



Universidade do Minho  
Escola de Engenharia

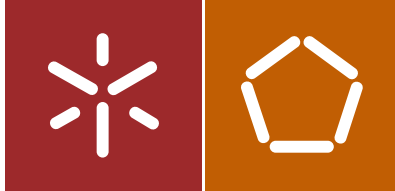
Jorge Alexandre da Silva Ribeiro Mendes

Argamassas geopoliméricas para reparação  
de betões expostos a ataques de ácidos

Jorge Alexandre da Silva Ribeiro Mendes Argamassas geopoliméricas para reparação de betões expostos a ataques de ácidos

UMinho | 2014

Setembro de 2014



Universidade do Minho  
Escola de Engenharia

Jorge Alexandre da Silva Ribeiro Mendes

Argamassas geopoliméricas para reparação  
de betões expostos a ataques de ácidos

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

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

e coorientação do  
Professor Doutor Fernando M. Alves S. Pacheco Torgal

## **Agradecimentos**

Após a realização deste estudo, gostaria de expressar os meus mais sinceros agradecimentos, a todas as pessoas e entidades, que de alguma forma contribuíram para que esta dissertação fosse finalizada mais facilmente.

Ao Professor Doutor José Luis Barroso de Aguiar e ao Doutor Fernando M. Alves S. Pacheco Torgal, agradeço a pronta disponibilidade para cooperar e para auxiliar nos pequenos e grandes percalços encontrados durante a realização deste trabalho, bem como as revisões e correções que tornaram esta dissertação mais enriquecida.

Aos Técnicos do Laboratório de Materiais de Construção de Escola de Engenharia Civil da Universidade do Minho, nomeadamente Fernando Pokee e em especial ao Carlos Jesus, o meu obrigado pelo apoio prestado, pela ajuda e disponibilidade na realização dos trabalhos laboratoriais.

Agradeço aos companheiros de laboratório e colegas de mestrado, pelo companheirismo, ajuda e trocas de impressões, que tornaram mais fácil a execução de todas as tarefas.

O mais profundo obrigado à minha família e amigos, pelo apoio, incentivo, compreensão e carinho demonstrado no decorrer desta dissertação e pelo término de mais esta etapa da minha vida.



## **Resumo**

Os geopolímeros surgem como materiais com potencial, capazes de responder a alguns dos problemas ambientais criados por materiais como o cimento Portland. A necessidade de reparação de infraestruturas construídas com betão de cimento Portland, que devido às funções que desempenham, apresentam problemas de deterioração precoce, está na origem de impactos tanto económicos como ambientais. Abrindo desta forma, uma porta à criação de revestimentos mais duráveis. Os geopolímeros devido às suas características, tornaram-se nesse âmbito um material preferencial.

Neste estudo tenta-se perceber então a aplicabilidade dos geopolímeros enquanto material de revestimento capaz de reabilitar infraestruturas industriais, e tendo como alvo principal a proteção dos ácidos. Procedeu-se numa primeira fase a uma escolha das melhores misturas das argamassas geopoliméricas com cinzas volantes e metacaulino, utilizando para isso ensaios de compressão/flexão, absorção de água por imersão e por capilaridade. E numa segunda fase, procedeu-se ao ensaio químico utilizando para isso três ácidos com diferentes concentrações (10%, 20% e 30%) sobre os revestimentos de argamassas e de tintas, bem como de provetes de betão sem qualquer revestimento.

Verificou-se que os geopolímeros com cinzas volantes apresentaram resultados muito positivos para concentrações em meio ácido menores que 30%, observando-se em média perdas de massa de 1.2%. O material com melhores resultados foi a resina epoxídica com perdas de 0.8%. Em contraposição apresentou-se o betão convencional com perdas de 11.1% e as argamassas geopoliméricas com metacaulino com 41.3% de perda de massa. Tendo em conta o seu desempenho e principalmente os seus custos, as argamassas geopoliméricas à base de cinzas volantes, revelaram ser uma opção com potencial para reparações de infraestruturas em indústrias que envolvem a produção ou a utilização de ácidos. Apesar da resina epoxídica ter apresentado bons resultados na resistência ao ataque em meio ácido, o seu rácio custo/eficiência é quase 70% superior à solução com revestimento de argamassas geopoliméricas à base de cinzas volantes.

## **PALAVRAS CHAVE**

Sustentabilidade, Argamassas geopoliméricas, Betões, Revestimentos, Ataque de ácidos



## **ABSTRACT**

Geopolymers come out as a material fully capable of attending most of the environmental needs arisen by the Portland cement. The need to repair infrastructure constructed using Portland concrete, due to the functions that they perform, lead to problems of premature deterioration witch creates both economic and environmental impacts. This leads to a necessity of coating the support, the geopolymer due to the known properties is a preferred material.

This study attempt to test the viability of geopolymer coating as being able to rehabilitate the industrial infrastructure primarily targeting acid attacks protection. Compression / flexion tests and absorption of water by immersion and capillary action were used to select the best mixes of geopolymer based mortars with fly ash and metakaolin. The second fase was carried out using the chemical test for the three more common acids with diferent concentrations (10%, 20% and 30%) on coatings with mortars and paints and on concrete specimens without any cladding.

It was verified that the geopolymer with fly ash showed very positive results, for acid concentrations lower than 30%, yielding an average mass loss of 1.2%. The material with the best results was the one with the epoxy resin having a 0.8% loss, in contrast to conventional concrete which had losses of 11.1% and geopolymeric mortar with metakaolin that presented a 41.3% of mass loss. Overall cases sulfuric acid caused the greatest losses, on the other hand hydrochloric acid was where the losses were minor. Attending to the performance and mainly to its costs, the geopolymer mortar with fly ash appear to be an option with potencial to industrial infrastructures repair which concern the production or the usage of acids. In spite of showing good results concerning the resistance to acid attack, the epoxi resin based solution ratio (cost/efficiency) is around 70% superior to the concrete pavement coated with fly ash based geopolymer mortar.

