nível da durabilidade.

3 MATERIAIS, COMPOSIÇÕES E ENSAIOS

Neste capítulo são abordados todos os materiais utilizados para o desenvolvimento desta dissertação, assim como as composições de argamassas adotadas para o estudo e, por fim, todos os ensaios realizados.

No âmbito de conhecer um pouco sobre os mesmos materiais, são apresentadas algumas definições sobre os mesmos, assim como as suas principais características.

No que diz respeito às composições adotadas são apresentadas várias argamassas, que foram objetivo de estudo de Abdollahnejad, et al. [20] com o intuito de tentar obter uma composição de geopolímeros monofásicos com melhores resultados de durabilidade.

Por fim apresentam-se os ensaios mecânicos e de durabilidade realizados, através dos quais podemos determinar quais as composições que apresentam melhores resultados, e em função desses resultados podemos apurar a melhor mistura.

Esta dissertação foi efetuado no Laboratório de Materiais de Construção da Universidade do Minho, e todos os materiais utilizados para a realização de argamassas foram adquiridos pelo mesmo a diferentes fornecedores.

3.1 Materiais

3.1.1 Cimento

Segundo a NP EN 197-1, “cimento é um ligante hidráulico, isto é, um material inorgânico finamente moído, que, quando misturado com água, forma uma pasta que faz presa e endurece devido a reações e processos de hidratação e que, depois de endurecido, conserva a sua resistência mecânica e estabilidade mesmo debaixo de água.”

Para esta dissertação foi utilizado o cimento de Portland CEM I 42,5 R, certificado segundo a NP EN 197-1 adquirido pela Universidade do Minho à empresa SECIL – Companhia Geral de Cal e Cimento, S.A., sendo este um produto de elevada qualidade e desempenho, muito utilizado em obras de Engenharia Civil.

Este cimento possui um conjunto de características químicas, físicas e mecânicas fornecidas em catálogo pela empresa, apresentadas no Quadro 3.1, Quadro 3.2 e Quadro 3.3:

Quadro 3.1 - Características Químicas

Propriedades	Método de Ensaio	Valor Especificado (1)
Perda de fogo	NP EN 196-2	$\leq 5,0\%$
Resíduo insolúvel	NP EN 196-2	$\leq 5,0\%$
Teor de sulfatos (em SO₃)	NP EN 196-2	$\leq 4,0\%$
Teor de Cloretos	NP EN 196-21	$\leq 0,10\%$

(1) As percentagens são referidas à massa de cimento.

Quadro 3.2 - Características mecânicas

Resistência à Compressão (MPa)			
Resistência aos primeiros dias		Resistência de referência	
2 dias	7 dias	28 dias	NP EN 196-1
≥ 20	-	$\geq 42,5$ e $\leq 62,5$	

Quadro 3.3 - Características Físicas

Propriedades	Métodos de ensaio	Valor específico
Princípio de Presa	NP EN 196-3	≥ 60 min
Expansibilidade	NP EN 196-3	≤ 10 mm

3.1.2 Areia Fina

A areia tem como função servir de estrutura da argamassa ganhando coesão pela ligação dos seus grãos ao ligante, sendo a qualidade do agregado essencial no comportamento geral da pasta.

Propriedades da areia, como a dureza, a forma dos grãos, a granulometria e a porosidade, alteram as características da argamassa. Outro fator que influencia as características da argamassa é a origem da areia e o estado de limpeza da mesma. Para obtenção de uma boa argamassa, a utilização de uma areia bem graduada com um menor número de vazios é

adequada. As areias que possuem maior volume de vazios aumentam a estrutura porosa da argamassa e exigem traços mais ricos em ligante.

Os agregados (areia ou brita) constituem cerca de 70% a 75% do volume da pasta.

Nesta dissertação, foi utilizada uma areia adquirida em Aveiro, pelo Laboratório de Materiais de Construção da Universidade do Minho, com a designação de S50, que possui um tamanho médio de partícula de 439,9 μm , com uma granulometria compreendida entre 0,5 mm e 0,063 mm, e com uma massa volúmica de 2600 kg/m^3 .

3.1.3 Água

A função da água é garantir a capacidade aglutinante dos vários constituintes das argamassas no estado fresco, de forma a conferir a consistência necessária para a sua aplicação. A quantidade de água utilizada em argamassas permite diminuir ou dificultar a trabalhabilidade das mesmas, assim como variar a sua resistência.

No presente trabalho de investigação, toda a água utilizada foi fornecida da rede pública de abastecimento de Guimarães. Neste projeto não foram analisadas as características da água, visto que a norma EN 1008 (2005) não exige tal análise na utilização de água potável.

3.1.4 Cinzas volantes

Segundo a norma NP EN 450-1 (2006), cinzas volantes são consideradas como “ um pó fino constituído essencialmente por partículas vítreas de forma esférica resultante da queima de carvão pulverizado, com ou sem materiais de co-combustão, com propriedades pozolânicas e constituído essencialmente por SiO_2 e Al_2O_3 . As cinzas volantes são obtidas por precipitação eletrostática ou mecânica das poeiras arrastadas pelos gases de combustão da queima das caldeiras alimentadas a carvão pulverizado, com ou sem materiais de co-combustão, apresentados no Quadro 3.4.

Quadro 3.4 - Tipo de materiais de co-combustão

1	Materiais de origem vegetal, tais como: aparas de madeira, palha, caroço de azeitona e outras fibras vegetais
2	Madeira verde e biomassa cultivada
3	Farinhas animais
4	Lama de depuração urbana
5	Lama de fábrica de papel
6	Coke de petróleo
7	Combustíveis líquidos e gasosos praticamente sem cinzas

As cinzas volantes são atribuídas por classificação, seleção, peneiração, secagem, mistura, moagem ou redução de carbono, ou por combinação destes processos, em instalações adequadas.”

Para esta dissertação, as cinzas volantes utilizadas foram fornecidas pelo centro de produção de Sines ao Laboratório de Materiais de Construção da Universidade do Minho, cumprindo os requisitos exigidos pela norma NP EN 450-1 (2006) para a utilização de cinzas volantes em substituição de cimento para betão. Estas cinzas volantes são classificadas com categoria de finura N, com 16% de valor declarado de finura, classe B, e massa volúmica de 2300 kg/m³.

Os valores característicos das cinzas volantes, fornecidos pelo LNEC, encontram-se discriminados no Quadro 3.5.

Quadro 3.5 - Valores característicos especificados pelo LNEC

Características	Valor Característico	Limites para valores individuais	Valor declarado
Perda ao fogo	2% - 7%	< 9%	N, 20%
Finura	≤ 40% e VD ± 10%	< 45% e VD ± 15%	-
Óxido de cálcio livre	≤ 2,5%	≤ 2,6%	-
Óxido de cálcio total	< 10%	-	-
Cloretos	≤ 0,10%	< 0,10%	-
Sulfatos	≤ 3%	< 3,5%	-
Massa volúmica	± 200 Kg/m ³ do VD	± 225 Kg/m ³ do VD	2300 Kg/m ³
Índice de atividade:			
28 Dias	> 75%	< 70%	-
90 Dias	> 85%	< 80%	-
Expansibilidade (se CaO livre > 1,0%)	< 10 mm	< 10 mm	-

3.1.5 Hidróxido de Cálcio

O hidróxido de cálcio, também conhecido como cal apagada, ou cal hidratada é constituído maioritariamente, por silicatos e aluminatos de cálcio. Pode ser produzido por cozedura, extinção e moagem de calcários argilosos. O hidróxido de sódio tem a propriedade de fazer presa quando entra em contacto com água.

Para esta dissertação, o hidróxido de cálcio foi adquirido pelo Laboratório de Materiais de Construção da Universidade do Minho à empresa CALCIDRATA, Industrias de Cal, S.A. (Figura 3.1), que representa cal hidratada (hidróxido de cálcio) ou cal apagada como um material obtido da reação entre cal viva e água. Esta operação origina a seguinte reação química:



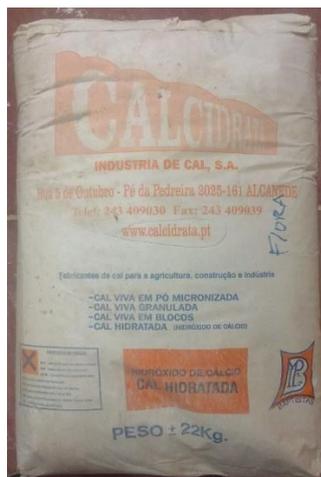


Figura 3.1 - Hidróxido de Cálcio

3.1.6 Metacaulino aditivado com hidróxido de sódio

O metacaulino é obtido através da desidroxilação quase total do caulino, processo no qual se verifica uma determinada perda de água da sua constituição, com a alteração da coordenação do alumínio com o oxigénio [21].

Para esta dissertação a obtenção do metacaulino passou por um processo de calcinação de caulino aditivado com hidróxido de sódio de acordo com a patente internacional WO 2007/109862 A1 [22].

A preparação do metacaulino aditivado decorreu no Laboratório de Materiais de Construção da Universidade do Minho, e os materiais foram adquiridos pelo mesmo.

O hidróxido de sódio (NaOH), também conhecido por soda cáustica é um material sólido, reativo e corrosivo que tem a capacidade de absorver as partículas de água contidas no ar. Deve ser manuseado com imenso cuidado para evitar queimaduras.

O hidróxido de sódio utilizado para este trabalho foi adquirido pelo Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho à empresa PCC Rokita e possui as propriedades que constam no Quadro 3.6.

Quadro 3.6 - Propriedades do hidróxido de sódio

Formula Química	Especificação	Análise Química
NaOH	98,00% Min.	98,20%

O caulino utilizado para este trabalho foi adquirido pelo Laboratório de Materiais de Construção da Universidade do Minho à Empresa MIBAL, Minas de Barqueiros, S.A., com as características que constam dos Quadro 3.7 a Quadro 3.9:

Quadro 3.7 - Análise química do caulino

Elemento	Percentagem (%)
SiO ₂	46,43
Al ₂ O ₃	35,66
Fe ₂ O ₃ Total	1,02
CaO	0,04
MgO	0,12
Na ₂ O	0,06
K ₂ O	1,22
TiO ₂	0,26
L.O.I	15,00

Quadro 3.8 - Distribuição granulométrica do caulino

< 30 μm	99 \pm 3%
< 10 μm	92 \pm 5%
< 5 μm	81 \pm 5%
< 2 μm	68 \pm 6%

Quadro 3.9 - Outras propriedades do caulino

Características/propriedades	Valores	Método
Brancura (1)	75 – 85	Dr. Lange Colorimeter
Densidade	2,4 – 2,7	ASTM D 1817 – 96
Absorção de Óleo	31 – 45	ASTM D 281 – 95
pH	5 – 8	ISSO 789/9 – 1981 (E)
Resíduo a 53 μm	< 0,3%	ASTM D 4315 – 94

(1) Seco a 110°C

O processo de obtenção do metacaulino aditivado com hidróxido de sódio seguiu os seguintes parâmetros:

- Triturar o hidróxido de sódio tornando-o num pó fino, com ajuda de um moinho de bolas (Figura 3.2 e Figura 3.3);
- Misturar 600 gramas de hidróxido de sódio em pó fino e 1000 gramas de caulino, com ajuda de um misturador, até homogeneizarem;
- Colocar a mistura num recipiente metálico e colocar num forno a uma temperatura de 650°C durante duas horas (Figura 3.4);
- Depois de retirar do forno voltar a moer o metacaulino aditivado já produzido, tornando o material num pó fino novamente;
- Por fim, vedar o metacaulino aditivado, de forma a não receber a humidade contida no ar.



Figura 3.2 - Trituração do hidróxido de sódio



Figura 3.3 - Hidróxido de sódio em pó



Figura 3.4 - Colocação da mistura no formo

3.1.7 Superplastificante

A utilização de superplastificantes tem como função, a redução da razão água/ligante, aumentando a fluidez da pasta e reduzindo a viscosidade [23]. Por outro lado, a partir da utilização de superplastificante podemos garantir betões ou argamassas com melhor trabalhabilidade e maior durabilidade, sendo este último critério o mais importante no desenvolvimento deste projeto.

Para esta dissertação, o superplastificante utilizado tem a designação GLENIUM SKY 617, e a sua ficha técnica caracteriza-o como um “adjuvante superplastificante de nova geração, com base numa cadeia de éter policarboxílico modificado, indicado para a indústria de betão, com elevada manutenção da trabalhabilidade e durabilidade.”

As principais características deste produto, certificadas segundo a NP EN 934-2, apresentam-se no Quadro 3.10. Na Figura 3.5 apresenta-se a embalagem do superplastificante.

Quadro 3.10 – Características técnicas do superplastificante:

Características técnicas	
Função principal:	Superplastificante/ forte redutor de água
Aspeto:	Líquido castanho
Densidade relativa (20°):	1,05 ± 0,02 g/cm ³
pH:	7,3 ± 1,5
Teor em iões cloreto	< 0,1 %



Figura 3.5 – Superplastificante

3.2 Composições

Para esta dissertação foram estudadas 5 composições de argamassas diferentes. O estudo das argamassas mais adequadas para esta dissertação foi efetuado com base no trabalho realizado por Abdollahnejad, et al. [20]. Para esta dissertação, foi usada uma composição de referência, com o intuito de ser uma base para a comparação de resultados com as outras composições, sendo constituída por cimento Portland (CEM), água, superplastificante (SP) e areia. Outra composição é constituída por cimento, cinzas volantes (CV), água, areia e Superplastificante (SP). As ultimas 3 composições são constituídas por cimento (CEM), cinzas volantes (CV), hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2), metacaulino aditivado (Mk), água, superplastificante (SP) e areia, no entanto têm percentagens de materiais diferentes.

De uma forma mais concreta, as percentagens de materiais por composição apresentam-se detalhadamente no Quadro 3.11.

Quadro 3.11 - Percentagens de material de cada composição (%)

Composição	CEM	CV	Ca(OH) ₂	Mk	Agua	SP	Areia
REF_100%CEM	100	----	----	----	0,35	1,4	80
REF_70%CEM_30%C	70	30	----	----	0,35	1,4	80
V							
GEOP_30%CEM_58,3 %CV_7,7%CaOH_4% Mk	30	58,3	7,7	4	0,35	1,4	80
GEOP_26%CEM_58,3 %CV_7,7%CaOH_8% Mk	26	58,3	7,7	8	0,35	1,4	80
GEOP_18%CEM_58,3 %CV_7,7%CaOH_16% Mk	18	58,3	7,7	16	0,35	1,4	80

A razão água/ligante utilizada para este trabalho de investigação foi de 0,35, sendo a mesma estudada e adotada na publicação mencionada anteriormente [20]. Este parâmetro tem interesse na realização de argamassas porque tem influência a nível de trabalhabilidade, propriedades mecânicas e durabilidade. Por outro lado, a razão água/ligante adotada para este trabalho experimental apresenta um baixo valor, que se pode explicar pela presença do superplastificante, sendo um material que permite aumentar a trabalhabilidade das argamassas.

O superplastificante tem como principal objetivo manter um maior tempo de trabalhabilidade, daí é compreensível a utilização do mesmo para estas argamassas para a realização de ensaios a fresco.

As misturas com a composição GEOP_30%CEM_58,3%CV_7,7%CaOH_4%Mk, GEOP_26%CEM_58,3%CV_7,7%CaOH_8%Mk, GEOP_18%CEM_58,3%CV_7,7%CaOH_16%Mk, são obtidas através do estudo realizado por Abdollahnejad, et al. [20], diferem nas percentagens de ligante, com o interesse de determinar através de ajustes, as argamassas que apresentam melhores resultados relativamente a ensaios de durabilidade.

3.2.1 Composição de referência

A composição de referência tem como objetivo ser uma base de comparação de ensaios de durabilidade de argamassas convencionais com argamassas de geopolímeros monofásicos.

As quantidades utilizadas para esta composição, designada por REF_100%CEM, apresentam-se no Quadro 3.12.

Quadro 3.12 - Composição da mistura de referência em gramas (g)

Composição	CEM (g)	Água (g)	SP (g)	Areia (g)
REF_100%CEM	23401	8190	328	18721

3.2.2 Composição de referência com adição de cinzas volantes

A composição com adição de cinzas volantes foi introduzida neste projeto com o interesse de analisar a durabilidade de ambas as argamassas, quando sujeitas a diferentes ensaios. Esta comparação tem importância, pelo facto das cinzas volantes serem um ligante obtido a partir da queima de resíduos em centrais termoelétricas, tentando obter uma razão de qualidade/preço.

As quantidades utilizadas para a realização desta composição, encontram-se apresentadas no Quadro 3.13.

Quadro 3.13 - Composição da mistura com adição de cinzas volantes em gramas (g)

Composição	CEM (g)	CV (g)	Água (g)	SP (g)	Areia (g)
REF_70%CEM_30%CV	16381	7020	8190	328	18721

3.2.3 Composições de misturas geopoliméricas

A partir destas composições, começa o estudo de durabilidade de geopolímeros monofásicos. As composições adotadas para este projeto foram estudadas anteriormente por Abdollahnejad, et al. [20] e desse estudo, foram ajustadas 3 misturas, com variação nas composições de ligante, de forma a determinar qual a que possui melhores capacidades de durabilidade, quando aplicadas a um determinado número de ensaios, e comparadas com as misturas de referência.

Como referido anteriormente geopolímeros monofásicos, são geopolímeros sem adição de silicatos de sódio, sendo assim, a composição destas misturas geopoliméricas e constituída por areia, cimento, cinzas volantes, metacaulino aditivado (preparação calcinada de hidróxido de sódio com caulino), hidróxido de cálcio, água e superplastificante.

Visto que foram realizadas 3 argamassas com diferentes percentagens de materiais, apresento no Quadro 3.14 a designação de cada argamassa e as suas respetivas quantidades para realização desta dissertação.

Quadro 3.14 - Quantidades de material utilizado nas misturas geopoliméricas (g)

Composição	CEM	CV	Ca(OH) ₂	Mk	Água	SP	Areia
GEOP_30%							
CEM_58,3							
%CV_7,7%	7020	13643	1802	936	8190	328	18721
CaOH_4%							
Mk							
GEOP_26%							
CEM_58,3							
%CV_7,7%	6084	13643	1802	1872	8190	328	18721
CaOH_8%							
Mk							
GEOP_18%							
CEM_58,3							
%CV_7,7%	4212	13643	1802	3744	8190	328	18721
CaOH_16%							
Mk							

3.3 Ensaio em argamassas

3.3.1 Amassadura

Apos ter determinado as misturas a realizar, e as suas quantidades procedeu-se à preparação das argamassas. É importante salientar que durante a preparação da amassadura é necessário garantir a homogeneidade de todos os materiais.

Para esta dissertação, todas as amassaduras foram realizadas na mesma betoneira, que possui uma capacidade máxima de 50 litros (Figura 3.6).



Figura 3.6 – Betoneira

Para a realização das misturas, adotou-se o seguinte procedimento:

- Introdução de todos os materiais secos na betoneira e misturá-los durante 2 minutos;
- Colocação de 80 % da quantidade total de água na mistura, vertendo-a lentamente durante 1 minuto;
- Deixar durante 2 minutos que a mistura de água com os materiais secos se processe;
- Adição do superplastificante na mistura e posterior colocação dos outros 20% de água durante 1 minuto;
- Misturar tudo durante 4 minutos;
- Após estes 10 minutos a misturar obtém-se a argamassa.

3.3.2 Comportamento da argamassa fresca

Apos a realização de cada amassadura procedeu-se à realização de ensaios para determinar a trabalhabilidade, a fluidez e a viscosidade da pasta. Foi realizado o ensaio de fluidez (V-funnel) e espalhamento.

O ensaio de fluidez (V-funnel) permite determinar a capacidade da argamassa fresca de passar em pequenas aberturas, o que envolve a viscosidade, através da observação da velocidade de escoamento de uma argamassa num funil, por ação do seu peso. Para a realização deste ensaio necessita-se de um funil em forma de “V” (Figura 3.7) com uma pequena abertura na parte superior e de um cronómetro para medir o tempo de escoamento.

A realização deste ensaio segundo a norma EN 12350-9 (2010), processa-se da seguinte forma:

- Humedecer o interior do funil;
- Coloca-se o funil na posição vertical, de forma que a maior abertura seja parte superior, numa superfície plana, nivelada e firme;
- Coloca-se um recipiente na parte inferior para receber a argamassa, e fecha-se a comporta inferior;
- De seguida procede-se ao enchimento do funil com argamassa ate ficar nivelado com a parte superior, sem qualquer tipo de vibração;
- De seguida abre-se a comporta da abertura inferior do funil e inicia-se a contagem de tempo, em simultâneo.
- Apos sair toda a argamassa do funil, termina-se a contagem.

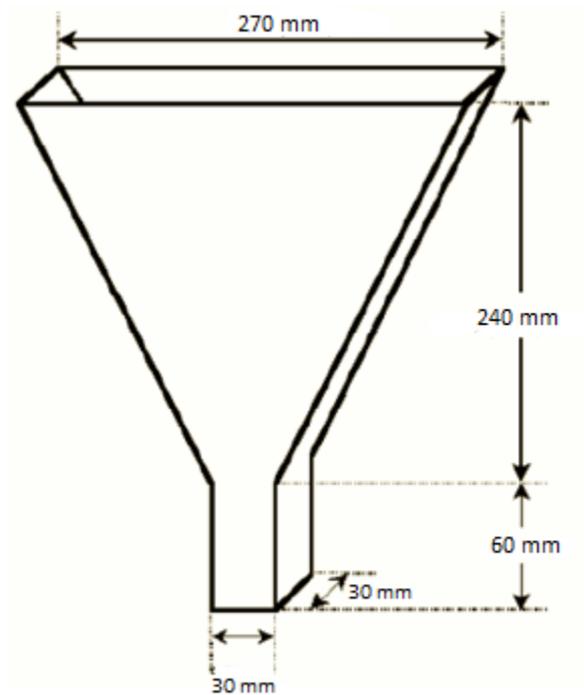


Figura 3.7 - Ensaio de fluidez (V-Funnel)

O ensaio de espalhamento permite determinar a consistência da argamassa fresca através do espalhamento da mesma numa mesa plana sujeita a pancadas (Figura 3.8). Através deste ensaio também é possível avaliar a trabalhabilidade da argamassa.

A realização deste ensaio segundo a norma EN 1015-03 (2004), processa-se da seguinte forma:

- Antes de iniciar cada teste, limpa-se a superfície do disco de espalhamento, e as bordas internas do molde com um pano húmido, deixando secar, e de seguida lubrificar as superfícies levemente com óleo mineral;
- Coloca-se o molde no centro do disco de espalhamento e de seguida com auxílio de uma colher introduzir a argamassa em duas camadas, sendo cada camada compactada, pelo menos, com 10 pancadas da compactadora para assegurar o enchimento uniforme do molde. Durante o enchimento, deve-se segurar o molde com firmeza sobre o disco, para não perder argamassa;
- Retira-se o excesso de argamassa com uma espátula, e limpa-se de seguida a área livre do disco com o cuidado de remover qualquer água que exista no bordo do fundo do molde.

3.3.3 Moldagem, conservação, tipo e dimensão dos provetes

Para esta dissertação foram utilizados provetes de diferentes dimensões, para a realização de diferentes ensaios de durabilidade. Para a preparação dos provetes foram utilizados moldes metálicos, que depois de serem devidamente limpos recebem as misturas de argamassa, onde iriam dar forma aos provetes. Foram utilizados moldes cúbicos ($50 \times 50 \times 50$) (mm^3) (Figura 3.9), ($100 \times 100 \times 100$) (mm^3) (Figura 3.10), e um molde paralelepípedo ($100 \times 100 \times 850$) (mm^3) (Figura 3.11), respeitando todos os requisitos para preparação de argamassas.



Figura 3.9 - Moldes cúbicos ($50 \times 50 \times 50$) (mm^3)



Figura 3.10 – Moldes cúbicos ($100 \times 100 \times 100$) (mm^3)



Figura 3.11 - Molde paralelepípedo (100×100×850) (mm³)

Durante a preparação dos provetes, foram cumpridos alguns parâmetros para a finalização dos mesmos. Sendo assim, a preparação destes, foi feita da seguinte forma:

- Limpeza dos moldes, e colocação de óleo de descofragem para facilitar esta quando o provete estiver seco, e não ficar danificado durante o desmolde;
- Colocação de 50% do volume dos moldes com argamassa;
- Vibração dos moldes
- Colocação da restante percentagem de volume do molde com argamassa para obter o provete na totalidade;
- Vibração dos moldes;
- Nivelamento da superfície;
- Colocação dos moldes com a respetiva argamassa, numa câmara húmida durante 24 horas com temperatura constante.
- Após 24 horas na camara húmida, procede-se à desmoldagem
- Por fim colocam-se os provetes, já desmoldados, novamente na câmara húmida até serem presentes a ensaios de durabilidade.

3.3.4 Resistência à compressão

Para este projeto a resistência à compressão foi analisada em provetes cúbicos (50×50×50) (mm³). As argamassas frescas foram colocadas nos moldes durante 24 horas até ser efetuada a desmoldagem, e de seguida foram mantidas em temperatura ambiente até serem realizados os ensaios de compressão. Os provetes foram ensaiados após 14 e 28 dias de cura. Foram ensaiados 3 provetes cúbicos para a obtenção dos resultados de compressão para cada argamassa.

O ensaio de compressão realizou-se segundo a norma EN 1015-11 (1999) e segue o seguinte procedimento:

- Antes de iniciar o ensaio à compressão deve-se garantir que o molde se encontra devidamente limpo, sem qualquer poeira;
- Limpa-se devidamente a superfície de rolamento da máquina de ensaio e as placas de rolamento com um pano limpo;
- De seguida coloca-se o provete na máquina (Figura 3.12), de modo a que a carga seja aplicada a uma das suas faces;
- Ajusta-se cuidadosamente o provete, de modo que a carga seja aplicada a toda a largura das faces em contacto com a placa.
- Aplicou-se uma força aumentando continuamente, a uma gama de 3 N/s.mm, e iniciou-se o ensaio. Registou-se o valor da carga aplicada, em N de cada ensaio.
- Por fim determinou-se a resistência à compressão da argamassa através da equação 1:

$$f_c = \frac{F}{A} \quad (1)$$

Em que:

f_c – Resistência à compressão, expressa em MPa (N/mm²)

F – Carga máxima de rotura, expressa em N;

A_c – Área da secção transversal do provete onde a carga de compressão é aplicada, em mm²



Figura 3.12 - Máquina para ensaio de compressão

3.3.5 Resistência à flexão em vigas

Este ensaio tem como objetivo determinar a resistência à flexão em argamassas. Para tal foram utilizados provetes de formato paralelepípedo (100×100×850) (mm³) para a realização dos ensaios.

Estes ensaios foram realizados segundo a norma EN 1015-11 (1999) após 28 dias de cura, e processa-se da seguinte forma:

- Antes de iniciar o ensaio deve-se limpar devidamente os provetes e os roletes da máquina de ensaio à flexão com um pano de modo a retirar todo o pó contido em ambos;
- Coloca-se o provete na máquina de modo a que fique centrado, e que o eixo longitudinal fique perpendicular aos dois apoios, garantindo que a face do provete se encontre devidamente colocada sobre os mesmos;
- De seguida coloca-se o rolete na parte superior da máquina para que fique devidamente centrado, e perpendicular ao perfil longitudinal do provete;
- Procede-se ao ensaio aplicando uma força gradualmente crescente, de modo contínuo, sem provocar choques, até que ocorra a rotura do provete (Figura 3.13);
- Por fim registam-se os resultados e determina-se a resistência à flexão através da seguinte equação 2:

$$f_{cf} = \frac{1,5 \times F_f \times l}{b \times d^2} \quad (2)$$

Sendo:

f_{cf} – Resistência à flexão, em MPa;

F_f – Carga máxima de flexão aplicada, em N;

l – Comprimento do provete, em mm;

b e d – Dimensões laterais do provete, em mm.

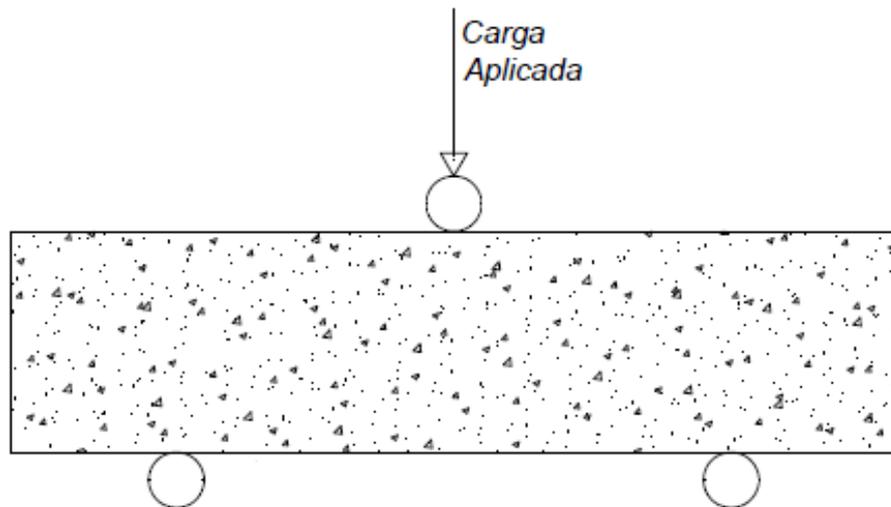


Figura 3.13 - Ensaio de resistência à flexão

3.3.6 Absorção de água por capilaridade

O coeficiente de absorção de água por capilaridade é determinado através da utilização de provetes de argamassas endurecidas, à pressão atmosférica. Depois de se proceder à secagem até obter massa constante, coloca-se uma das faces do provete imersa em 5 a 10 mm de água para um determinado período de tempo e determina-se o aumento da massa.

Para este projeto foram ensaiados 3 provetes cúbicos ($100 \times 100 \times 100$) (mm^3) de argamassas de cada uma das 5 misturas adotadas nesta dissertação, após 28 dias de cura.

Para a realização do ensaio de absorção de água por capilaridade adotou-se o método descrito na norma EN 1015-18, e segue os seguintes parâmetros:

- Colocam-se 3 provetes num recipiente, com as bases apoiadas sobre almofadas de suporte, imersos em água a uma profundidade de 5 a 10 mm para a realização do teste (Figura 3.14);
- De seguida ativa-se a contagem do tempo e mantém-se o nível da água constante em todo o ensaio;
- Efetua-se a cobertura do recipiente para evitar evaporação a partir dos provetes;
- Ao longo do ensaio efetuam-se pesagens dos provetes após a colocação em água, e efetuam-se pesagens ao fim de 5, 10, 20, 30, 60, 90, 120, 200, 240, 300, 360, 420, 480, 1440, 1560, 1680, 1800, 2880, 3000, 3120, 3240 e 7200 minutos;

- Registam-se todos os resultados das pesagens obtidas para cada provete;
- Por fim determina-se a absorção de água por capilaridade através da equação 3:

$$A_c = \frac{M_i - M_0}{A} \quad (3)$$

Sendo:

A_c – Valor da absorção de água por capilaridade, em g/mm²;

M_0 – Massa do provete seca, em gramas;

M_i – Massa do provete, num determinado intervalo de tempo, expressa em gramas;

A – Área da face do provete em contacto com a água, expressa em mm²;



Figura 3.14 - Provete submetidos ao ensaio de absorção de água por capilaridade

3.3.7 Absorção de água por imersão

A absorção de água por imersão é determinada pela diferença entre a massa de um provete de argamassa endurecido imerso em água e a massa do mesmo, quando se encontra seco, determinado em volume.

Para esta dissertação foram ensaiados 3 provetes cúbicos (100×100×100) (mm³) de argamassa de cada uma das 5 misturas adotadas, após 28 dias de cura.