## **KEYWORDS**

Sustainability, Geopolymeric mortars, Concrete, Coating, Acid attack





# ÍNDICE

1	Introdução.....	1
1.1	Enquadramento .....	1
1.2	Objetivos e Metodologia.....	2
1.3	Organização da Dissertação.....	2
2	Revisão do estado de arte .....	5
2.1	Infraestruturas Industriais .....	5
2.2	Cimento Portland .....	6
2.2.1	Enquadramento.....	6
2.2.2	Agentes degradadores.....	8
2.2.3	Betão e as suas classes de exposição relacionadas com o ataque químico....	11
2.3	Geopolímeros.....	13
2.3.1	Enquadramento.....	13
2.3.2	Produção e aplicação .....	16
2.3.3	Propriedades .....	20
2.3.4	Geopolímero vs Cimento Portland .....	23
2.4	Reabilitações/Reparações .....	25
3	Materiais e Procedimento Experimental .....	27
3.1	Introdução .....	27
3.2	Materiais .....	27
3.2.1	Agregados.....	29
3.2.2	Ligantes .....	31
3.2.3	Ativadores.....	33
3.2.4	Outros materiais.....	35
3.3	Composição, Mistura e Cura .....	36

3.3.1	Produção.....	38
3.4	Ensaio.....	42
3.4.1	Ensaio de Consistência.....	43
3.4.2	Ensaio de Resistência à Flexão .....	45
3.4.3	Ensaio de Resistência à Compressão .....	46
3.4.4	Ensaio de Absorção por Imersão.....	48
3.4.5	Ensaio de Absorção por Capilaridade .....	49
3.4.6	Ataque Químico .....	51
4	Análise de resultados .....	55
4.1	Trabalhabilidade .....	55
4.1.1	Ensaio de Espalhamento.....	55
4.1.2	Ensaio de Abaixamento.....	57
4.2	Ensaio de Compressão.....	57
4.2.1	Argamassas.....	58
4.2.2	Betões .....	59
4.3	Resistência à flexão .....	60
4.4	Absorção de água por imersão.....	60
4.4.1	Argamassas.....	61
4.4.2	Betões .....	62
4.5	Ensaio de absorção por capilaridade .....	63
4.5.1	Argamassas.....	63
4.5.2	Betões .....	65
4.6	Ataque químico – Ácidos .....	66
4.6.1	Ácido sulfúrico .....	66
4.6.2	Ácido Nítrico.....	70
4.6.3	Ácido clorídrico.....	73
4.6.4	Avaliação do comportamento aos ácidos .....	75

4.7	Considerações económicas .....	77
5	Conclusão .....	83
5.1	Trabalhos futuros .....	85
6	Referências .....	87
7.	Anexos.....	91



## Índice de figuras

### Capítulo 2

Figura 2.1 - Projeção da produção mundial de cimento Portland (Pacheco-Torgal & Jalali, 2011).....	6
Figura 2.2 - Aspectos estruturais e nomenclatura (Pinto, 2004) .....	18
Figura 2.3 - Propriedade dos silicatos alcalinos em relação a sua razão molar adaptado de Leute & Lind, (2012).....	18
Figura 2.4 - Aplicações de geopolímeros em função da razão Si/Al (Pinto, 2004) .....	19
Figura 2.5 - (a) Resistência à flexão, (b) Resistência à compressão e (c) densidade aparente dos geopolímeros em relação a suas concentrações das soluções de NaOH adaptado de (Wang et al., 2005) .....	22
Figura 2.6 - Provetes submersos numa solução de ácido sulfúrico com uma concentração de 10% : (a) e (b) argamassa de cimento Portland; (c) e (d) argamassa geopolimérica (Dias, 2008).....	24

### Capítulo 3

Figura 3.1 – Materiais utilizados na concepção das argamassas geopoliméricas .....	28
Figura 3.2 – Materiais utilizados para a produção dos betões.....	28
Figura 3.3 – Curva granulométrica dos agregados .....	30
Figura 3.4 – Misturadoras normalizadas .....	39
Figura 3.5 – Equipamento vibratório.....	40
Figura 3.6 – Moldagem dos provetes .....	40
Figura 3.7 – Betoneira utilizada .....	41
Figura 3.8 – Adição da água.....	41
Figura 3.9 – Esquema da preparação, moldagem e desmoldagem dos provetes.....	42
Figura 3.10 – Esquema da utilização dos provetes.....	42
Figura 3.11 – Mesa de espalhamento .....	43
Figura 3.12 – Imagem representativa do cone de Abrams .....	44

Figura 3.13 – Procedimento para fazer a medição .....	45
Figura 3.14 – Equipamento usado para o ensaio de flexão .....	45
Figura 3.15 – Equipamento utilizado no ensaio de compressão .....	47
Figura 3.16 – Provetes utilizados no ensaio (lado esquerdo – Argamassas geopoliméricas; lado direito – Betões de cimento Portland) .....	48
Figura 3.17 – Provetes de argamassas geopoliméricas durante o ensaio .....	50
Figura 3.18 – Preparação dos provetes e resultados finais (A – revestimento com argamassa geopolimérica à base de metacaulino, B – revestimento com tinta epoxidica, C – revestimento com argamassa geopolimérica à base de cinzas volantes, D – revestimento com tinta epoxídica, E – BC e F – BED) .....	52
Figura 3.19 – Preparação dos provetes e início do ensaio .....	53

## Capítulo 4

Figura 4.1 – Espalhamento em relação à concentração molar e tipo de ligante .....	55
Figura 4.2 – Abaixamento obtido para cada composição .....	57
Figura 4.3 – Valores obtidos de resistência a compressão aos 28 dias .....	58
Figura 4.4 – Resistência à compressão dos betões .....	59
Figura 4.5 – Valores da resistência à flexão das várias argamassas aos 28 dias .....	60
Figura 4.6 - Resultados obtidos do ensaio de absorção de água por imersão das argamassas geopoliméricas .....	61
Figura 4.7 – Absorção de água por capilaridade para as argamassas geopoliméricas com cinzas volantes (CV – cinzas volantes; M – molaridade) .....	63
Figura 4.8 - Absorção de água por capilaridade para as argamassas geopoliméricas com metacaulino (Mk – metacaulino; M – molaridade) .....	64
Figura 4.9 – Coeficiente de capilaridade das misturas geopoliméricas .....	64
Figura 4.10 – Absorção de água por capilaridade dos provetes de betão .....	65
Figura 4.11 – Coeficiente de capilaridade dos provetes de betão .....	66
Figura 4.12 – Valores obtidos do ataque ácido sulfúrico (30%) .....	67
Figura 4.13 – Proвете de betão revestido com argamassa geopolimérica a base de metacaulino um dia após contacto com o ácido sulfúrico (C=30%) .....	67
Figura 4.14 – Proвете de betão revestido com tinta acrílica após 3 dias de contacto com o ácido sulfúrico (C=30%) .....	68