Na realização do ensaio de absorção de água por imersão adotou-se o procedimento definido pela Especificação LNEC E-394 1993, e que segue os seguintes parâmetros:

- Secagem dos provetes numa estufa com temperatura de $105\pm 5^{\circ}\text{C}$ até adquirir massa constante, com pesagens efetuadas a cada 24 horas, até adquirir uma variação de massa $\leq 0,1\%$;
- Colocação dos provetes num recipiente com água de consumo público, à temperatura de $15\pm 5^{\circ}\text{C}$ até adquirir massa constante. Efetuou-se esta operação por etapas de tal modo que o provete seja imerso sucessivamente, em intervalos de 1 hora, a 1/3 da sua altura, 2/3 da sua altura e na totalidade da sua altura. O nível final de água não deve ultrapassar 20 mm da face superior dos provetes imersos;
- Considerou-se que a massa constante do provete saturado (m_1), seria alcançada quando a diferença entre as massas obtidas em duas pesagens consecutivas, num intervalo de 24 horas, seja inferior a 0,1% da média das duas leituras;
- Antes de efetuar as pesagens, secou-se o provete com um pano absorvente húmido, mas espremido, de forma a remover toda a água superficial;
- Procedeu-se à pesagem dos provetes dentro de água, sendo m_2 a massa hidrostática, após saturação;
- Retiraram-se os provetes de dentro de água e procedeu-se à sua secagem até obter massa constante (m_3), numa estufa com temperatura de $105\pm 5^{\circ}\text{C}$.
- Considerou-se alcançada a massa constante do provete seco (m_3) quando a diferença entre as massas obtidas em duas pesagens consecutivas, com intervalos de 24 horas, foi inferior a 0,1% da média das duas leituras;
- Por fim calcula-se a absorção de água por imersão, em percentagem, através da Equação 4:

$$A_i = \frac{m_1 - m_3}{m_1 - m_2} \times 100 \quad (4)$$

Sendo:

m_1 – massa do provete saturado ao ar, expressa em gramas;

m_2 – massa hidrostática do provete saturado, em gramas;

m_3 – massa do provete seco, expresso em gramas;

3.3.8 Resistência ao ataque químico

A resistência ao ataque químico pode ser realizada na presença de diferentes ácidos. No entanto na presente dissertação foi utilizada ácido sulfúrico. O ácido sulfúrico tem a propriedade de afetar o provete através da reação entre a solução e os compostos de cimento, levando à perda de massa do mesmo. Tem a propriedade de atacar mais severamente argamassas com hidróxido de cálcio, onde ocorre a lixiviação de cálcio provocando a degradação progressiva da pasta de cimento. Esta reação aumenta a permeabilidade do provete de argamassa, sendo necessário na realização do ensaio efetuar a pesagem do provete seco no início e no fim do ensaio, obtendo a perda de massa.

A utilização de ácidos para a realização do ataque químico explica-se por estes serem extremamente agressivos para ligantes compostos de cálcio.

Para a realização deste ensaio, foram utilizados 3 provetes cúbicos ($50 \times 50 \times 50$) (mm^3) de cada uma das respectivas argamassas, com uma percentagem ajustada de 10% de ácido sulfúrico, após 28 dias de cura.

O ácido sulfúrico, fornecido pelo Laboratório de Materiais de Construção da Universidade do Minho possui densidade equivalente a $1,68 \text{ g/cm}^3$ e concentração de 98%.

A realização deste ensaio segue os parâmetros definidos pela norma ASTM C267-01 e processa-se da seguinte forma:

- Antes de começar o ensaio deve-se pesar todos os provetes, com uma balança com aproximação de 0,001g, e registar os valores obtidos;
- Prepara-se um recipiente contendo uma determinada quantidade de água com 10 % de ácido sulfúrico. Garantir que o recipiente contenha água suficiente para os provetes fiquem imersos;
- Após preparar a solução, colocam-se os provetes de forma a garantir que todas as faces estão livres para serem afetadas pela solução, e garantir que o nível da solução se encontra 1 cm acima da face superior do provete;
- De seguida efetuam-se as pesagens ao fim de 1, 3, 7, 14, 28, 56 e 84 dias de imersão;
- Em cada pesagem deve-se lavar cada provete com água corrente, e de seguida deve-se secar o mesmo para depois ser pesado;
- Por fim determina-se a perda de massa através da equação 5:

$$\text{Perda de massa (\%)} = \left(\frac{W - C}{C} \right) \times 100 \quad (5)$$

Onde,

W – peso do provete após imersão, em gramas

C – peso do provete antes de ser submetido ao ataque químico, em gramas

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

Neste capítulo são analisadas todas as misturas de argamassa quando submetidas a ensaios. Esses resultados vão ser comparados de forma a compreender se as misturas geopoliméricas estudadas e ensaiadas nesta dissertação possuem boas capacidades de durabilidade quando comparadas com misturas de argamassas de cimento de Portland, e misturas de cimento de Portland com cinzas volantes.

Foram realizados ensaios para as argamassas em estado fresco e em estado endurecido. Para o estado endurecido foram realizados ensaios mecânicos e ensaios de durabilidade. Os ensaios mecânicos incidiram em ensaios de compressão e ensaios de flexão, enquanto os ensaios de durabilidade realizados foram: absorção de água por capilaridade, absorção de água por imersão e resistência ao ataque químico.

Relativamente aos ensaios em argamassas no estado fresco optou-se pela realização do ensaio de espalhamento e fluidez para cada argamassa.

4.1 Ensaios de espalhamento e fluidez

Para o ensaio de fluidez determinou-se o tempo que a argamassa demorava a sair por completo do funil “V” e os resultados obtidos apresentam-se no Quadro 4.1.

Quadro 4.1 - Ensaio de fluidez

Mistura	Teste	Tempo de escoamento (s)
REF_100%CEM		3,07
REF_70%CEM_30%CV		2,84
GEOP_30%CEM_58,3%CV_7,7%CaOH_4%Mk	V-funel	5,09
GEOP_26%CEM_58,3%CV_7,7%CaOH_8%Mk		Não verifica
GEOP_18%CEM_58,3%CV_7,7%CaOH_16%Mk		Não verifica

Como foi possível verificar, as misturas que demoram menos tempo a passar pelo funil são a misturas de referência, designadas por REF_100%CEM e REF_70%CEM_30%CV. As misturas geopoliméricas tiveram maior dificuldade na passagem pelo funil, sendo que apenas a mistura GEOP_30%CEM_58,3%CV_7,7%CaOH_4%Mk conseguiu passar toda a argamassa pelo funil, ao contrário das outras duas misturas que ficaram retidas no mesmo com pouca quantidade de argamassa passada. Através dos resultados obtidos verifica-se que as misturas geopoliméricas apresentam maior viscosidade, daí a maior dificuldade na passagem do funil.

Para o ensaio de espalhamento calculou-se o diâmetro das argamassas após serem ensaiados na mesa de espalhamento e, posteriormente, medindo os diâmetros obtidos em cada uma delas. Para a determinação dos diâmetros efetuou-se duas medições, perpendicular uma à outra, de forma a obter uma média do valor do diâmetro, visto o espalhamento apresentar-se de forma irregular.

Os resultados obtidos apresentam-se no Quadro 4.2.

Quadro 4.2 - Resultados do ensaio de espalhamento

Mistura	Medições	$D_{\text{espalhamento}}$ (mm)	$D_{\text{médio}}$ (mm)
REF_100%CEM	1	288	294
	2	300	
REF_70%CEM_30%CV	1	305	307,5
	2	310	
GEOP_30%CEM_58,3%CV_7,7%CaOH_4%Mk	1	235	240
	2	245	
GEOP_26%CEM_58,3%CV_7,7%CaOH_8%Mk	1	175	177,5
	2	180	
GEOP_18%CEM_58,3%CV_7,7%CaOH_16%Mk	1	200	205
	2	210	

Como se pode verificar no Quadro 4.2 as misturas que apresentam maior espalhamento são as misturas REF_100%CEM e REF_70%CEM_30%CV, quando comparadas com as misturas geopoliméricas. As misturas geopoliméricas apresentam menor espalhamento apresentando maior viscosidade, mesmo mantendo constante a razão de água/ligante.

4.2 Resistência à compressão e flexão

O conhecimento das resistências mecânicas constitui um dado essencial na caracterização das argamassas em estado endurecido. Pretende-se através do ensaio à compressão e flexão avaliar as propriedades mecânicas de diferentes argamassas, com quantidades e tipos de ligantes diferentes, mas com a mesma razão água/ligante.

No ensaio de resistência à compressão, os provetes de argamassa foram ensaiados após 14 e 28 dias de cura. Para cada argamassa foram ensaiados 3 provetes por idade e, de seguida, determinou-se a resistência à compressão média de cada. Como mencionado anteriormente, para este ensaio, foram utilizados provetes cúbicos (50×50×50) (mm³). As tensões obtidas para cada argamassa apresentam-se no Quadro 4.3.

Quadro 4.3 - Resultados dos ensaios de Compressão

Mistura	Tempo de Cura (dias)	Resistência à Compressão (Mpa)
REF_100%CEM	14	70,12
	28	79,84
REF_70%CEM_30%CV	14	52,08
	28	63,66
GEOP_30%CEM_58,3%CV_7,7%CaOH_4%Mk	14	28,54
	28	38,81
GEOP_26%CEM_58,3%CV_7,7%CaOH_8%Mk	14	11,68
	28	17,52
GEOP_18%CEM_58,3%CV_7,7%CaOH_16%Mk	14	16,79
	28	19,86

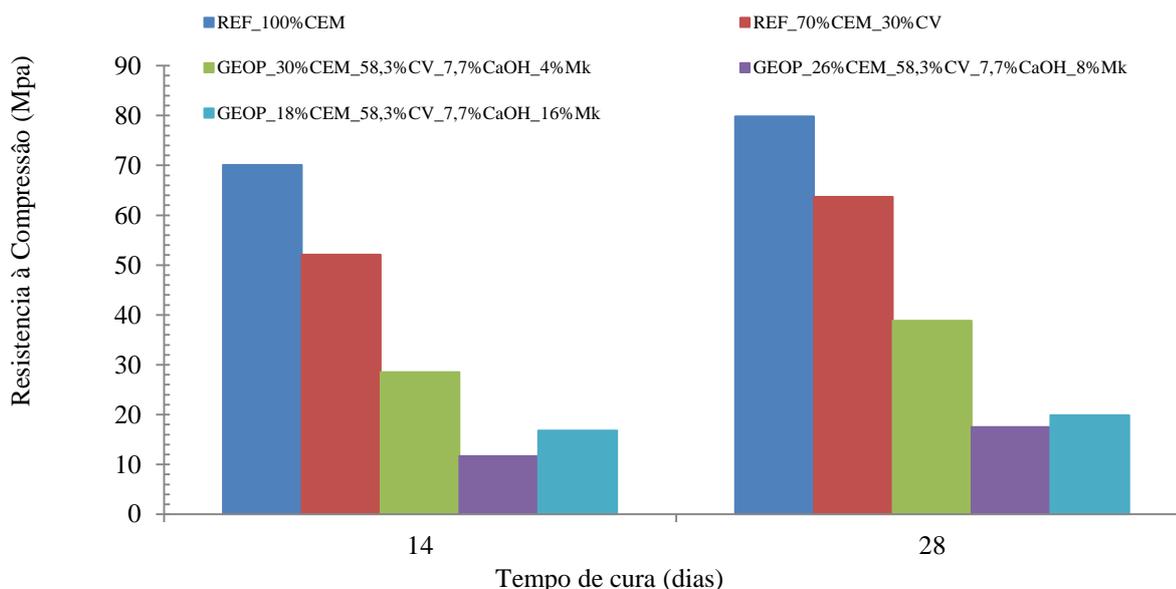


Figura 4.1 - Resistência à compressão das diferentes argamassas

Como é possível verificar na Figura 4.1, a argamassa designada por REF_100%CEM possui maior resistência à compressão, contendo apenas cimento como ligante. A introdução de cinzas volantes com cimento como ligantes (REF_70%CEM_30%CV) reduziu a resistência à compressão dos provetes. No entanto com o aumento do tempo de cura o aumento de resistência à compressão foi maior para a argamassa REF_70%CEM_30%CV quando comparada à REF_100%CEM.

As argamassas de geopolímeros monofásicos possuem resistências à compressão muito inferiores às argamassas que são constituídas apenas por cimento, ou cimento + cinzas volantes como ligantes. Tal situação verifica-se pela ausência de silicatos de sódio nestas argamassas geopoliméricas, sabendo que este composto confere maiores resistências mecânicas nas argamassas. No entanto, a mistura de geopolímeros monofásicos GEOP_18%CEM_58,3%CV_7,7%CaOH_16%Mk com apenas 18% de cimento Portland apesar de ter uma menor resistência à compressão, apresenta ainda assim um valor aos 28 dias que parece suficiente para aplicações onde não sejam necessários elevados valores como por exemplo em blocos de betão para alvenarias, tendo além disso as vantagens ambientais associadas a um menor consumo de cimento Portland.

Os ensaios à flexão foram realizados após 28 dias de cura, para vigas (100×100×850) (mm³), utilizando 1 provete para cada uma das 5 argamassas realizadas. Os resultados obtidos da tensão

de flexão para cada argamassa apresentam-se no Quadro 4.4 e na Figura 4.2 de forma a tornar mais fácil a análise de resultados.

Quadro 4.4 - Resultados dos ensaios à Flexão

Misturas	Tempo de Cura (dias)	Resistência à Flexão (MPa)
REF_100%CEM	28	3,40
REF_70%CEM_30%CV		2,70
GEOP_30%CEM_58,3%CV_7,7%CaOH_4%Mk		1,39
GEOP_26%CEM_58,3%CV_7,7%CaOH_8%Mk		0,89
GEOP_18%CEM_58,3%CV_7,7%CaOH_16%Mk		0,94

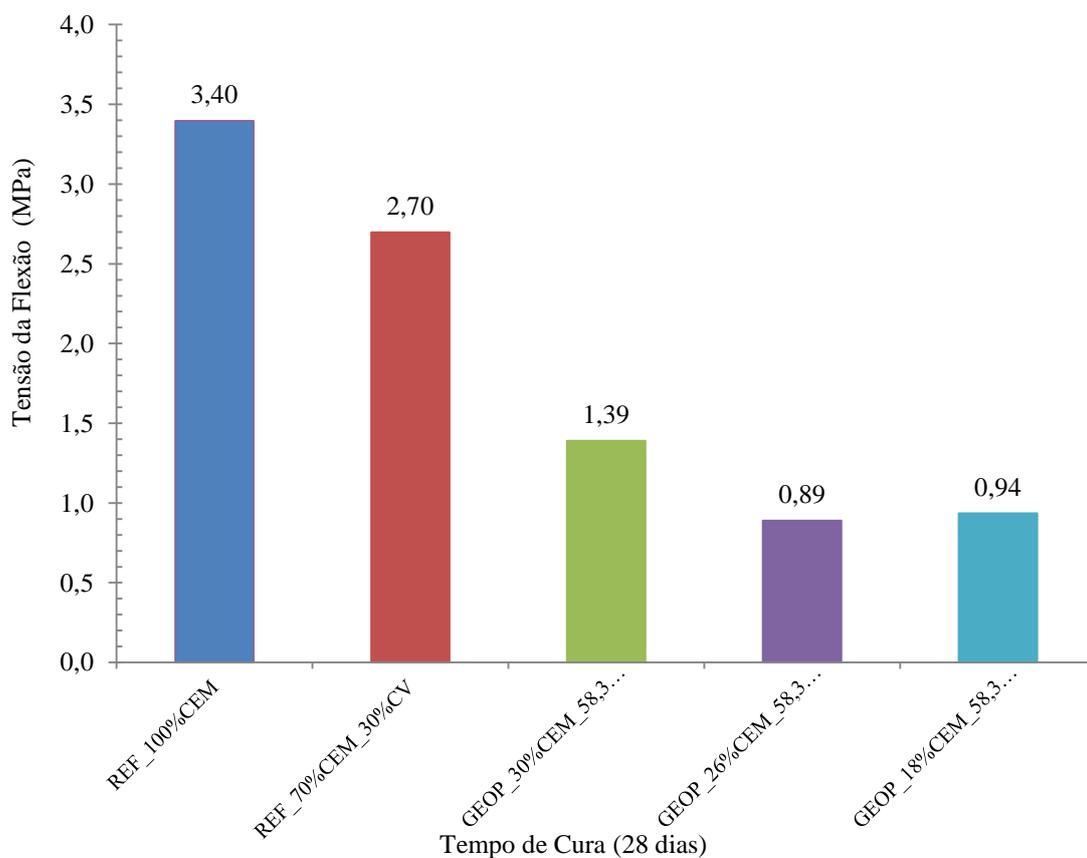


Figura 4.2 - Resultados da resistência à flexão

Como é possível verificar, a argamassa REF_100%CEM apresenta melhores resultados à flexão, visto que a rotura ocorre quando aplicada uma tensão mais elevada quando comparada com as outras argamassas. A argamassa REF_70%CEM_30%CV também apresenta um bom resultado à flexão sendo ligeiramente inferior à argamassa mencionada anteriormente, mas apresenta melhores resultados que as restantes argamassas.