Figura 4.15 – Valores obtidos do ataque do ácido sulfúrico (20%) .....	68
Figura 4.16 – Valores obtidos do ataque do ácido sulfúrico (10%) .....	69
Figura 4.17 – Valores obtidos do ataque do ácido nítrico (concentração = 30%).....	71
Figura 4.18 – Valores obtidos do ataque do ácido nítrico (concentração = 20%).....	72
Figura 4.19 – Valores obtidos do ataque do ácido nítrico (concentração = 10%).....	72
Figura 4.20 – Valores obtidos do ataque do ácido clorídrico (concentração = 30%).....	74
Figura 4.21 – Valores obtidos do ataque do ácido clorídrico (concentração = 20%).....	74
Figura 4.22 – Valores obtidos do ataque do ácido clorídrico (concentração = 10%).....	75
Figura 4.23 – Custos dos materiais (€/m <sup>2</sup> ) .....	78
Figura 4.24 – Análise custo/eficiência dos provetes ao ataque dos ácidos (C=10%) .....	79
Figura 4.25 – Análise custo/eficiência dos provetes ao ataque dos ácidos (C=20%) .....	79
Figura 4.26 – Análise custo/eficiência dos provetes ao ataque dos ácidos (C=30%) .....	80
Figura 4.27 – Análise custo/eficiência dos provetes ao ataque dos ácidos (C=10% e espessura dos revestimentos com argamassas = 1.5 cm).....	80
Figura 4.28 – Peso dos custos dos constituintes das argamassas geopoliméricas com cinzas volantes (%).....	81
Figura 4.29 – Peso dos custos dos constituintes da argamassa geopolimérica com metacaulino (%).....	82

# Índice de Tabelas

## Capítulo 2

Tabela 2.1 - Factores de degradação e os seus efeitos (Ferreira, 2000).....	8
Tabela 2.2 - Valores limite das classes de exposição para o ataque ácido (NP EN 206-1, 2007).....	11
Tabela 2.3- Alguns acontecimentos importantes acerca dos ligantes obtidos por ativação alcalina e ligantes alcalinos (Abdollahnejad et al., 2012).....	14

## Capítulo 3

Tabela 3.1 – Características dos agregados britados utilizados na produção dos betões....	29
Tabela 3.2 – Distribuição granulométrica da areia, areia britada e da brita.....	30
Tabela 3.3- Características das cinzas volantes .....	31
Tabela 3.4 – Características do Caulino.....	32
Tabela 3.5 – Características Químicas .....	32
Tabela 3.6 – Características Mecânicas .....	32
Tabela 3.7 – Características Físicas .....	33
Tabela 3.8 – Tabela resumo com as concentrações e as razões em relação a Molaridade .	34
Tabela 3.9 – Dados técnicos.....	35
Tabela 3.10 – Dados técnicos.....	36
Tabela 3.11 – Composição das argamassas geopoliméricas com cinzas volantes.....	37
Tabela 3.12 – Composição das argamassas geopoliméricas com metacaulino.....	37
Tabela 3.13 – Composições dos betões.....	38
Tabela 3.14 – Características do instrumento .....	47

## Capítulo 4

Tabela 4.1 – Composições das argamassas geopoliméricas, suas consistências e tempos de endurecimento .....	56
Tabela 4.2 – Composições e valores de abaixamento obtidos .....	57



Tabela 4.3 – Valores da resistência à compressão dos betões com 28 dias .....	59
Tabela 4.4 – Resultados obtidos do ensaio de absorção de água por imersão das argamassas geopoliméricas.....	61
Tabela 4.5 – Valores obtidos do ensaio de absorção de água por imersão para os provetes de betão .....	62
Tabela 4.6 – Quadro resumo dos valores de perda de cada material vs ácido .....	76

## **Capítulo 7 - Anexos**

Tabela 7.1– Provetes ensaiados no ácido sulfúrico (C=30%) .....	91
Tabela 7.2 – Provetes ensaiados no ácido sulfúrico (C=20%) .....	92
Tabela 7.3 – Provetes ensaiados no ácido sulfúrico (C=10%) .....	93
Tabela 7.4 – Provetes ensaiados no ácido nítrico (C=30%) .....	94
Tabela 7.5 – Provetes ensaiados no ácido nítrico (C=20%) .....	95
Tabela 7.6 – Provetes ensaiados no ácido nítrico (C=10%) .....	96
Tabela 7.7 – Provetes ensaiados no ácido clorídrico (C=30%) .....	97
Tabela 7.8 – Provetes ensaiados no ácido clorídrico (C=20%) .....	98
Tabela 7.9 – Provetes ensaiados no ácido clorídrico (C=10%) .....	99



# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Enquadramento

O nosso planeta tem sido esquecido pelo Homem, o que se deve sobretudo a mentalidades pouco esclarecidas e a um desenvolvimento não estruturado. Porém, começa a existir uma abertura nessas mentalidades para os problemas do nosso planeta, um exemplo desses pensamentos é a pesquisa e criação de novos materiais na construção. Sendo este um dos maiores sectores económicos a nível europeu, também é aquele com alguns dos maiores impactos ambientais.

Os materiais ligantes com vista à futura substituição do cimento Portland, têm sido alvo de uma exaustiva investigação, isto deve-se sobretudo ao facto de existir uma elevada quantidade de emissões de dióxido de carbono libertadas, durante o seu processo de fabrico, bem como a quantidade de agentes de degradação existentes que afetam em muito o seu desempenho.

Nesta sequência surgiram os ligantes geopoliméricos, materiais com potencial para substituir o cimento Portland. Estes pelas suas características, pelo seu modo de produção e pela sua durabilidade, tem-se tornado foco de atenções. Existindo vários estudos efetuados sobre as suas possíveis aplicações.

Várias instalações industriais, têm sentido cada vez mais o problema da deterioração das suas infraestruturas, por ataques químicos, entre outros. A necessidade de reabilitação por esses motivos, tem-se tornado imprescindível. Pode-se definir como grande objetivo de uma reabilitação, o melhoramento do desempenho das infraestruturas, quando comparadas com uma situação inicial. Isto a partir de aumentos da resistência, das características e da durabilidade dos seus elementos.

Assim, abre-se a necessidade de responder ao problema criado, procurando-se desta forma um material que consiga colmatar esta falha. Conhecendo-se algumas das características dos geopolímeros, como a sua resistência química, sentiu-se a necessidade de fazer uma análise sobre as suas possibilidades, como um material a ser utilizado nas reabilitações das infraestruturas industriais.