No que diz respeito às argamassas de geopolímeros monofásicos, ambas apresentam resistência à flexão inferior às argamassas de referência, mas a argamassa de geopolímeros que apresenta melhores resultados à flexão é aquela que possui menor quantidade de metacaulino aditivado e maior quantidade de cimento. Contudo, as argamassas de geopolímeros monofásicos apresentam piores resultados nos ensaios de flexão por não possuírem silicatos de sódio na sua constituição, sabendo que este confere maior resistência mecânica às argamassas.

Através do gráfico da Figura 4.3 foi possível verificar maior resistência à flexão nas argamassas REF_100%CEM e REF_70%CEM_30%CV. No entanto a sua rotura ocorre apos um deslocamento muito pequeno. Por outro lado, as misturas de geopolímeros monofásicos entram em rotura com tensões inferiores às de referência, mas o deslocamento destas foi superior ao deslocamento das argamassas de referência conferindo a estas maior ductilidade até ocorrer a rotura. Sendo assim, pode-se mencionar que à medida que a quantidade de metacaulino aditivado aumenta e a quantidade de cimento diminui, as argamassas geopoliméricas vão perdendo resistência a flexão.

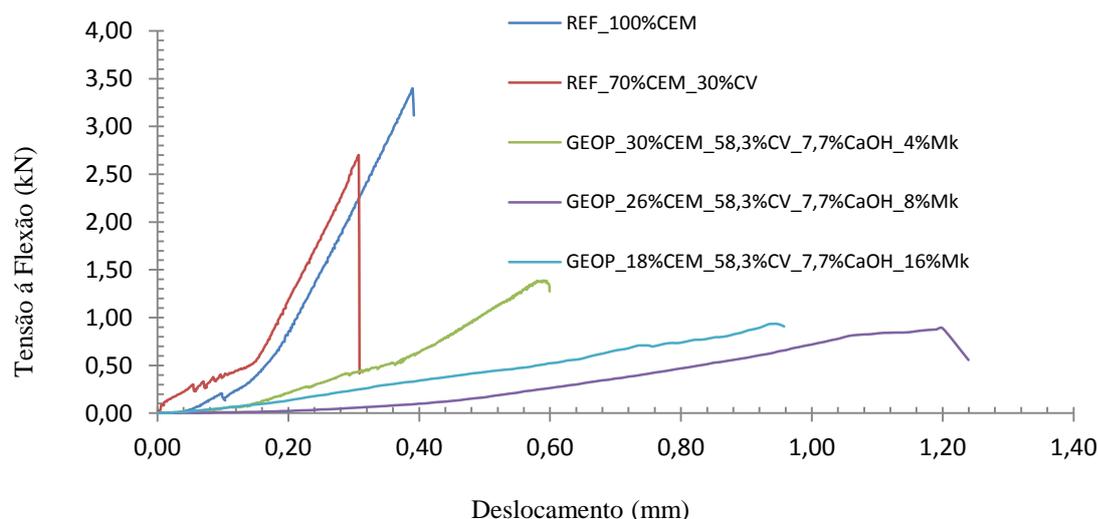


Figura 4.3 - Flexão dos provetes de argamassa

4.3 Absorção de água por capilaridade

A determinação da absorção de água por capilaridade pode ser representada através de curvas que apresentam a variação da quantidade de água absorvida por unidade de superfície em contacto com a água, em função da raiz quadrada do tempo.

Para este ensaio foram utilizados 3 provetes cúbicos ($100 \times 100 \times 100$) (mm^3) de cada uma das 5 argamassas de modo a obter um valor médio da quantidade de água absorvida pelos mesmos, após 28 dias de cura. Com o decorrer do ensaio foram efetuadas as pesagens dos provetes em função dos tempos definidos anteriormente, sendo determinados os valores de absorção para cada provete. Todas as argamassas possuem a mesma razão água/ligante.

Através do gráfico apresentando na Figura 4.4 foi possível analisar a evolução da absorção de cada provete das diferentes argamassas.

Como foi possível verificar, as argamassas que tiveram menor absorção de água por capilaridade foram as argamassas de referência, sendo que a argamassa REF_100%CEM possui o melhor resultado de todas, sendo constituída apenas por cimento como ligante. Com a adição de cinzas volantes na mistura REF_70%CEM_30%CV, o provete de argamassa tornou-se mais poroso, aumentando ligeiramente a absorção de água ao longo do ensaio, quando comparado com a argamassa REF_100%CEM. Contudo o valor da absorção desta mistura continuou a ser inferior à absorção das 3 misturas de geopolímeros monofásicos.

Relativamente às argamassas de geopolímeros monofásicos foi possível analisar que as argamassas contendo 4% e 16% de metacaulino foram as que apresentaram melhor desempenho, mostrando que a argamassa geopoliméricas com 8% de metacaulino aditivado possui maior porosidade e a absorção foi a maior de todas as argamassas, sendo algo inesperado neste ensaio. Contudo, das 3 argamassas geopoliméricas, a que apresentou menor absorção de água por capilaridade ao longo do ensaio foi a GEOP_30%CEM_58,3%CV_7,7%CaOH_4%Mk.

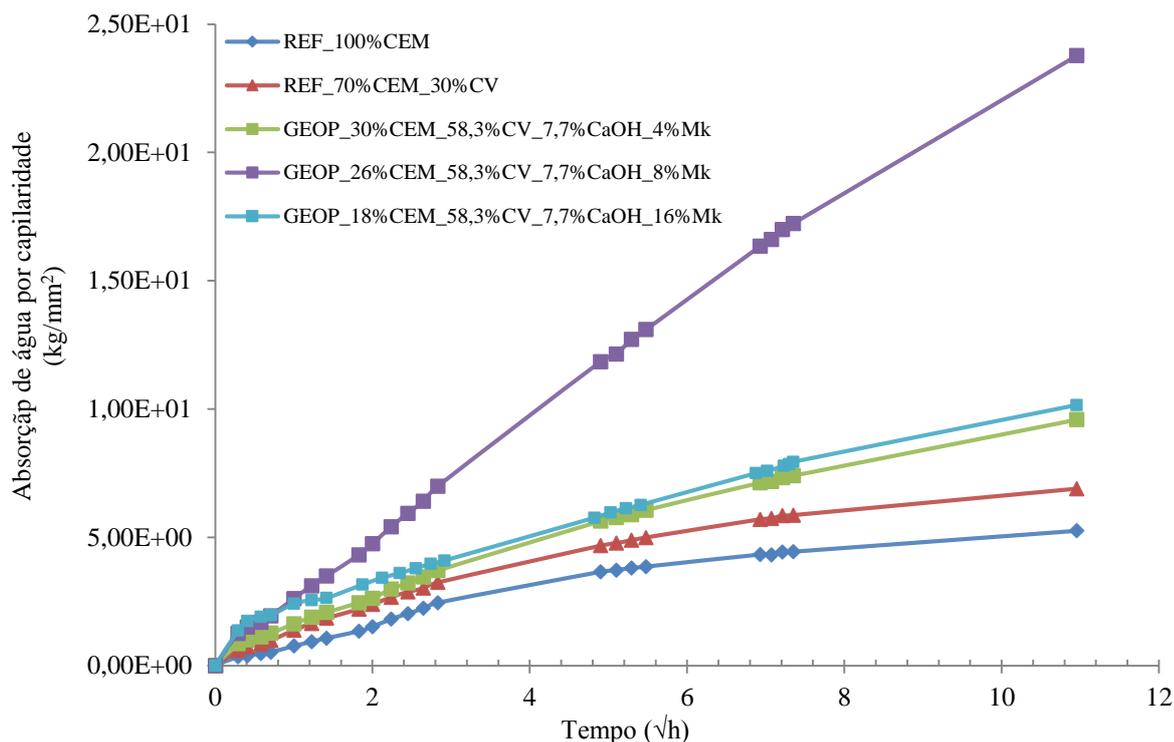


Figura 4.4 - Ensaio de absorção de água por capilaridade ao longo de 72 horas de ensaio

O coeficiente de absorção de água por capilaridade foi determinado através da equação da reta de tendência da curva de absorção no intervalo de tempo entre os 10 e 90 minutos. Após determinar a curva, apresentou-se a equação da reta, em que o declive corresponde ao valor do coeficiente de absorção como se pode verificar na Figura 4.5 onde as cores das linhas de tendência correspondem às cores das respectivas argamassas que se encontram representadas no Quadro 4.5 com os respectivos valores dos coeficientes de capilaridade.

Quadro 4.5 - Coeficiente de absorção de água por capilaridade

Misturas	Coeficiente de capilaridade - $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{0,5})$
REF_100%CEM	6,84E-01
REF_70%CEM_30%CV	1,16E+00
GEOP_30%CEM_58,3%CV_7,7%CaOH_4%Mk	1,12E+00
GEOP_26%CEM_58,3%CV_7,7%CaOH_8%Mk	2,05E+00
GEOP_18%CEM_58,3%CV_7,7%CaOH_16%Mk	1,05E+00

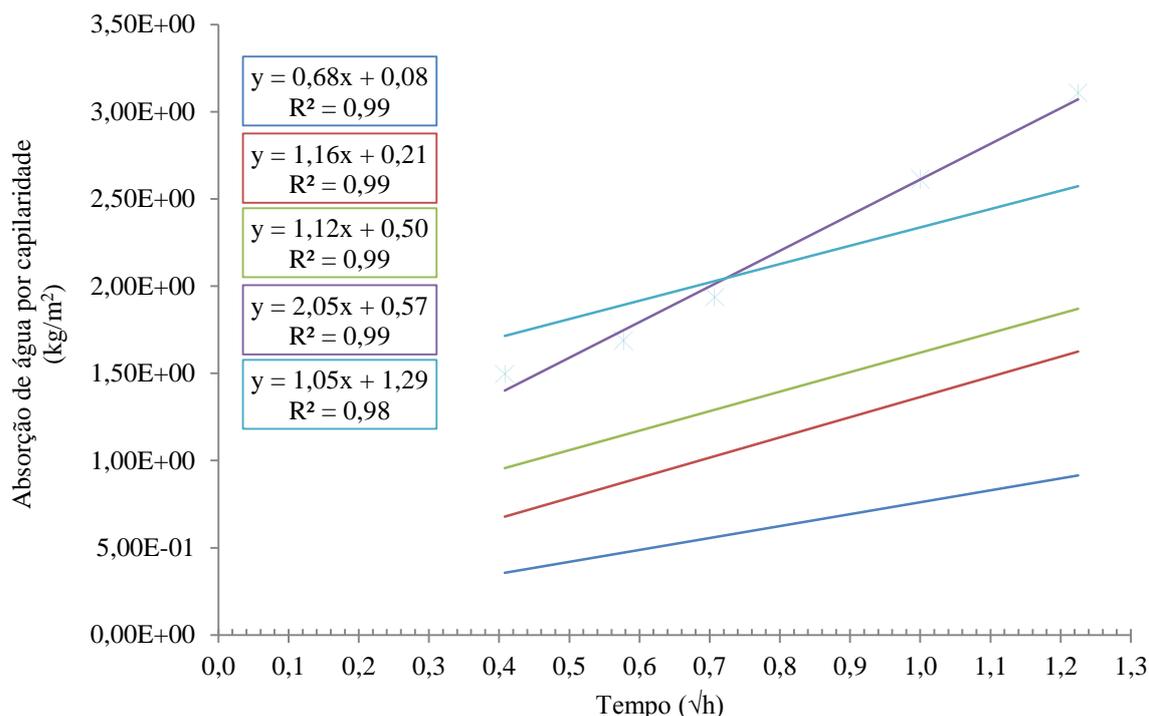


Figura 4.5 - Linha de tendência do coeficiente de absorção de água por capilaridade entre 10 a 90 minutos

Analisando o gráfico representado na Figura 4.6 foi possível verificar que a argamassa de referência REF_100%CEM possui o menor coeficiente de capilaridade quando comparado com as outras argamassas. Por outro lado, a argamassa de referência que contém adição de cinzas volantes apresentou uma absorção ligeiramente superior à argamassa de referência com apenas cimento Portland, mas também apresentou um coeficiente de absorção superior ao de algumas argamassas geopoliméricas.

No que diz respeito às argamassas de geopolímeros monofásicos foi possível verificar que as argamassas com 4% e 16% de metacaulino apresentaram um coeficiente de absorção baixo, quando comparados com a argamassa com 8% de metacaulino aditivado. No entanto, o valor do coeficiente de absorção destas argamassas de geopolímeros monofásicos continuou a ser superior ao da argamassa de referência com 100% de cimento Portland.