## **1.2 Objetivos e Metodologia**

Este estudo tem como objetivo, a análise da possibilidade de utilização das argamassas geopoliméricas para reabilitação de infraestruturas industriais, sob o ataque dos ácidos.

Com a finalidade de cumprir o objetivo em cima descrito, a dissertação foi dividida em três fases, sendo uma delas mais teórica, e as outras duas com componente prática:

- 1ª Fase – Nesta fase, sendo uma fase mais teórica, analisou-se as informações já existentes sobre o geopolímero, ficando claro a boa resistência química do material, bem como o facto de que alterando a razão dos ativadores ou mudando o tipo de ligante, a finalidade adquirida seria diferente, bem como as suas características.

Nas duas fases com uma componente mais prática, foram executados alguns ensaios:

- 2ª Fase – Foram executados ensaios de compressão, flexão, absorção por imersão e por capilaridade em argamassas geopoliméricas e para betões com a exceção do ensaio de flexão. Os principais objetivos foram os de restringir o grupo de composições no caso das argamassas, de forma que fossem escolhidas a melhor composição de cada ligante. Em relação aos betões, teve como finalidade de perceber se os betões que se utilizaram foram ou não um betão convencional e um de elevado desempenho.
- 3ª Fase – Nesta etapa, e como seguimento da anterior, foram utilizados as melhores composições das argamassas geopoliméricas como revestimentos dos betões convencionais, bem como a utilização de duas tintas para complementar o estudo. Foram ensaiados os provetes de betão com e sem revestimento ao ataque de ácidos, sendo que estes ácidos estavam divididos em diferentes concentrações.

## **1.3 Organização da Dissertação**

Para uma melhor organização desta dissertação, optou-se por fazer uma divisão em seis capítulos, com mais um de anexos.

- Capítulo 1 – Trata-se de um capítulo introdutório, onde se apresenta um enquadramento geral, o motivo deste estudo e seus objetivos, além da estrutura desta dissertação.

- Capítulo 2 – Apresenta-se uma revisão do estado de arte, em que se dá realce à sustentabilidade do planeta, às diversas patologias que afetam o betão, aos geopolímeros e à reabilitação de estruturas.
- Capítulo 3 – Capítulo dedicado aos materiais utilizados, à forma como foram produzidos e aos procedimentos adaptados nos ensaios realizados.
- Capítulo 4 – Serão apresentados os resultados obtidos e será feita uma análise crítica destes.
- Capítulo 5 – Neste capítulo serão resumidas as principais conclusões obtidas na realização da dissertação, será feita uma avaliação do cumprimento do principal objetivo da realização desta dissertação. Por fim, é dado também realce aos possíveis desenvolvimentos de trabalhos futuros.
- Capítulo 6 – Serão expostas as referências bibliográficas que foram utilizadas na elaboração desta dissertação.
- Anexo – Serão apresentadas alguns dados referentes à análise de resultados.



## 2 REVISÃO DO ESTADO DE ARTE

### 2.1 Infraestruturas Industriais

Nos últimos anos, além da preocupação com a resistência do betão, a durabilidade tem sido alvo de atenção por parte dos engenheiros. Patologias prematuras ocorrem em estruturas de betão residenciais, comerciais e industriais, trazendo riscos, desconforto e altos custos de recuperação (Poggiali, 2009).

As instalações industriais devido aos elevados custo de manutenção e de reparação existentes, têm sido alvos de abordagens sob forma de criação de novos materiais ou estudos sob formas de reparação/prevenção da degradação dos seus constituintes.

Segundo Garcia & Brito (2005) os pavimentos são a estrutura mais utilizada numa edificação industrial. Toda a produção, comercialização, movimentação e produção desenvolve-se sobre o pavimento, estando este sujeito a esforços estáticos e dinâmicos, ataques químicos ou lavagens frequentes. Em termos de soluções para revestimento de pisos industriais, as mais frequentemente usadas são de betão com endurecedores de superfície, pavimentos autonivelantes de base cimentícia e resinas sintéticas.

Pisos especiais são aqueles empregues em ambientes industriais, devendo apresentar como principal característica uma boa resistência à abrasão, bem como uma resistência a ataques químicos adequada ao meio de exposição. Alguns dos agentes químicos encontrados em instalações industriais (Dal Molin et al., 2006):

- Ácido láctico – aparece em indústrias lácteas, formando-se a partir da fermentação da lactose, ou em indústrias de produtos químicos. Este agente quando em contacto com o betão, faz com que exista uma dissolução do  $\text{Ca(OH)}_2$ , a partir da superfície, levando à lixiviação.
- Ácido fórmico – aparece nas indústrias de celulose e papel, em tinturarias e em indústrias de conservas, fazendo o mesmo que os outros ácidos, dissolvendo o  $\text{Ca(OH)}_2$ . Este ácido mesmo com concentrações muito baixas consegue atacar as instalações.
- Ácido acético – Detetado principalmente nas indústrias alimentares, este tem a capacidade de com o seu ataque, formar acetato de cálcio, solúvel e facilmente removido por lixiviação.

- Hidróxido de sódio (soda cáustica) - Encontrado em indústrias que produzem soda cáustica, compotas e conservas, este tem a aptidão de corroer o betão por ação de soluções alcalinas. A ação da soda cáustica com concentrações acima de 10% tem uma capacidade de destruir o betão.

## 2.2 Cimento Portland

### 2.2.1 Enquadramento

Hoje em dia, caminha-se para um dos maiores desafios ambientais, o qual envolve o aumento da concentração de CO<sub>2</sub> e por conseguinte, o aumento da temperatura, fazendo com que existam fenómenos atmosféricos cada vez mais graves. Além deste grave problema ocorre também a escassez de matéria-prima e de produtos dados como certos.

Na indústria da construção tradicional, os betões são fundamentais no que se refere ao consumo de materiais, o que faz com que sejam causadores de elevados impactos ambientais, como por exemplo, a extração de recursos não renováveis, consumo de energia, bem como as emissões de gases responsáveis pelo efeito de estufa (Pacheco-Torgal & Jalali, 2011).

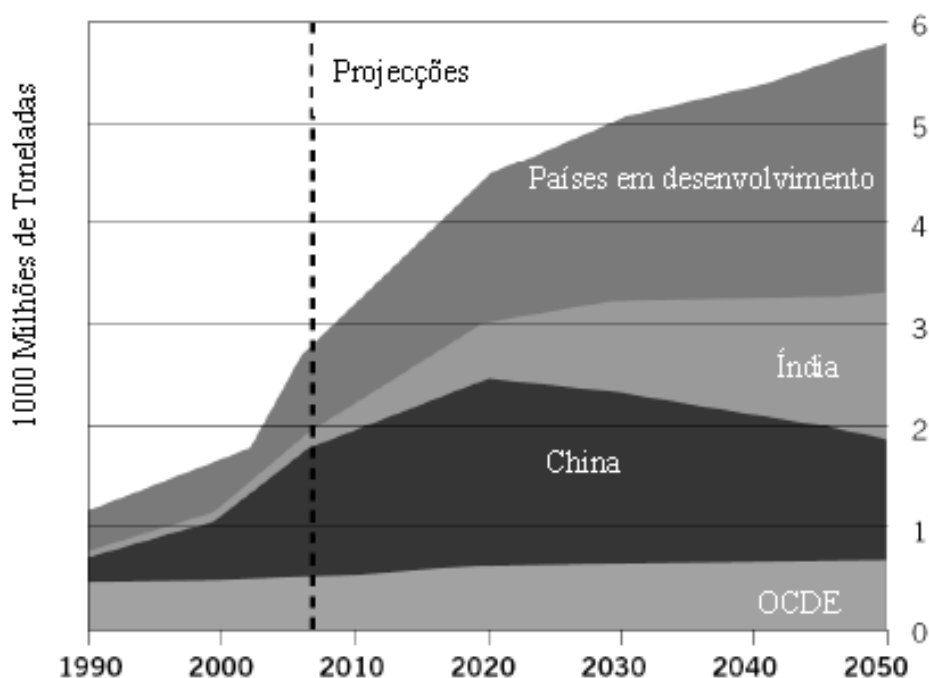


Figura 2.1 - Projeção da produção mundial de cimento Portland (Pacheco-Torgal & Jalali, 2011).



O cimento Portland normal (CPN) tem visto a sua produção ser alvo de um aumento, uma vez que, no início do Séc. XXI, a produção mundial era de 1200 milhões de toneladas/ano. Neste momento produzem-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 (fig.2.1) (Pacheco-Torgal & Jalali, 2011).

Existem vários tipos de cimentos apresentados na norma NP EN 197-1 de 2001 (27 famílias de cimentos) para fins da construção, sendo o cimento Portland o ligante hidráulico mais usado no século XX e, mais importante, empregue normalmente na confeção de betões e argamassas. Sendo obtido da seguinte forma (Aguiar, 2007):

- Como matéria-prima necessita de: 25% de argila e 75% de calcário;
- A temperatura de cozedura é da ordem dos 1450 °C;
- A cozedura é feita em fornos, geralmente horizontais giratórios;
- A matéria-prima entra no forno homogeneizada; para a homogeneização existem dois processos: via seca e via húmida;
  - Faz-se a cozedura da matéria-prima: esta começa a perder água e entre os 450/500°C a argila perde a água de combinação; a 850°C tem-se a decomposição do calcário em óxido de cálcio e dióxido de carbono; nos 900/950°C a argila separa-se e a cal viva é fixada pela sílica e alumina da argila, obtendo-se os silicatos e aluminatos de cálcio; chegando aos 1450°C acontece a fixação total da cal;
- Do forno sai o clínquer;
- Por fim Clínquer + Gesso (pequena percentagem) = Cimento Portland.

As principais características do cimento Portland são (Marques, 2005):

- Resistência a agressões químicas;
- Elevada resistência mecânica;
- Instabilidade volúmica;
- Calor de hidratação.

A grande produção deste ligante tem despertado o interesse da comunidade científica nos últimos anos. Isto deve-se ao seu reduzido desempenho ambiental (emissões de CO<sub>2</sub>) e também ao facto da deterioração precoce do betão. Assim sendo, têm surgido estudos de

forma a existir uma utilização de novos ligantes como sejam os de ativação alcalina (geopolímeros) (Pinto, 2004; Pacheco-Torgal, 2007; Pacheco-Torgal & Jalali, 2010).

### 2.2.2 Agentes degradadores

Pode-se definir como um betão durável, aquele que mantém a sua integridade estrutural, a sua estética e a sua capacidade protetora ao longo de um determinado período de tempo, quanto está sujeito ao meio ambiente.

Seguidamente são apresentadas na tabela 2.1, as formas de deterioração mais usuais e os seus efeitos. A definição de deterioração/degradação pode ser resumida da seguinte forma: alteração das propriedades mecânicas, físicas e químicas, tanto na superfície do betão como no seu interior, geralmente devido a desintegração dos seus componentes (Ferreira, 2000).

Tabela 2.1 - Factores de degradação e os seus efeitos (Ferreira, 2000)

<b>Factores de degradação</b>	<b>Processo</b>	<b>Degradação</b>
<b>Mecânicos</b>		
<b>Carregamento estático</b>	Deformação	Deflexão, fendilhação, rotura
<b>Carregamento cíclico</b>	Fadiga, deformação	Deflexão, fendilhação, rotura
<b>Carregamento por impacto</b>	Fadiga	Vibração, deflexão, fendilhação, rotura
<b>Biológicos</b>		
<b>Microorganismos</b>	Produção de ácido	Lixiviação
<b>Bactérias</b>	Produção de ácido	Lixiviação

Tabela 2.1 – Factores de degradação e os seus efeitos (Ferreira,2000) (continuação)

<b>Factores de degradação</b>	<b>Processo</b>	<b>Degradação</b>
<b>Químicos</b>		
<b>Água pura</b>	Lixiviação	Desagregação do betão
<b>Ácido</b>	Lixiviação	Desagregação do betão
<b>Ácido e gases ácido</b>	Neutralização	Despassivação do aço
<b>Dioxido de carbono</b>	Carbonatação	Despassivação do aço
<b>Cloretos</b>	Penetração, destruição da camada de passivação	Despassivação do aço
<b>Despassivação do aço + H<sub>2</sub>O+O<sub>2</sub></b>	Corrosão	Expansão do aço, perda de Ø e de aderência
<b>Tensão + Cloretos</b>	Corrosão do aço	Rotura da armadura de pré-esforço
<b>Sulfatos</b>	Pressão dos cristais	Desagregação do betão
<b>Agregado (sílica) + álcalis</b>	Reacção da sílica	Expansão, desagregação
<b>Agregado (carbonato) + alcalis</b>	Reacção do carbonato	Expansão, desagregação
<b>Físicos</b>		
<b>Variação da temperatura</b>	Expansão/Contração	Deformação restringida
<b>Variação da humidade</b>	Retacção e expansão	Deformação restringida
<b>Baixa temperatura + água</b>	Formação de gelo	Desagregação do betão
<b>Sal descongelante + água</b>	Transferência de calor	Destacamento do betão