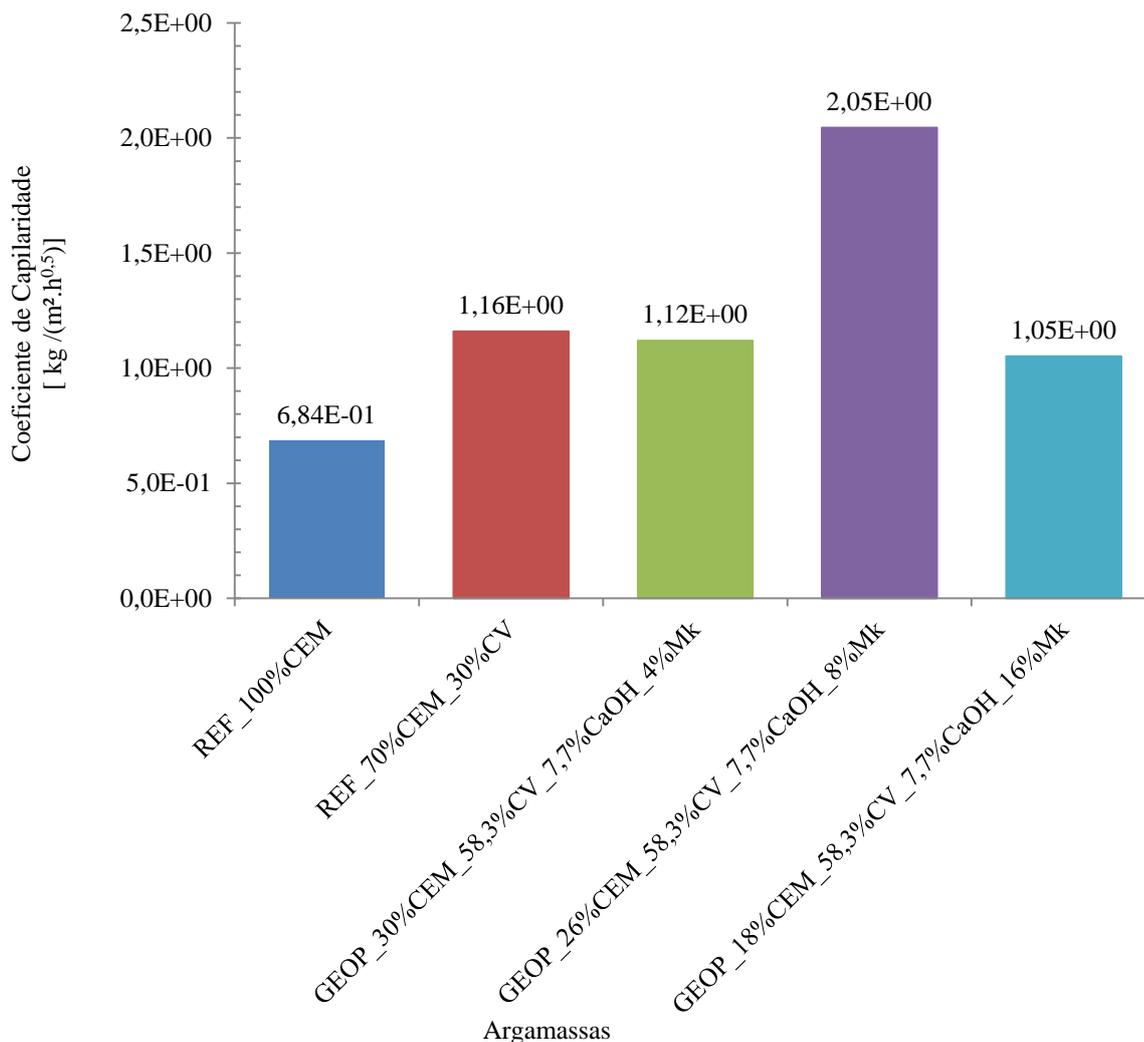


Figura 4.6 - Coeficiente de absorção de água por capilaridade

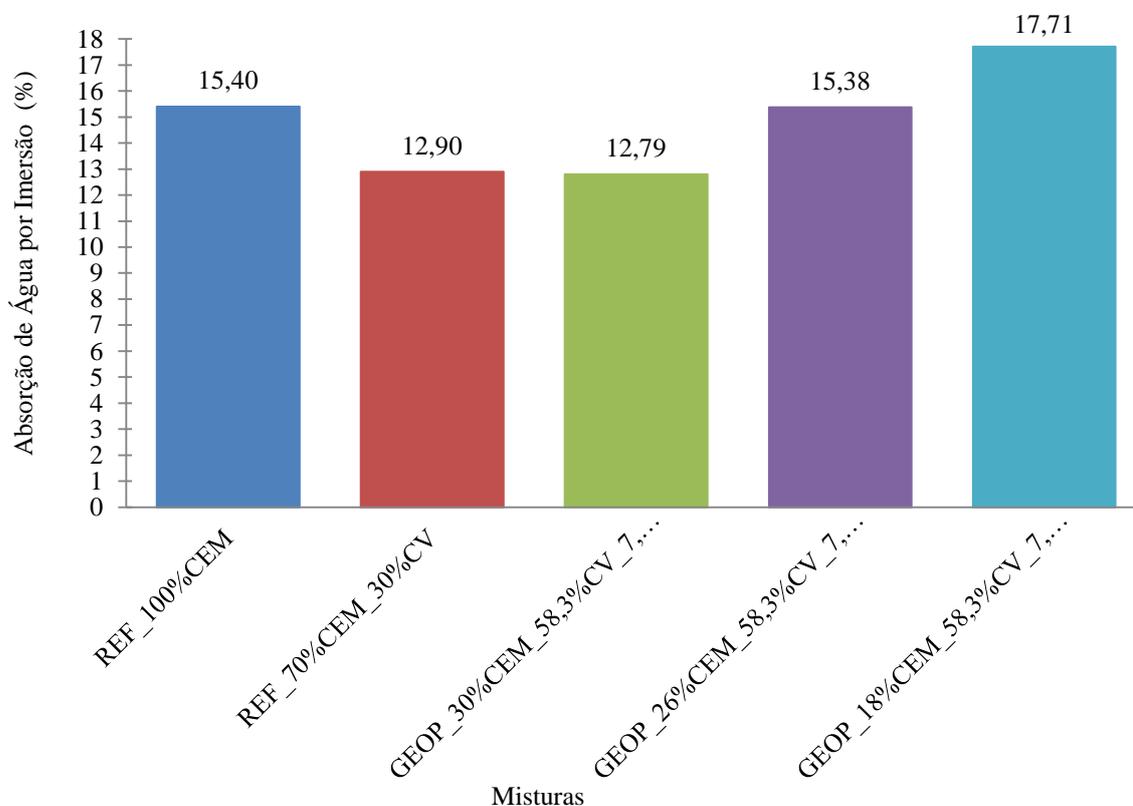
4.4 Absorção de água por imersão

O ensaio de absorção de água por imersão realizou-se para provetes das 5 argamassas. Para determinação de um valor adequado foram ensaiados 3 provetes cúbicos (100×100×100) (mm³) de cada argamassa e, posteriormente, determinou-se a média dos mesmos para obter o valor final da absorção de água por imersão.

Através do Quadro 4.6 foi possível analisar os resultados obtidos da absorção de água por imersão dos provetes de argamassas determinados a partir da equação calculada em função da massa seca do provete (M1), massa hidrostática do provete depois de saturado em água à pressão atmosférica (M2) e massa do provete saturado em água à pressão atmosférica (M3). Por fim, a absorção de água por imersão obteve-se por percentagem de massa.

Quadro 4.6 - Absorção de Água por Imersão

Absorção de Água por Imersão					
Mistura	Dimensões (mm ³)	M ₁ (g)	M ₂ (g)	M ₃ (g)	Absorção (%)
REF_100%CEM		2058,60	1204,40	2214,10	15,40
REF_70%CEM_30%CV		2018,10	1131,70	2149,40	12,90
GEOP_30%CEM_58,3%CV_7,7 %CaOH_4%Mk	100 x 100	1919,30	1041,30	2048,10	12,79
GEOP_26%CEM_58,3%CV_7,7 %CaOH_8%Mk	x 100	1855,80	1020,60	2007,60	15,38
GEOP_18%CEM_58,3%CV_7,7 %CaOH_16%Mk		1800,60	989,10	1975,30	17,71

**Figura 4.7 - Absorção de Água por Imersão**

Através do gráfico da Figura 4.7 pode-se analisar de uma forma compreensível a absorção de água por imersão dos diferentes provetes de argamassas.

A REF_100%CEM apresenta uma absorção de água de 15,4% da massa do provete, apresentando pouca eficácia de absorção, e quando comparado com a argamassa REF_70%CEM_30%CV, verifica-se uma redução de absorção desta, conferindo que a adição de cinzas volantes com redução de cimento permitiu à argamassa reduzir o valor da absorção para 12,9% da massa do provete.

Relativamente às argamassas de geopolímeros monofásicos obteve-se uma situação parecida com a das argamassas de referência. Com o aumento da quantidade de metacaulino e redução da quantidade de cimento, os provetes geopoliméricos foram aumentando a sua absorção de água, sendo que a argamassa GEOP_18%CEM_58,3%CV_7,7%CaOH_16%Mk obteve mais absorção que a argamassa REF_100%CEM.

Contudo, para este ensaio a argamassa GEOP_30%CEM_58,3%CV_7,7%CaOH_4%Mk apresentou melhor desempenho quando comparada com as restantes, obtendo o coeficiente de absorção mais baixo, sendo de 12,79% da massa do provete e demonstrando que uma mistura de geopolímeros monofásicos com as quantidades de ligantes devidamente adotadas, podem apresentar melhores resultados de absorção de água por imersão quando comparados com argamassas de cimento ou argamassas de cimento com cinzas volantes.

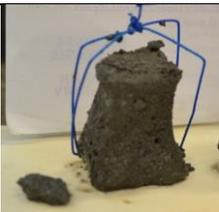
4.5 Resistência ao ataque químico

A resistência ao ataque químico influencia a durabilidade das argamassas. Na realização deste ensaio efetuou-se uma preparação de água com 10% de ácido sulfúrico em volume. Submeteram-se todas as argamassas e efetuaram-se pesagens ao fim de 1, 3, 7, 14 e 28 dias.

Para este ensaio foram usados 3 provetes cúbicos ($50 \times 50 \times 50$) (mm^3) para cada argamassa. A obtenção de resultados determinou-se pela percentagem de perda de massa, da média dos 3 provetes de argamassa, obtendo os resultados pretendidos.

As 5 argamassas tiveram diferentes perdas de massa, derivados do tipo e quantidade de ligantes que as constituíam. Através das imagens apresentadas no Quadro 4.7 pode-se verificar a perda de massa dos provetes das diferentes misturas ao fim dos dias definidos anteriormente.

Quadro 4.7 - Provetes de argamassas submetidos ao Ataque Químico

REF_100%CEM				
Dia 0	Dia 1	Dia 3	Dia 7	Dia 14
				
REF_70%CEM_30%CV				
Dia 0	Dia 1	Dia 3	Dia 7	Dia 14
				
GEEP_30%CEM_58,3%CV_7,7%CaOH_4%Mk				
Dia 0	Dia 1	Dia 3	Dia 7	Dia 14
				
GEEP_26%CEM_58,3%CV_7,7%CaOH_8%Mk				
Dia 0	Dia 1	Dia 3	Dia 7	Dia 14
				
GEEP_18%CEM_58,3%CV_7,7%CaOH_16%Mk				
Dia 0	Dia 1	Dia 3	Dia 7	Dia 14
				

Como se pode verificar no Quadro 4.7, as diferentes argamassas foram perdendo volume ao longo dos dias de ensaio. No entanto, nenhuma delas chegou aos 28 dias perdendo a totalidade da massa do provete. As argamassas que apresentam melhor comportamento ao ataque ácido são as argamassas de referência, tendo uma perda de massa regular e mantendo o seu formato cubico ate ao final do ensaio.

Relativamente às misturas de geopolímeros monofásicos pode-se verificar que todas as argamassas tiveram uma perda de volume muito irregular, alterando o seu formato cubico ao longo dias. Por outro lado a argamassa geopoliméricas que apresentou melhor comportamento foi a GEOP_30%CEM_58,3%CV_7,7%CaOH_4%Mk, que conseguiu chegar ate aos 14 dias de ensaio, não perdendo muito o seu formato cubico, ao contrário dos provetes de GEOP_26%CEM_58,3%CV_7,7%CaOH_8%Mk e GEOP_18%CEM_58,3%CV_7,7%CaOH_16%Mk que não chegaram aos 14 dias de ensaio. Para estes últimos, o possível aumento da quantidade de metacaulino aditivado pode ter sido o principal fator da sua destruição ao ataque ácido. Também se torna importante salientar, que a não existência de silicatos de sódio nestas argamassas de geopolímeros monofásicos reduz a durabilidade das argamassas.

Através do

Quadro 4.8 pode-se verificar a perda de volume dos provetes ao longo do tempo de exposição ao ácido sulfúrico, e através da Figura 4.8 pode-se analisar de forma mais perceptível a variação da perda de volume para os diferentes provetes.

Mais uma vez pode-se salientar que a argamassa GEOP_30%CEM_58,3%CV_7,7%CaOH_4%Mk é a que apresenta uma perda de massa mais próxima das perdas de massa das argamassas de referência, mesmo assim apresenta resultados inferiores a estas. Como tal, para este ensaio as argamassas de geopolímeros monofásicos não são eficazes quando comparadas com argamassas de cimento, e cimento com adição de cinzas volantes.

Quadro 4.8 - Ensaio de Ataque Químico

Mistura	Tempo de Exposição ao Ácido Sulfúrico (d)	Percentagem Perda de massa (%)
REF_100%CEM	0	0%
	1	1%
	3	11%
	7	19%
	14	36%
	28	100%
REF_70%CEM_30%CV	0	0%
	1	3%
	3	13%
	7	23%
	14	39%
	28	100%
GEOP_30%CEM_58,3%CV_7,7%Ca OH_4%Mk	0	0%
	1	1%
	3	18%
	7	32%
	14	66%
	28	100%
GEOP_26%CEM_58,3%CV_7,7%Ca OH_8%Mk	0	0%
	1	19%
	3	47%
	7	85%
	14	100%
GEOP_18%CEM_58,3%CV_7,7%Ca OH_16%Mk	0	0%
	1	23%
	3	65%
	7	74%
	14	100%

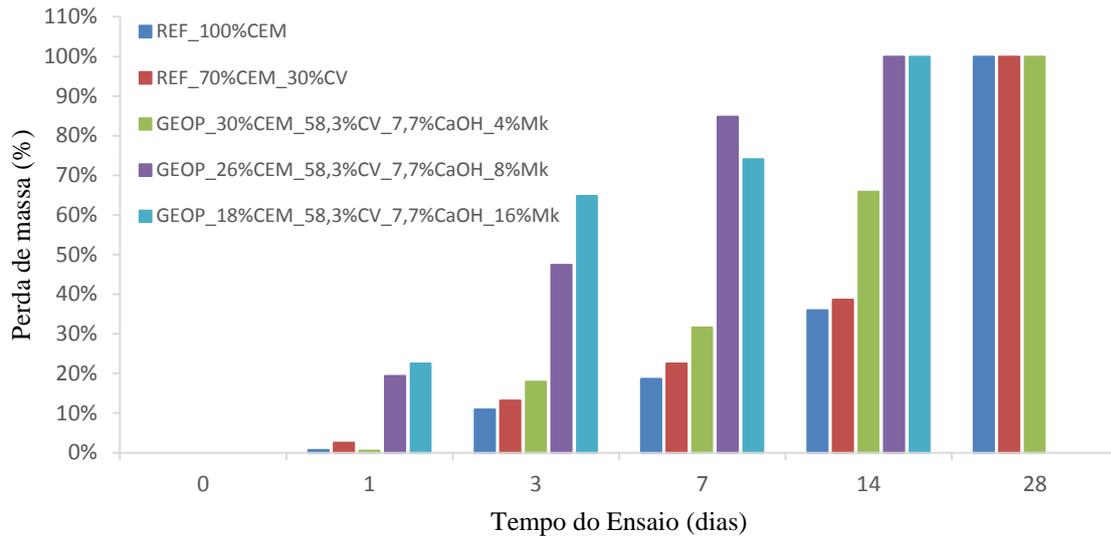


Figura 4.8 - Ensaio ao Ataque Químico

5 CONCLUSÕES

A realização desta dissertação tinha como objetivo preparar argamassas de geopolímeros monofásicos, um recente tipo de geopolímero em estudo, e determinar as suas capacidades quando expostos a ensaios físicos, mecânicos e ensaios de durabilidade. Para tal foram preparados provetes de argamassas de geopolímeros monofásicos com diferentes quantidades de ligantes para determinar a composição que apresentava melhores resultados a tais ensaios e comparar as mesmas com provetes de argamassas de cimento Portland e argamassas de cimento Portland com cinzas volantes.

Numa primeira fase foram realizados ensaios com as argamassas em estado fresco, onde se realizou o ensaio de espalhamento e o ensaio de fluidez. Relativamente ao ensaio de espalhamento foi possível concluir que as argamassas de geopolímeros monofásicos possuem menor trabalhabilidade que as argamassas de referência, verificando que neste estudo a argamassa que possui melhor trabalhabilidade foi a argamassa REF_70%CEM_30%CV. No que diz respeito ao ensaio de escoamento foi possível concluir que as argamassas geopoliméricas, devido à presença de metacaulino aditivado na mistura, possuem reduzida fluidez. No entanto a fluidez das argamassas pode ser ou não importante dependendo do tipo de aplicação. Como tal, a baixa fluidez das argamassas geopoliméricas pode ser uma vantagem para determinadas aplicações.

Relativamente aos ensaios mecânicos, foram realizados ensaios de resistência à compressão e ensaios de resistência à flexão. Nos ensaios de resistência à compressão foi possível concluir para as argamassas de geopolímeros monofásicos, que a falta de silicatos de sódio na sua composição reduz as suas propriedades mecânicas, apresentando mau resultados quando comparados com as argamassas de referência. No entanto, as argamassas de geopolímeros monofásicos não possuem resistência à compressão suficiente quando comparadas com as argamassas de cimento Portland, apresentando maus resultados. Relativamente aos resultados de flexão, concluiu-se novamente que as argamassas de geopolímeros monofásicos foram menos eficazes que as argamassas de referência. Contudo, a presença de metacaulino aditivado conferiu às argamassas geopoliméricas maior deformabilidade, ou seja, tiveram um maior deslocamento quando comparadas com o deslocamento das argamassas de referência. Sendo assim, as argamassas de referência possuem maior resistência à flexão, mas também são mais rígidas, entrando em rotura rapidamente.

No que diz respeito aos ensaios de durabilidade, para esta dissertação foram realizados ensaios de absorção de água por capilaridade, absorção de água por imersão e ataque químico.

Para o ensaio de capilaridade foi possível concluir que a argamassa de cimento Portland REF_100%CEM apresentou os melhores resultados por ser menos porosa que as outras argamassas. No entanto a argamassa de referência com adição de cinzas volantes apresentou maior porosidade provavelmente por causa das cinzas volantes. As argamassas de cinzas volantes apresentaram resultados um pouco estranhos, sendo que as argamassas geopoliméricas com 4% e 16% de metacaulino aditivado apresentaram uma absorção um pouco superior às argamassas de referência, mas a argamassa com 8% de metacaulino aditivado teve uma absorção muito elevada, onde tal absorção provavelmente deveria estar intermédia entre as outras duas argamassas geopoliméricas. Este fenómeno pode ter acontecido de forma a demonstrar que na preparação de argamassas as percentagens de ligante adotadas para determinadas misturas podem conferir melhores resultados, mas também podem dar origem a resultados muito maus, algo que pode ter acontecido na argamassa GEOP_26%CEM_58,3%CV_7,7%CaOH_8%Mk exposta a este ensaio. Por outro lado, os coeficientes de absorção obtidos através da equação da reta de tendência apresentam resultados ligeiramente diferentes. A argamassa de referência com 100% de cimento Portland continua a apresentar menor coeficiente de absorção, no entanto a argamassa de referência com adição de cinzas volantes apresenta um coeficiente de absorção ligeiramente superior ao coeficiente de absorção das argamassas com 4% e 16% de metacaulino aditivado. Este resultado demonstra que no início do ensaio o coeficiente de absorção das argamassas de geopolímeros monofásicos com 4% e 16% de metacaulino aditivado é mais baixo que o da argamassa de referência com adição de cinzas volantes.

Através do ensaio de absorção de água por imersão obteve-se resultados diferentes do ensaio de absorção de água por capilaridade. No entanto, através deste ensaio foi possível verificar que a argamassa que apresenta melhor desempenho na absorção de água por imersão foi a argamassa GEOP_30%CEM_58,3%CV_7,7%CaOH_4%Mk, apresentando uma percentagem de absorção inferior às outras argamassas. Sendo assim, foi possível concluir que as argamassas de geopolímeros monofásicos possuem uma certa impermeabilidade nas faces exteriores, mas no seu interior são mais permeáveis, algo que foi demonstrado através deste ensaio onde os provetes se encontram pouco tempo imersos em água.

Para o ensaio de ataque químico foi possível concluir que as argamassas de geopolímeros monofásicos foram menos resistentes que as argamassas de referência. Tal situação pode ter acontecido, pelo facto das argamassas de geopolímeros possuírem uma grande variedade de ligantes, onde a tentativa de homogeneização dos mesmos não ter sido adquirida. A má consistência entre eles pode ter sido o fator determinante do desgaste rápido dos provetes das argamassas de geopolímeros monofásicos.

De um modo geral, os resultados obtidos nos provetes de argamassas de geopolímeros monofásicos não foram os desejados. As misturas de referência conseguiram quase sempre apresentar melhores resultados. No entanto, a argamassa geopolimérica GEOP_30%CEM_58,3%CV_7,7%CaOH_4%Mk conseguiu obter resultados muito próximos dos melhores.

5.1 Trabalhos futuros

Sabendo que o estudo da durabilidade de geopolímeros monofásicos é um tema ainda muito recente, torna-se extremamente importante desenvolver mais esta temática. Como tal, para que o estudo desta temática se torne mais credível e que possíveis resultados futuros sejam obtidos, torna-se necessário desenvolver novamente um estudo completo no âmbito deste tema. Para tal, será necessário:

Estudar novamente as composições a adotar para a realização de argamassas de geopolímeros monofásicos, ajustando novamente as percentagens de ligantes.

Proceder ao estudo de durabilidade de geopolímeros monofásicos em betões;

Realizar o maior número de ensaios de durabilidade de forma a garantir resultados mais completos, tais como: ensaio gelo-desgelo, ensaio de carbonatação, ensaio de ataque de cloretos, resistência ao fogo, resistência a elevadas temperaturas, resistência à abrasão, ultras-sons e resistividade elétrica.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Pacheco-Torgal, F., & Jalali, S. (2011). *A Sustentabilidade dos Materiais de Construção* (2ª Edição, 460 p. TecMinho). Guimarães.
- [2] Pinto, A.T. (2004). *Sistemas Ligantes Obtidos por Ativação Alcalina do Metacaulino*. Tese de Doutoramento. Universidade do Minho, Guimarães.
- [3] Pacheco-Torgal, F. - *Desenvolvimento de ligantes obtidos por activação alcalina de lamas residuais das Minas da Panasqueira*. Tese de Doutoramento, Universidade da Beira Interior, Julho de 2007, 423pp.
- [4] Pacheco-Torgal, F., Jalali, S. (2009). *Ligantes geopoliméricos: uma alternativa ao cimento Portland?* Revista INGENIUM, nº 116, pp. 94-96.
- [5] Pacheco-Torgal, F., Abdollahnejad, Z., Camões, A.F., Jamshidi, M., Ding, Y. (2011, December 4). *Durability ok alkali-actived binders: a clear advantage over Portland cement or an unproven issue*. Construction and Building Materials, Vol. 30, pp.400-405.
- [6] Pacheco-Torgal, F. (2012). *Betões Geopoliméricos: Um material com elevadas potencialidades para o reaproveitamento de agregados reciclados*. Revista Maquinaria Angola, Nº 223, p.56-62.
- [7] Pinto, A.T. (2002), *Novos Sistemas Ligantes Obtidos por Ativação Alcalina (Geopolímerização)*, Construção Magazine nº 3, ISSN 1645-1767, pp 16-22
- [8] Dias, N. (2012) *Geopolímeros: Contributos para a redução das eflorescências*. Estado da Arte. Universidade do Minho, Guimarães.
- [9] Pacheco-Torgal, F., Jalali, S. (2008). *Considerações acerca da pré-fabricação com betões à base de ligantes Geopoliméricos*. Congresso nacional da pré-fabricação em Betão, Lisboa.
- [10] Pacheco-Torgal, F., Jalali, S. (2010). *Ligantes obtidos por ativação alcalina. Parte 1 - Durabilidade*. Revista engenharia civil, Universidade do Minho, Departamento de Engenharia civil, pp. 53-62

- [11] Davidovits, J., Comrie, D.; Paterson, J., Ritcey, D., *Geopolymeric concretes for environmental protection*. ACI Concrete International Vol.12, pp. 30-40 (1990).
- [12] Bortnovsky, O., Dvorakova, K., Roubicek, P., Bousek, J., Prudkova, Z., Baxa, P. *Development, properties and production of geopolymers based on secondary raw materials*. Alkali Activated Materials - Research, Production and Utilization 3rd Conference, 83-96, ISBN 978-80-867-42-19-9. Edited by Agentura Action, Praga, República Checa (2007).
- [13] Krivenko, P., Guziy, S., *Fire resistant alkaline portland cements*. Alkali Activated Materials - Research, Production and Utilization 3rd Conference, 333-347, ISBN 978-80-867-42-19-9. Edited by Agentura Action, Praga, República Checa (2007).
- [14] Perná, I., Hanzlicek, T., Straka, P., Steinerova, M., *Utilization of fluidized bed ashes in thermal resistance applications*. Alkali Activated Materials - Research, Production and Utilization 3rd Conference, 527-537, ISBN 978-80-867-42-19-9. Edited by Agentura Action, Praga, República Checa (2007).
- [15] Dolezal, J., Skvara, F., Svoboda, P., Sulc, R., Kopecky, L., Pavlasova, S., Myskova, L., Lucuk, M., Dvoracek, K., *Concrete based on fly ash geopolymers*. Alkali Activated Materials - Research, Production and Utilization 3rd Conference, 185-197, ISBN 978-80-867-42-19-9. Edited by Agentura Action, Praga, República Checa (2007).
- [16] Torgal, F. P., Castro Gomes, J. P., Jalali, S., *Alkali-activated tungsten mine waste mud binder versus opc concrete*. Acid and abrasion resistance. Alkali activated materials-research, production and utilization 3rd Conference, 693-700, ISBN 978-80-867-42-19-9. Edited by Agentura Action, Praga, República Checa (2007).
- [17] Davidovits, J., *Geopolymers: Inorganic polymeric new materials*. Journal of Thermal Analysis Vol.37, 1633-1656 (1991).
- [18] Li, K., Huang, G., Jiang, L., Cai, Y., Chen, J., Ding, J., *Study on abilities of mineral mixtures and geopolymer to restrain ASR*. Key Engineering Materials Vol.302, 248-254 (2006).

- [19] Fernandez-Jimenez, A., Palomo, A., *Chemical durability of geopolymers*. In *Geopolymers, Structure, Processing, Properties and Applications*, ISBN -13: 978 1 84569 449 4, Ed. J. Provis & J. Van Deventer, Woodhead Publishing Limited Abington Hall, Cambridge, UK, 165-193 (2009).
- [20] Abdollahnejad, Z., Hlavacek, P., Torgal, F.P., Barroso Aguiar, J., (2012). Preliminary experimental investigation on *One-part geopolymer mixes*. Congresso Construção 2012
- [21] Proença, A., *A influencia do Metacaulino no control da reacção alcali-silica*. 1^{as} Jornadas de Materiais de Construção, pp. 45-62.
- [22] Zheng, D.; Van Deventer, J.S.L.; Duxson, P. (2007) The dry mix cement composition, methods and systems involving same. International Patent WO 2007/109862 A1.
- [23] Ferreira, R., Jalali, S. (2002), *Betão autocompactável - Influência dos superplastificantes (carboxilatos modificados) na fluidez e deformabilidade das pastas ligantes*, pp. 29-44.

ANEXOS

Anexo 1 – Resistência à Compressão

Mistura	Tempo de Cura (d)	Força de Compressão (N)	Tensão de Compressão (Mpa)	Média	Diferença (média-provete)	Desvio Padrão (N)	Coefficiente de Variação (%)
REF_100%CEM	14	154900	61,96	70,12	8,16	7,45	10,63%
		179600	71,84		-1,72		
		191400	76,56		-6,44		
REF_70%CEM_30%CV	28	200700	80,28	79,84	-0,44	3,92	4,91%
		189300	75,72		4,12		
		208800	83,52		-3,68		
REF_70%CEM_30%CV	14	122500	49,00	52,08	3,08	3,71	7,13%
		127600	51,04		1,04		
		140500	56,20		-4,12		
GEOP_30%CEM_58,3%CV_7,7%CaOH_4%Mk	28	154500	61,80	63,66	1,86	1,86	2,92%
		159150	63,66		0,00		
		163800	65,52		-1,86		
GEOP_30%CEM_58,3%CV_7,7%CaOH_4%Mk	14	66600	26,64	28,54	1,90	1,90	6,66%
		71350	28,54		0,00		
		76100	30,44		-1,90		
GEOP_26%CEM_58,3%CV_7,7%CaOH_8%Mk	28	98800	39,52	38,81	-0,71	0,77	1,97%
		95000	38,00		0,81		
		97300	38,92		-0,11		
GEOP_26%CEM_58,3%CV_7,7%CaOH_8%Mk	14	31300	12,52	11,68	-0,84	1,19	10,18%
		25800	10,32		1,36		
		30500	12,20		-0,52		
GEOP_18%CEM_58,3%CV_7,7%CaOH_16%Mk	28	44290	17,72	17,52	-0,20	0,22	1,26%
		43200	17,28		0,24		
		43900	17,56		-0,04		
GEOP_18%CEM_58,3%CV_7,7%CaOH_16%Mk	14	41210	16,48	16,79	0,31	0,31	1,83%
		41980	16,79		0,00		
		42750	17,10		-0,31		
GEOP_18%CEM_58,3%CV_7,7%CaOH_16%Mk	28	49660	19,86	19,86	0,00	2,70	13,59%
		56410	22,56		-2,70		
		42910	17,16		2,70		

Anexo 2 – Absorção de água por capilaridade REF_100%CEM

REF_100%CEM									
Data/Hora	Dias	min	√h	Amostra	Peso da Amostra (g)	Massa Absorvida Por Provete (g)	Média da Massa Absorvida (g)	g/mm ²	Média (kg/m ²)
12/6/12 10:30	0,00	0,00	0,00	A	2025,00	0,00	-	0,00E+00	0,0000E+00
				B	2022,30	0,00		0,00E+00	
				C	2025,60	0,00		0,00E+00	
12/6/12 10:35	0,00	5,00	0,29	A	2029,00	4,00	3,43	4,00E-04	3,4333E-01
				B	2025,10	2,80		2,80E-04	
				C	2029,10	3,50		3,50E-04	
12/6/12 10:40	0,01	10,00	0,41	A	2029,80	4,80	3,80	4,80E-04	3,8000E-01
				B	2025,20	2,90		2,90E-04	
				C	2029,30	3,70		3,70E-04	
12/6/12 10:50	0,01	20,00	0,58	A	2031,40	6,40	4,73	6,40E-04	4,7333E-01
				B	2025,80	3,50		3,50E-04	
				C	2029,90	4,30		4,30E-04	
12/6/12 11:00	0,02	30,00	0,71	A	2032,20	7,20	5,23	7,20E-04	5,2333E-01
				B	2026,10	3,80		3,80E-04	
				C	2030,30	4,70		4,70E-04	
12/6/12 11:30	0,04	60,00	1,00	A	2035,00	10,00	7,60	1,00E-03	7,6000E-01
				B	2028,10	5,80		5,80E-04	
				C	2032,60	7,00		7,00E-04	
12/6/12 12:00	0,06	90,00	1,22	A	2037,20	12,20	9,30	1,22E-03	9,3000E-01
				B	2029,40	7,10		7,10E-04	
				C	2034,20	8,60		8,60E-04	
12/6/12 12:30	0,08	120,00	1,41	A	2038,90	13,90	10,70	1,39E-03	1,0700E+00
				B	2030,70	8,40		8,40E-04	
				C	2035,40	9,80		9,80E-04	
12/6/12 13:50	0,14	200,00	1,83	A	2042,60	17,60	13,37	1,76E-03	1,3367E+00
				B	2032,40	10,10		1,01E-03	
				C	2038,00	12,40		1,24E-03	
12/6/12 14:30	0,17	240,00	2,00	A	2044,80	19,80	15,17	1,98E-03	1,5167E+00
				B	2033,90	11,60		1,16E-03	
				C	2039,70	14,10		1,41E-03	
12/6/12 15:30	0,21	300,00	2,24	A	2048,50	23,50	18,10	2,35E-03	1,8100E+00
				B	2036,20	13,90		1,39E-03	
				C	2042,50	16,90		1,69E-03	
12/6/12 16:30	0,25	360,00	2,45	A	2051,10	26,10	20,27	2,61E-03	2,0267E+00
				B	2037,80	15,50		1,55E-03	
				C	2044,80	19,20		1,92E-03	

12/6/12 17:30	0,29	420,00	2,65	A	2053,30	28,30	22,30	2,83E-03	2,2300E+00
				B	2039,30	17,00		1,70E-03	
				C	2047,20	21,60		2,16E-03	
12/6/12 18:30	0,33	480,00	2,83	A	2055,80	30,80	24,50	3,08E-03	2,4500E+00
				B	2041,10	18,80		1,88E-03	
				C	2049,50	23,90		2,39E-03	
13/6/12 10:30	1,00	1440,00	4,90	A	2070,30	45,30	36,53	4,53E-03	3,6533E+00
				B	2050,70	28,40		2,84E-03	
				C	2061,50	35,90		3,59E-03	
13/6/12 12:30	1,08	1560,00	5,10	A	2071,30	46,30	37,20	4,63E-03	3,7200E+00
				B	2051,20	28,90		2,89E-03	
				C	2062,00	36,40		3,64E-03	
13/6/12 14:30	1,17	1680,00	5,29	A	2072,30	47,30	38,07	4,73E-03	3,8067E+00
				B	2052,00	29,70		2,97E-03	
				C	2062,80	37,20		3,72E-03	
13/6/12 16:30	1,25	1800,00	5,48	A	2072,80	47,80	38,57	4,78E-03	3,8567E+00
				B	2052,40	30,10		3,01E-03	
				C	2063,40	37,80		3,78E-03	
14/6/12 10:30	2,00	2880,00	6,93	A	2078,00	53,00	43,30	5,30E-03	4,3300E+00
				B	2056,70	34,40		3,44E-03	
				C	2068,10	42,50		4,25E-03	
14/6/12 12:30	2,08	3000,00	7,07	A	2077,90	52,90	43,10	5,29E-03	4,3100E+00
				B	2056,40	34,10		3,41E-03	
				C	2067,90	42,30		4,23E-03	
14/6/12 14:30	2,17	3120,00	7,21	A	2079,10	54,10	44,20	5,41E-03	4,4200E+00
				B	2057,40	35,10		3,51E-03	
				C	2069,00	43,40		4,34E-03	
14/6/12 16:30	2,25	3240,00	7,35	A	2079,30	54,30	44,40	5,43E-03	4,4400E+00
				B	2057,60	35,30		3,53E-03	
				C	2069,20	43,60		4,36E-03	
17/6/12 10:30	5,00	7200,00	10,95	A	2087,40	62,40	52,53	6,24E-03	5,2533E+00
				B	2065,70	43,40		4,34E-03	
				C	2077,40	51,80		5,18E-03	