Tabela 2.1 – Factores de degradação e os seus efeitos (Ferreira, 2000) (continuação)

<b>Factores de degradação</b>	<b>Processo</b>	<b>Degradação</b>
<b>Gelo (mar)</b>	Abrasão	Destacamento, fendilhação
<b>Trânsito</b>	Abrasão	Desgaste e rotura
<b>Água corrente</b>	Erosão	Danos superficiais
<b>Água turbulenta</b>	Cavitação	Cavidades
<b>Eletrómagnéticos</b>		
<b>Eletricidade</b>	Corrosão	Expansão do aço, perda de Ø e de aderência
<b>Magnetismo</b>	Corrosão	Expansão do aço, perda de Ø e de aderência

Da lista apresentada na tabela 2.1 será dado mais realce ao ataque por ácidos, devido ao facto de ser o fator de degradação do tema desta dissertação. O betão com base de cimento Portland, é um material altamente alcalino, o que origina um grande condicionamento quanto a resistência ao ataque por ácidos (Vasconcelos et al., 2010).

O ataque ácido resulta de uma reação entre a solução atacante e os compostos do cimento, que conduzem a formação de compostos secundários que são lixiviados do betão, obtendo-se assim uma perda gradual de resistência. O alvo que normalmente é atacado de uma forma mais agressiva é o hidróxido de cálcio (Ferreira, 2000).

As soluções ácidas mais problemáticas para o betão são as minerais (e.g., sulfúrico, nítrico) e orgânicas (e.g., láctico, acético). Dependendo do tipo de ácido, o ataque será unicamente ácido, ou então, prosseguido por um ataque de sal. O ácido normalmente deposita o produto de reação (sal) na superfície do betão, esta reação pode prosseguir resultando assim na cristalização do produto de reação que origina forças expansivas (Ferreira, 2000).

Existem ácidos que não contêm iões de sulfato, nesses a corrosão apresentada não pode ser acompanhada por expansão, como são o caso das reações com ácidos orgânicos, onde são produzidas massas pouco coesas, nas quais o cimento se dissolve e tem uma baixa resistência.

Divide-se em dois grupos, os ácidos orgânicos problemáticos para o betão, os que têm baixa massa molecular (lático, acético, etc) e os com ácidos de alta massa molecular que se encontram nos óleos e gorduras (oleico, palmítico, etc) (Vasconcelos, 2010).

### 2.2.3 Betão e as suas classes de exposição relacionadas com o ataque químico

No que ao ambiente diz respeito, deverá ser feita uma classificação quanto à severidade de exposição em relação à durabilidade do betão, estas ações químicas ou físicas de onde resultam efeitos não considerados no projeto como ações, são apresentadas na norma NP EN 206 sob forma de classes de exposição (Ferreira, 2000).

Tabela 2.2 - Valores limite das classes de exposição para o ataque ácido (NP EN 206-1, 2007).

Os ambientes com agressividade química, abaixo classificados, têm como base o solo e a água nele contida, com temperaturas do solo ou da água entre os 5 °C e os 25 °C e com velocidades da água suficientemente lentas que possam ser consideradas próximas das condições estáticas. A classe é determinada pelo valor mais elevado para qualquer característica química. Quando duas ou mais características agressivas conduzirem à mesma classe, o ambiente deve ser classificado na classe imediatamente superior, a menos que um estudo especial para este caso específico prove que não é necessário.				
Característica química	Método de ensaio de referência	XA1	XA2	XA3
<b>Águas</b>				
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> mg/l	EN 196-2*	≥ 200 e ≤ 600	> 600 e ≤ 3000	> 3000 e ≤ 6000
pH	ISO 4316	≥ 5,5 e ≤ 6,5	≥ 4,5 e < 5,5	≥ 4,0 e < 4,5
CO <sub>2</sub> agressivo mg/l	prEN 13577:1999*	≥ 15 e ≤ 40	> 40 e ≤ 100	> 100 até à saturação
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> mg/l	ISO 7150-1 ou ISO 7150-2	≥ 15 e ≤ 30	> 30 e ≤ 60	> 60 e ≤ 100
Mg <sup>2+</sup> mg/l	ISO 7980	≥ 300 e ≤ 1000	> 1000 e ≤ 3000	> 3000 até à saturação
<b>Solos</b>				
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> total <sup>a)</sup> mg/kg	EN 196-2 <sup>b)</sup>	≥ 2000 e ≤ 3000 <sup>c)</sup>	> 3000 <sup>c)</sup> e ≤ 12000	> 12000 e ≤ 24000
Acidez ml/kg	DIN 4030-2	> 200 Baumann Gully	Não encontrado na prática	
<p>a) Os solos argilosos com uma permeabilidade abaixo de 10<sup>-3</sup> m/s podem ser colocados numa classe mais baixa.</p> <p>b) O método de ensaio prescreve a extração do SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> através de ácido clorídrico; em alternativa, pode usar-se a extração aquosa, se houver experiência no local de utilização do betão.</p> <p>c) O limite de 3000 mg/kg deve ser reduzido para 2000 mg/kg, caso exista risco de acumulação de íons sulfato no betão devido a ciclos de secagem e molhagem ou à absorção capilar.</p>				

Existem vários artigos referentes ao estudo dos betões quanto à sua classe e à sua durabilidade, segundo a NP EN 206-1, dependendo do tipo de agente degradante envolvido.

O betão pode ser classificado com diferentes classes, existindo valores limites de características químicas apresentadas na tabela 2.2, que os betões têm que garantir.

De referir que neste caso as classes estão apresentadas de uma forma crescente quanto a sua gravidade de ataque químico. Os ensaios usados sobre o ataque de ácido, são baseados em algumas normas como sejam a norma ASTM C-267 (2006) e a EN 13529 (2003).