Anexo 3 – Absorção de água por capilaridade REF_70%CEM_30%CV

REF_70%CEM_30%CV									
Data/Hora	Dias	min	\sqrt{h}	Amostra	Peso da Amostra (g)	Massa Absovida Por Provete (g)	Média da Massa Absovida (g)	g/mm^2	Média (kg/m ²)
12/6/12 10:30	0,00	0,00	0,00	A	2000,60	0,00		0,00E+00	0,0000E+00
				B	1952,50	0,00	-	0,00E+00	
				C	1982,90	0,00		0,00E+00	
12/6/12 10:35	0,00	5,00	0,29	A	2006,60	6,00		6,00E-04	5,9000E-01
				B	1958,90	6,40	5,90	6,40E-04	
				C	1988,20	5,30		5,30E-04	
12/6/12 10:40	0,01	10,00	0,41	A	2008,10	7,50		7,50E-04	7,3000E-01
				B	1960,50	8,00	7,30	8,00E-04	
				C	1989,30	6,40		6,40E-04	
12/6/12 10:50	0,01	20,00	0,58	A	2009,50	8,90		8,90E-04	8,4667E-01
				B	1961,80	9,30	8,47	9,30E-04	
				C	1990,10	7,20		7,20E-04	
12/6/12 11:00	0,02	30,00	0,71	A	2010,70	10,10		1,01E-03	9,7333E-01
				B	1963,20	10,70	9,73	1,07E-03	
				C	1991,30	8,40		8,40E-04	
12/6/12 11:30	0,04	60,00	1,00	A	2015,20	14,60		1,46E-03	1,3800E+00
				B	1967,40	14,90	13,80	1,49E-03	
				C	1994,80	11,90		1,19E-03	
12/6/12 12:00	0,06	90,00	1,22	A	2017,80	17,20		1,72E-03	1,6400E+00
				B	1970,30	17,80	16,40	1,78E-03	
				C	1997,10	14,20		1,42E-03	
12/6/12 12:30	0,08	120,00	1,41	A	2020,00	19,40		1,94E-03	1,8433E+00
				B	1972,50	20,00	18,43	2,00E-03	
				C	1998,80	15,90		1,59E-03	
12/6/12 13:50	0,14	200,00	1,83	A	2023,90	23,30		2,33E-03	2,1933E+00
				B	1976,30	23,80	21,93	2,38E-03	
				C	2001,60	18,70		1,87E-03	
12/6/12 14:30	0,17	240,00	2,00	A	2026,00	25,40		2,54E-03	2,3800E+00
				B	1978,20	25,70	23,80	2,57E-03	
				C	2003,20	20,30		2,03E-03	
12/6/12 15:30	0,21	300,00	2,24	A	2029,20	28,60		2,86E-03	2,6633E+00
				B	1981,30	28,80	26,63	2,88E-03	
				C	2005,40	22,50		2,25E-03	
12/6/12 16:30	0,25	360,00	2,45	A	2031,40	30,80		3,08E-03	2,8667E+00
				B	1983,50	31,00	28,67	3,10E-03	
				C	2007,10	24,20		2,42E-03	

12/6/12 17:30	0,29	420,00	2,65	A	2033,00	32,40	30,13	3,24E-03	3,0133E+00
				B	1985,20	32,70		3,27E-03	
				C	2008,20	25,30		2,53E-03	
12/6/12 18:30	0,33	480,00	2,83	A	2035,20	34,60	32,37	3,46E-03	3,2367E+00
				B	1987,60	35,10		3,51E-03	
				C	2010,30	27,40		2,74E-03	
13/6/12 10:30	1,00	1440,00	4,90	A	2050,20	49,60	46,70	4,96E-03	4,6700E+00
				B	2003,20	50,70		5,07E-03	
				C	2022,70	39,80		3,98E-03	
13/6/12 12:30	1,08	1560,00	5,10	A	2051,20	50,60	47,70	5,06E-03	4,7700E+00
				B	2004,40	51,90		5,19E-03	
				C	2023,50	40,60		4,06E-03	
13/6/12 14:30	1,17	1680,00	5,29	A	2052,30	51,70	48,80	5,17E-03	4,8800E+00
				B	2005,60	53,10		5,31E-03	
				C	2024,50	41,60		4,16E-03	
13/6/12 16:30	1,25	1800,00	5,48	A	2053,30	52,70	49,90	5,27E-03	4,9900E+00
				B	2006,90	54,40		5,44E-03	
				C	2025,50	42,60		4,26E-03	
14/6/12 10:30	2,00	2880,00	6,93	A	2060,50	59,90	56,97	5,99E-03	5,6967E+00
				B	2015,00	62,50		6,25E-03	
				C	2031,40	48,50		4,85E-03	
14/6/12 12:30	2,08	3000,00	7,07	A	2060,90	60,30	57,33	6,03E-03	5,7333E+00
				B	2015,50	63,00		6,30E-03	
				C	2031,60	48,70		4,87E-03	
14/6/12 14:30	2,17	3120,00	7,21	A	2062,00	61,40	58,40	6,14E-03	5,8400E+00
				B	2016,60	64,10		6,41E-03	
				C	2032,60	49,70		4,97E-03	
14/6/12 16:30	2,25	3240,00	7,35	A	2062,20	61,60	58,60	6,16E-03	5,8600E+00
				B	2016,80	64,30		6,43E-03	
				C	2032,80	49,90		4,99E-03	
17/6/12 10:30	5,00	7200,00	10,95	A	2073,10	72,50	68,90	7,25E-03	6,8900E+00
				B	2028,20	75,70		7,57E-03	
				C	2041,40	58,50		5,85E-03	

**Anexo 4 – Absorção de água por capilaridade
GEOP_30%CEM_58,3%CV_7,7%CaOH_4%Mk**

GEOP_30%CEM_58,3%CV_7,7%CaOH_4%Mk

Data/Hora	Dias	min	\sqrt{h}	Amostra	Peso da Amostra (g)	Massa Absorvida Por Provete (g)	Média da Massa Absorvida (g)	g/mm ²	Média (kg/m ²)
12/6/12 10:30	0,00	0,00	0,00	A	1877,60	0,00		0,00E+00	
				B	1885,80	0,00	-	0,00E+00	0,0000E+00
				C	1865,90	0,00		0,00E+00	
12/6/12 10:35	0,00	5,00	0,29	A	1886,60	9,00		9,00E-04	
				B	1893,50	7,70	8,50	7,70E-04	8,5000E-01
				C	1874,70	8,80		8,80E-04	
12/6/12 10:40	0,01	10,00	0,41	A	1888,40	10,80		1,08E-03	
				B	1895,10	9,30	9,97	9,30E-04	9,9667E-01
				C	1875,70	9,80		9,80E-04	
12/6/12 10:50	0,01	20,00	0,58	A	1889,80	12,20		1,22E-03	
				B	1896,10	10,30	11,20	1,03E-03	1,1200E+00
				C	1877,00	11,10		1,11E-03	
12/6/12 11:00	0,02	30,00	0,71	A	1891,50	13,90		1,39E-03	
				B	1897,40	11,60	12,60	1,16E-03	1,2600E+00
				C	1878,20	12,30		1,23E-03	
12/6/12 11:30	0,04	60,00	1,00	A	1895,50	17,90		1,79E-03	
				B	1900,90	15,10	16,27	1,51E-03	1,6267E+00
				C	1881,70	15,80		1,58E-03	
12/6/12 12:00	0,06	90,00	1,22	A	1898,30	20,70		2,07E-03	
				B	1903,40	17,60	18,83	1,76E-03	1,8833E+00
				C	1884,10	18,20		1,82E-03	
12/6/12 12:30	0,08	120,00	1,41	A	1900,40	22,80		2,28E-03	
				B	1905,20	19,40	20,70	1,94E-03	2,0700E+00
				C	1885,80	19,90		1,99E-03	
12/6/12 13:50	0,14	200,00	1,83	A	1904,10	26,50		2,65E-03	
				B	1909,00	23,20	24,47	2,32E-03	2,4467E+00
				C	1889,60	23,70		2,37E-03	
12/6/12 14:30	0,17	240,00	2,00	A	1906,30	28,70		2,87E-03	
				B	1910,00	24,20	26,23	2,42E-03	2,6233E+00
				C	1891,70	25,80		2,58E-03	
12/6/12 15:30	0,21	300,00	2,24	A	1909,70	32,10		3,21E-03	
				B	1914,40	28,60	29,83	2,86E-03	2,9833E+00
				C	1894,70	28,80		2,88E-03	

				A	1912,10	34,50		3,45E-03	
12/6/12 16:30	0,25	360,00	2,45	B	1916,60	30,80	32,17	3,08E-03	3,2167E+00
				C	1897,10	31,20		3,12E-03	
				A	1914,50	36,90		3,69E-03	
12/6/12 17:30	0,29	420,00	2,65	B	1919,10	33,30	34,53	3,33E-03	3,4533E+00
				C	1899,30	33,40		3,34E-03	
				A	1916,70	39,10		3,91E-03	
12/6/12 18:30	0,33	480,00	2,83	B	1921,90	36,10	37,03	3,61E-03	3,7033E+00
				C	1901,80	35,90		3,59E-03	
				A	1935,30	57,70		5,77E-03	
13/6/12 10:30	1,00	1440,00	4,90	B	1942,60	56,80	56,30	5,68E-03	5,6300E+00
				C	1920,30	54,40		5,44E-03	
				A	1936,70	59,10		5,91E-03	
13/6/12 12:30	1,08	1560,00	5,10	B	1944,10	58,30	57,70	5,83E-03	5,7700E+00
				C	1921,60	55,70		5,57E-03	
				A	1938,20	60,60		6,06E-03	
13/6/12 14:30	1,17	1680,00	5,29	B	1946,00	60,20	58,83	6,02E-03	5,8833E+00
				C	1921,60	55,70		5,57E-03	
				A	1939,50	61,90		6,19E-03	
13/6/12 16:30	1,25	1800,00	5,48	B	1947,20	61,40	60,60	6,14E-03	6,0600E+00
				C	1924,40	58,50		5,85E-03	
				A	1950,60	73,00		7,30E-03	
14/6/12 10:30	2,00	2880,00	6,93	B	1958,40	72,60	71,27	7,26E-03	7,1267E+00
				C	1934,10	68,20		6,82E-03	
				A	1950,90	73,30		7,33E-03	
14/6/12 12:30	2,08	3000,00	7,07	B	1959,00	73,20	71,73	7,32E-03	7,1733E+00
				C	1934,60	68,70		6,87E-03	
				A	1952,50	74,90		7,49E-03	
14/6/12 14:30	2,17	3120,00	7,21	B	1960,70	74,90	73,23	7,49E-03	7,3233E+00
				C	1935,80	69,90		6,99E-03	
				A	1953,30	75,70		7,57E-03	
14/6/12 16:30	2,25	3240,00	7,35	B	1961,50	75,70	74,00	7,57E-03	7,4000E+00
				C	1936,50	70,60		7,06E-03	
				A	1976,00	98,40		9,84E-03	
17/6/12 10:30	5,00	7200,00	10,95	B	1985,20	99,40	95,87	9,94E-03	9,5867E+00
				C	1955,70	89,80		8,98E-03	

**Anexo 5 – Absorção de água por capilaridade
GEOP_26%CEM_58,3%CV_7,7%CaOH_8%Mk**

GEOP_26%CEM_58,3%CV_7,7%CaOH_8%Mk

Data/Hora	Dias	min	√h	Amostra	Peso da Amostra (g)	Massa Absorvida Por Provete (g)	Média da Massa Absorvida (g)	g/mm ²	Média (kg/m ²)
12/6/12 10:30	0,00	0,00	0,00	A	1780,70	0,00	-	0,00E+00	0,0000E+00
				B	1799,10	0,00	-	0,00E+00	
				C	1811,30	0,00	-	0,00E+00	
12/6/12 10:35	0,00	5,00	0,29	A	1790,00	9,30	12,53	9,30E-04	1,2533E+00
				B	1814,90	15,80	12,53	1,58E-03	
				C	1823,80	12,50	12,53	1,25E-03	
12/6/12 10:40	0,01	10,00	0,41	A	1791,40	10,70	14,97	1,07E-03	1,4967E+00
				B	1818,50	19,40	14,97	1,94E-03	
				C	1826,10	14,80	14,97	1,48E-03	
12/6/12 10:50	0,01	20,00	0,58	A	1792,40	11,70	16,87	1,17E-03	1,6867E+00
				B	1821,20	22,10	16,87	2,21E-03	
				C	1828,10	16,80	16,87	1,68E-03	
12/6/12 11:00	0,02	30,00	0,71	A	1793,90	13,20	19,37	1,32E-03	1,9367E+00
				B	1824,90	25,80	19,37	2,58E-03	
				C	1830,40	19,10	19,37	1,91E-03	
12/6/12 11:30	0,04	60,00	1,00	A	1798,40	17,70	26,13	1,77E-03	2,6133E+00
				B	1834,00	34,90	26,13	3,49E-03	
				C	1837,10	25,80	26,13	2,58E-03	
12/6/12 12:00	0,06	90,00	1,22	A	1801,90	21,20	31,10	2,12E-03	3,1100E+00
				B	1840,60	41,50	31,10	4,15E-03	
				C	1841,90	30,60	31,10	3,06E-03	
12/6/12 12:30	0,08	120,00	1,41	A	1804,40	23,70	34,90	2,37E-03	3,4900E+00
				B	1845,60	46,50	34,90	4,65E-03	
				C	1845,80	34,50	34,90	3,45E-03	
12/6/12 13:50	0,14	200,00	1,83	A	1810,90	30,20	43,10	3,02E-03	4,3100E+00
				B	1855,90	56,80	43,10	5,68E-03	
				C	1853,60	42,30	43,10	4,23E-03	
12/6/12 14:30	0,17	240,00	2,00	A	1814,50	33,80	47,50	3,38E-03	4,7500E+00
				B	1861,30	62,20	47,50	6,22E-03	
				C	1857,80	46,50	47,50	4,65E-03	
12/6/12 15:30	0,21	300,00	2,24	A	1820,30	39,60	54,10	3,96E-03	5,4100E+00
				B	1869,50	70,40	54,10	7,04E-03	
				C	1863,60	52,30	54,10	5,23E-03	

12/6/12 16:30	0,25	360,00	2,45	A	1824,90	44,20		4,42E-03	
				B	1875,90	76,80	59,33	7,68E-03	5,9333E+00
				C	1868,30	57,00		5,70E-03	
12/6/12 17:30	0,29	420,00	2,65	A	1829,30	48,60		4,86E-03	
				B	1881,70	82,60	64,07	8,26E-03	6,4067E+00
				C	1872,30	61,00		6,10E-03	
12/6/12 18:30	0,33	480,00	2,83	A	1834,70	54,00		5,40E-03	
				B	1888,40	89,30	69,87	8,93E-03	6,9867E+00
				C	1877,60	66,30		6,63E-03	
13/6/12 10:30	1,00	1440,00	4,90	A	1880,70	100,00		1,00E-02	
				B	1944,00	144,90	118,43	1,45E-02	1,1843E+01
				C	1921,70	110,40		1,10E-02	
13/6/12 12:30	1,08	1560,00	5,10	A	1884,70	104,00		1,04E-02	
				B	1948,80	149,70	121,43	1,50E-02	1,2143E+01
				C	1921,90	110,60		1,11E-02	
13/6/12 14:30	1,17	1680,00	5,29	A	1888,80	108,10		1,08E-02	
				B	1953,60	154,50	127,07	1,55E-02	1,2707E+01
				C	1929,90	118,60		1,19E-02	
13/6/12 16:30	1,25	1800,00	5,48	A	1892,40	111,70		1,12E-02	
				B	1957,80	158,70	130,93	1,59E-02	1,3093E+01
				C	1933,70	122,40		1,22E-02	
14/6/12 10:30	2,00	2880,00	6,93	A	1922,60	141,90		1,42E-02	
				B	1993,60	194,50	163,43	1,95E-02	1,6343E+01
				C	1965,20	153,90		1,54E-02	
14/6/12 12:30	2,08	3000,00	7,07	A	1924,90	144,20		1,44E-02	
				B	1996,70	197,60	166,07	1,98E-02	1,6607E+01
				C	1967,70	156,40		1,56E-02	
14/6/12 14:30	2,17	3120,00	7,21	A	1928,60	147,90		1,48E-02	
				B	2000,70	201,60	169,93	2,02E-02	1,6993E+01
				C	1971,60	160,30		1,60E-02	
14/6/12 16:30	2,25	3240,00	7,35	A	1930,80	150,10		1,50E-02	
				B	2003,30	204,20	172,30	2,04E-02	1,7230E+01
				C	1973,90	162,60		1,63E-02	
17/6/12 10:30	5,00	7200,00	10,95	A	2011,30	230,60		2,31E-02	
				B	2055,20	256,10	237,70	2,56E-02	2,3770E+01
				C	2037,70	226,40		2,26E-02	

**Anexo 6 – Absorção de água por capilaridade
GEOP_18%CEM_58,3%CV_7,7%CaOH_16%Mk**

GEOP_18%CEM_58,3%CV_7,7%CaOH_16%Mk

Data/Hora	Dias	min	√h	Amostra	Peso da Amostra (g)	Massa Absorvida Por Provete (g)	Média da Massa Absorvida (g)	g/mm ²	Média (kg/m ²)
10/7/13 11:00	0,00	0,00	0,00	A	1879,00	0,00		0,00E+00	
				B	1860,80	0,00	-	0,00E+00	0,0000E+00
				C	1845,70	0,00		0,00E+00	
10/7/13 11:05	0,00	5,00	0,29	A	1892,00	13,00		1,30E-03	
				B	1874,20	13,40	13,63	1,34E-03	1,3633E+00
				C	1860,20	14,50		1,45E-03	
10/7/13 11:10	0,01	10,00	0,41	A	1895,80	16,80		1,68E-03	
				B	1877,90	17,10	17,40	1,71E-03	1,7400E+00
				C	1864,00	18,30		1,83E-03	
10/7/13 11:20	0,01	20,00	0,58	A	1897,50	18,50		1,85E-03	
				B	1879,20	18,40	18,93	1,84E-03	1,8933E+00
				C	1865,60	19,90		1,99E-03	
10/7/13 11:30	0,02	30,00	0,71	A	1898,20	19,20		1,92E-03	
				B	1879,90	19,10	19,57	1,91E-03	1,9567E+00
				C	1866,10	20,40		2,04E-03	
10/7/13 12:00	0,04	60,00	1,00	A	1903,20	24,20		2,42E-03	
				B	1884,30	23,50	24,10	2,35E-03	2,4100E+00
				C	1870,30	24,60		2,46E-03	
10/7/13 12:30	0,06	90,00	1,22	A	1904,80	25,80		2,58E-03	
				B	1885,50	24,70	25,47	2,47E-03	2,5467E+00
				C	1871,60	25,90		2,59E-03	
10/7/13 13:00	0,08	120,00	1,41	A	1905,60	26,60		2,66E-03	
				B	1886,40	25,60	26,30	2,56E-03	2,6300E+00
				C	1872,40	26,70		2,67E-03	
10/7/13 14:30	0,15	210,00	1,87	A	1911,10	32,10		3,21E-03	
				B	1891,60	30,80	31,50	3,08E-03	3,1500E+00
				C	1877,30	31,60		3,16E-03	
10/7/13 15:30	0,19	270,00	2,12	A	1913,70	34,70		3,47E-03	
				B	1894,60	33,80	34,17	3,38E-03	3,4167E+00
				C	1879,70	34,00		3,40E-03	
10/7/13 16:30	0,23	330,00	2,35	A	1915,50	36,50		3,65E-03	
				B	1896,50	35,70	36,00	3,57E-03	3,6000E+00
				C	1881,50	35,80		3,58E-03	

10/7/13 17:30	0,27	390,00	2,55	A	1917,20	38,20		3,82E-03	
				B	1898,70	37,90	37,90	3,79E-03	3,7900E+00
				C	1883,30	37,60		3,76E-03	
10/7/13 18:30	0,31	450,00	2,74	A	1919,00	40,00		4,00E-03	
				B	1900,40	39,60	39,67	3,96E-03	3,9667E+00
				C	1885,10	39,40		3,94E-03	
10/7/13 19:30	0,35	510,00	2,92	A	1920,30	41,30		4,13E-03	
				B	1901,70	40,90	40,93	4,09E-03	4,0933E+00
				C	1886,30	40,60		4,06E-03	
11/7/13 10:15	0,97	1395,00	4,82	A	1936,60	57,60		5,76E-03	
				B	1918,10	57,30	57,60	5,73E-03	5,7600E+00
				C	1903,60	57,90		5,79E-03	
11/7/13 12:15	1,05	1515,00	5,02	A	1938,80	59,80		5,98E-03	
				B	1920,20	59,40	59,67	5,94E-03	5,9667E+00
				C	1905,50	59,80		5,98E-03	
11/7/13 14:15	1,14	1635,00	5,22	A	1940,20	61,20		6,12E-03	
				B	1921,60	60,80	61,27	6,08E-03	6,1267E+00
				C	1907,50	61,80		6,18E-03	
11/7/13 16:15	1,22	1755,00	5,41	A	1941,40	62,40		6,24E-03	
				B	1922,80	62,00	62,60	6,20E-03	6,2600E+00
				C	1909,10	63,40		6,34E-03	
12/7/13 10:15	1,97	2835,00	6,87	A	1952,10	73,10		7,31E-03	
				B	1934,30	73,50	74,93	7,35E-03	7,4933E+00
				C	1923,90	78,20		7,82E-03	
12/7/13 12:15	2,05	2955,00	7,02	A	1952,60	73,60		7,36E-03	
				B	1935,00	74,20	75,80	7,42E-03	7,5800E+00
				C	1925,30	79,60		7,96E-03	
12/7/13 15:15	2,18	3135,00	7,23	A	1954,50	75,50		7,55E-03	
				B	1936,80	76,00	77,83	7,60E-03	7,7833E+00
				C	1927,70	82,00		8,20E-03	
12/7/13 16:15	2,22	3195,00	7,30	A	1955,10	76,10		7,61E-03	
				B	1937,30	76,50	78,43	7,65E-03	7,8433E+00
				C	1928,40	82,70		8,27E-03	
12/7/13 17:00	2,25	3240,00	7,35	A	1956,00	77,00		7,70E-03	
				B	1938,30	77,50	79,37	7,75E-03	7,9367E+00
				C	1929,30	83,60		8,36E-03	
15/7/13 11:00	5,00	7200,00	10,95	A	1979,50	100,50		1,01E-02	
				B	1959,40	98,60	101,50	9,86E-03	1,0150E+01
				C	1951,10	105,40		1,05E-02	

Anexo 7 – Absorção de água por imersão

Absorção de Água por Imersão									
Misturas	Provete	Dimensões (mm)	M ₁ (g)	M ₂ (g)	M ₃ (g)	Absorção (%)	Média (%)	Desv.Pad. (%)	Coefficiente de Variação (%)
REF_100%CEM	A		2069,90	1213,00	2228,10	15,58			
	B		2046,00	1197,30	2202,90	15,60	15,53	0,11	0,72%
	C		2058,60	1204,40	2214,10	15,40			
REF_70%CEM_30%CV	A		2018,10	1131,70	2149,40	12,90			
	B		2012,80	1129,30	2143,70	12,90	12,93	0,04	0,32%
	C		2040,80	1145,30	2174,30	12,97			
GEOP_30%CEM_58,3%CV_7,7%CaOH_4%Mk	A		1941,10	1050,10	2071,10	12,73			
	B	100x100x100	1919,30	1041,30	2048,10	12,79	12,90	0,23	1,80%
	C		1902,10	1032,50	2033,90	13,16			
GEOP_26%CEM_58,3%CV_7,7%CaOH_8%Mk	A		1866,30	1033,60	2020,60	15,63			
	B		1855,80	1020,60	2007,60	15,38	15,54	0,14	0,88%
	C		1849,20	1019,10	2002,60	15,60			
GEOP_18%CEM_58,3%CV_7,7%CaOH_16%Mk	A		1809,90	994,40	1988,10	17,93			
	B		1795,40	986,30	1968,90	17,66	17,77	0,15	0,82%
	C		1800,60	989,10	1975,30	17,71			

Anexo 8 – Resistência ao ataque químico REF_100%CEM

Mistura	Tempo de Exposição ao Ácido Sulfúrico (dias)	Dimensões (mm)	Provetes		Massa Real (g)	Perdida Por Provette de Massa	Percentagem de Massa	Percentagem Média	Dif (média-provette)	Desvio Padrão (N)	Percentagem de Perda em Volume (%)
			Identificação	Perdida Por Provette							
0			A	277,10	0,0%			-277,10	0,00%	0%	
			B	277,50	0,0%			-277,50			
			C	274,70	0,0%			-274,70			
1			A	276,80	0,11%			-276,79	0,71%	0,52%	0,7%
			B	274,80	0,97%			-274,79			
			C	271,80	1,06%			-271,79			
3			A	244,10	11,81%			-243,99	10,90%	0,94%	11,5%
			B	244,70	10,95%			-244,59			
			C	244,80	9,93%			-244,69			
7			A	198,10	18,84%			-197,91	18,66%	0,45%	28,0%
			B	200,30	18,14%			-200,11			
			C	198,30	19,00%			-198,11			
14			A	127,90	35,44%			-127,54	36,01%	2,50%	54,0%
			B	122,70	38,74%			-122,34			
			C	131,20	33,84%			-130,84			
28			A	0,00	100,00%			1,00	100,00%	0,00%	100,0%
			B	0,00	100,00%			1,00			
			C	0,00	100,00%			1,00			
REF_100%CEM		50 X 50 X 50									

Anexo 9 – Resistência ao ataque químico REF_70%CEM_30%CV

Mistura	Tempo de Exposição ao Ácido Sulfúrico (dias)	Provetes		Massa Real (g)	Perdida Por Provelte de Massa	Porcentagem Média	Dif (média-provelte)	Desvio Padrão (N)	Porcentagem de Perda em Volume (%)
		Dimensões (mm)	Identificação						
REF_70%CEM_30%CV	0	50 X 50 X 50	A	274,80	0,0%	0,00%	-274,80	0,00%	0%
			B	274,80	0,0%	0,00%	-274,80	0,00%	0%
			C	274,80	0,0%	0,00%	-274,80	0,00%	0%
	1	50 X 50 X 50	A	268,00	2,47%	2,51%	-267,97	0,20%	2,5%
			B	268,40	2,33%	2,51%	-268,37	0,20%	2,5%
			C	267,30	2,73%	2,51%	-267,27	0,20%	2,5%
	3	50 X 50 X 50	A	231,50	13,62%	13,18%	-231,37	0,50%	15,4%
			B	234,50	12,63%	13,18%	-234,37	0,50%	15,4%
			C	231,80	13,28%	13,18%	-231,67	0,50%	15,4%
7	50 X 50 X 50	A	178,80	22,76%	22,56%	-178,57	0,26%	34,4%	
		B	181,40	22,64%	22,56%	-181,17	0,26%	34,4%	
		C	180,20	22,26%	22,56%	-179,97	0,26%	34,4%	
14	50 X 50 X 50	A	109,00	39,04%	38,62%	-108,61	0,84%	59,8%	
		B	113,10	37,65%	38,62%	-112,71	0,84%	59,8%	
		C	109,60	39,18%	38,62%	-109,21	0,84%	59,8%	
28	50 X 50 X 50	A	0,00	100,00%	100,00%	1,00	0,00%	100,0%	
		B	0,00	100,00%	100,00%	1,00	0,00%	100,0%	
		C	0,00	100,00%	100,00%	1,00	0,00%	100,0%	

Anexo 10 – Resistência ao ataque químico
GEOP_30%CEM_58,3%CV_7,7%CaOH_4%Mk

Mistura	Tempo de Exposição ao Ácido Sulfúrico (dias)	Dimensões (mm)	Provetes		Massa Real (g)	Perdida Por Provette	Porcentagem de Massa	Porcentagem Média	Dif (média-provette)	Desvio Padrão (N)	Perdida em Volume (%)	
			Identificação	Perdida Por Provette								
GEOP_30%CEM_58,3%CV_7,7%CaOH_4%Mk	0		A		265,80	0,0%			-265,80			
			B		262,00	0,0%		0,00%	-262,00	0,00%	0%	
			C		262,00	0,0%			-262,00			
	1		A		266,10	-0,11%			-266,09			
			B		259,60	0,92%		0,51%	-259,59	0,55%	0,5%	
			C		260,10	0,73%			-260,09			
	3		A		220,80	17,02%			-220,62			
			B		198,80	23,42%		17,94%	-198,62	5,08%	18,3%	
			C		225,30	13,38%			-225,12			
7	50 X 50 X 50	A		158,70	28,13%			-158,38				
		B		120,20	39,54%		31,67%	-119,88	6,83%	44,0%		
		C		163,70	27,34%			-163,38				
14		A		62,30	60,74%			-61,64				
		B		44,70	62,81%		65,86%	-44,04	7,15%	81,1%		
		C		42,50	74,04%			-41,84				
28		A		0,00	100,00%			1,00				
		B		0,00	100,00%		100,00%	1,00	0,00%	100,0%		
		C		0,00	100,00%			1,00				

Anexo 11 – Resistência ao ataque químico
GEOP_26%CEM_58,3%CV_7,7%CaOH_8%Mk

Mistura	Tempo de Exposição ao Ácido Sulfúrico (dias)	Provetes			Perda em Volume (%)				
		Dimensões (mm)	Identificação	Massa Real (g)					
				Perda de Massa por Provete	Percentagem Média	Dif (média- provete)	Desvio Padrão (N)		
GEOP_26%CEM_58,3%CV_7,7%CaOH_8%Mk	0		A	254,60	0,0%	-254,60			0%
			B	253,80	0,0%	-253,80	0,00%	0,00%	
			C	255,30	0,0%	-255,30			
	1		A	225,60	11,39%	-225,41			19,4%
			B	189,50	25,33%	-189,31	19,37%	7,19%	
			C	200,70	21,39%	-200,51			
	3	50X50X50	A	129,60	42,55%	-129,13			57,4%
			B	94,50	50,13%	-94,03	47,39%	4,20%	
			C	101,40	49,48%	-100,93			
7		A	23,60	81,79%	-22,75			93,4%	
		B	9,80	89,63%	-8,95	84,85%	4,19%		
		C	17,10	83,14%	-16,25				
14		A	0,00	100,00%	1,00			100,0%	
		B	0,00	100,00%	1,00	100,00%	0,00%		
		C	0,00	100,00%	1,00				

Anexo 12 - Resistência ao ataque químico
GEOP_18%CEM_58,3%CV_7,7%CaOH_16%Mk

Mistura	Tempo de Exposição ao Ácido Sulfúrico (dias)	Provetes		Massa Real (g)	Porcentagem de Massa Perdida Por Provette	Dif (média-provete)	Desvio Padrão (N)	Porcentagem de Perda em Volume (%)
		Dimensões (mm)	Identificação					
GEOP_18%CEM_58,3%CV_7,7%CaOH_16%Mk	0		A	247,60	0,0%	-247,60		
			B	249,70	0,0%	-249,70	0,00%	0%
			C	253,10	0,0%	-253,10		
	1		A	184,80	25,36%	-184,57		
			B	191,20	23,43%	-190,97	22,56%	22,5%
			C	205,30	18,89%	-205,07		
	3	50X50X50	A	52,80	71,43%	-52,15		
			B	86,10	54,97%	-85,45	64,80%	72,7%
			C	65,70	68,00%	-65,05		
7		A	5,30	89,96%	-4,56			
		B	33,80	60,74%	-33,06	74,13%	92,3%	
		C	18,60	71,69%	-17,86			
14		A	0,00	100,00%	1,00			
		B	0,00	100,00%	1,00	100,00%	100,0%	
		C	0,00	100,00%	1,00			