Segundo Beddoe & Dorner (2005), quando existem superfícies de betão desprotegidas, sejam elas referentes a canos de esgoto, estações de tratamento de águas residuais, torres de refrigeração ou outras construções industriais, são atacadas por soluções ácidas ocorre uma degradação da microestrutura do betão o que vai limitar a vida útil dos componentes da construção. Dai existirem vários estudos sobre a melhor composição a ser usada:

- Girardi & Maggio (2011), efetuaram diferentes misturas de betão, sendo estas à base de cimento Portland contendo calcário, escórias de alto forno, cimento pozolânico e cimento contendo sílica ativa, para serem expostas a soluções de ácido sulfúrico como de sulfatos. Concluem que a degradação foi particularmente mais grave nas amostras que continham agregados naturais e sob uma exposição cíclica a soluções de sulfatos mistos e ácido sulfúrico. Referem também que a mistura que teve melhor comportamento foi o cimento Portland contendo calcário.
- Um outro estudo realça a durabilidade do betão quando exposto a lixiviação e a ataques externos de sulfatos. O objetivo do estudo foi o de fornecer dados experimentais para projetar, baseados no desempenho, testes e especificações de uma abordagem comparativa. Como conclusão referem que existe uma correlação entre a resistência à lixiviação e ao ataque externo por parte dos sulfatos (Rozière et al., 2009).
- Segundo Chang et al., (2005), que testaram seis tipos de betões com o objetivo de melhorar a sua resistência ao ataque de ácido sulfúrico. Os seis tipos de betões usados foram, quatro com agregados calcários e dois com agregados siliciosos, todos com a mesma razão água/cimento, cerca de 0,4, com resistências à compressão compreendidas no intervalo de 45MPa e 58MPa a uma idade de 28 dias. Foi concluído que o cimento contendo 7% de sílica activa e 33% de cinzas volantes tinha uma excelente resistência a solução de 1% de ácido sulfúrico.

- Azevedo et al., (2012) testaram a utilização de resíduos da borracha dos pneus como substituição parcial da areia, e as cinzas volantes e metacaulino como substituição parcial do cimento Portland. Os resultados mostraram que as estruturas de betão em ambientes de classe XA3 apresentavam uma pior resistência ao ataque de ácido sulfúrico que as misturas contendo resíduos de borracha e com 45% de cinzas e 15% de metacaulino. Concluíram, também, que existe um efeito sinérgico entre as cinzas e o metacaulino o que minimizava as perdas de resistência provocadas pela utilização dos resíduos de borracha e que até 15% deste material é possível manter uma elevada resistência ao ataque de ácido sulfúrico. O trabalho propõe uma revisão dos requisitos da norma EN 206-1 em relação a ambientes químicos altamente agressivos.
- O estudo efetuado por Dal Molin et al., (2006) aborda a utilização de cimentos com adição de sílica ativa em pisos especiais sob ataque de agentes agressivos. Sendo que os pisos especiais são aqueles que são utilizados em ambientes industriais, que devem ter como principal característica a resistência à abrasão e a ataques químicos adequados ao meio de exposição. Foi feita uma comparação entre os cimentos com ou sem adição de sílica em relação à resistência química, e como resultado foi possível observar que a adição de 6% de sílica, reduziu em média 20% a perda de massa, em razões de água/cimento 0.37 e 50% para razões de 0.59.

## **2.3 Geopolímeros**

### **2.3.1 Enquadramento**

O aparecimento deste tipo de materiais remonta à década de 40, na Bélgica, a partir dos trabalhos de Purdon. Apesar disso, foi Glukhovsky o primeiro investigador a estudar os ligantes utilizados em construções históricas. Com este estudo Glukhovsky desenvolveu um novo tipo de ligantes aos quais chamou de “solo-cimento” (Pacheco-Torgal & Jalali, 2010).

Na tabela 2.3 são apresentados alguns pormenores históricos devido a intensas análises produzidas por parte de alguns investigadores do Leste da Europa (Abdollahnejad et al 2012).

Tabela 2.3- Alguns acontecimentos importantes acerca dos ligantes obtidos por ativação alcalina e ligantes alcalinos (Abdollahnejad et al., 2012)

<b>Autor</b>	<b>Ano</b>	<b>Descrição</b>
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 radioactivos
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	Presença rápida de cimentos activados alcalinamente
Roy e Silsbee	1992	Revisão sobre cimentos activados 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 activadas alcalinamente
Shi	1996	Força, estrutura dos poros e permeabilidade das escórias de activação alcalina
Fernández-Jiménez e Puertas	1997	Estudos cinéticos de cimentos de escórias activados alcalinamente
Katz	1998	Microestrutura de cinzas volantes activadas alcalinamente
Davidovits	1999	Aspectos químicos dos sistemas geopolímeros, tecnologia



Tabela 2.3 - Alguns acontecimentos importantes acerca dos ligantes obtidos por ativação alcalina e ligantes alcalinos (Abdollahnejad et al., 2012) (continuação)

Autor	Ano	Descrição
Roy	1999	Oportunidades e desafios dos cimentos ativado alcalinamente
Palomo	1999	Cinzas volantes activadas alcalinamente – um cimento para o futuro
Gong e Yang	2000	Cimento de escória-lama vermelha activada alcalinamente
Puertas	2000	Cimento de escórias/cinzas volantes activados alcalinamente
Bakharev	2001-2002	Betão de escórias activados alcalinamente
Palomo e Palacios	2003	Imobilização de resíduos perigosos
Grutzeck	2004	Formação de Zeólitos
Sun	2006	Tecnologia dos Sialitos
Duxson	2007	Tecnologia dos Geopoliméricos: Estado de Arte
Hajimohammadi, Provis e Deventer	2008	Geopolimérico uma parte
Provis e Deventer	2009	Geopolímeros: Estrutura, propriedades e aplicações industriais

Em 1978, o investigador francês Joseph Davidovits patenteou o termo “Geopolímero” (Davidovits, 1979). Durante os anos 90, Palomo, Glassier e Rahier publicaram um trabalho extremamente valioso que serviu de inspiração a muitos outros estudiosos (Weerdt, 2011).

Os geopolímeros foram investigados durante várias décadas e apesar destas investigações duradouras e contínuas, os geopolímeros ainda não alcançaram uma grande aplicação em termos de mercado, o que é surpreendente já que em relação com os cimentos, os geopolímeros apresentam muitas vantagens (Weil & Gasafi, 2005) :

- Resistência contra ácidos;
- Resistência térmica;
- Grande durabilidade;
- Ligação estável de metais pesados e substâncias nocivas;
- Robustez elevada;
- Montagem rápida.

Estas características foram provadas por diversas investigações, tais como: (Bakharev, 2005), (Fernandez-J & Palomo, 2003), (Bkharev & sanjayan, 2002), (Hermann, 1999), porém, estas

propriedades dependem do tempo de cura, temperatura, bem como dos materiais escolhidos (Weil & Gasafi, 2005).

Em Portugal, entre 2004 e 2007, na Universidade da Beira Interior, num trabalho de doutoramento, Pacheco Torgal desenvolveu um estudo sobre ligantes geopoliméricos a partir de resíduos de minas (Pacheco-Torgal, 2007).

Relativamente às argamassas geopoliméricas, as suas características apresentam singularidades a outros materiais sólidos naturais, mais propriamente semelhanças de composição e de estrutura com os feldspatoides e zeólitos (Pinto, 2004).

### **2.3.2 Produção e aplicação**

Segundo Swanepoel & Strydom, (2002) a reação de geopolimerização pode ser classificada como uma reação de policondensação inorgânica e pode ser comparada com a formação de zeólitos.

A principal forma de sintetizar geopolimeros é através de uma combinação entre uma solução alcalina e um aluminossilicato reativo, sendo os mais comuns a cinza volante (ex.: resíduo da combustão de carvão) e o metacaulino (calcinação do caulino) (Provis & Deventer, 2009).

Pode-se dizer que a geopolimerização não é mais do que uma reação de hidratação entre óxidos que constituem os alumino-silicatos num meio fortemente alcalino. A cronologia desta reação é apresentada de seguida (Osório, 2006):

- Fase de destruição, em que existe a destruição das ligações covalentes por parte dos iões hidroxilo OH<sup>-</sup>;
- Fase de orientação e transporte; nesta fase forma-se uma mistura de iões que vão ser sujeitos a sistemas de orientação e transporte, em que a fase líquida assume particular preponderância;
- Fase de coagulação/precipitação; aqui começam a aparecer pequenos núcleos de coagulação que vão evoluindo rapidamente para processos de precipitação massiva de gel, endurecendo de uma forma rápida. Nesta fase registam-se fenómenos de

policondensação, ainda que limitados em extensão e espacialmente desorganizados, sendo que, assim, a estrutura final é essencialmente amorfa.

As 3 classes mais comuns de matérias-primas usadas na sintetização do geopolímero são, as escórias, argilas calcinadas (principalmente o metacaulino) e cinzas volantes de carvão (Provis & Van Deventer, 2009).

De uma forma resumida, pode-se dizer que ativação alcalina é uma reação de hidratação de aluminossilicatos com substâncias do tipo alcalino ou alcalino-terroso, sejam elas:

- Hidróxidos [ $ROH$ ,  $R(OH)_2$ ];
- Sais de ácidos fracos [ $R_2CO_3$ ,  $R_2S$ ,  $RF$ ];
- Sais de ácidos fortes [ $Na_2SO_4$ ,  $CaSO_4$ ,  $2H_2O$ ];
- Sais silicatados do tipo  $R_2 \cdot (n)SiO_4$ .

Onde R é um íão do tipo Na, K, ou Li ou alcalino-terrosos como o Ca.

Quanto à sua aplicação, como foi anteriormente referido, os geopolímeros são ainda um material em fase de estudo, sendo a sua aplicabilidade teórica de grande dimensão mas a prática é ainda de baixa dimensão. A principal aplicabilidade deste tipo de materiais são as áreas da engenharia civil, aeronáutica, o automobilismo, a indústria dos plásticos, a balística e mesmo a arte (Osório, 2006).

Atualmente, só o sódio-polisialato (Na-PS), o (sódio, potássio) – polisialato-siloxo [(Na-K)-PSS], potássipolisialato – siloxo (K-PSS) e o potássio-polisialato (K-PS) são usados na produção dos materiais geopoliméricos (Pinto, 2004).

Apresenta-se de seguida a fórmula geral (figura 2.2) (Pinto, 2004):



Podendo dizer o seguinte:

M – é um catião ( $Na^+$ ,  $K^+$ , ou  $Ca^{2+}$ );

n – é o grau de polimerização;

z – é igual a 1,2 ou 3;

w – é o grau de hidratação

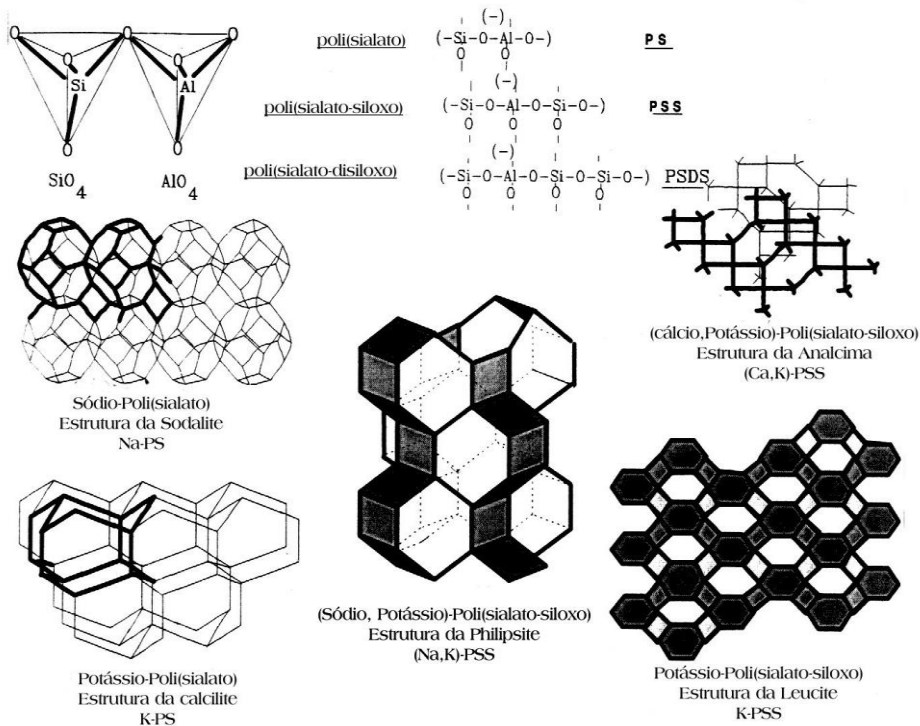


Figura 2.2 - Aspectos estruturais e nomenclatura (Pinto, 2004)

Na figura 2.3 esta apresentada a razão molar dos silicatos alcalinos, onde se pode ver que dependendo da escolha molar, iremos ter características diferentes. Na figura 2.4 está representada a variação da aplicabilidade em função da razão Si/Al (até 35), de onde se pode concluir que à medida que esta razão aumenta, os materiais vão ficando com um maior carácter polimérico (Pinto, 2004).

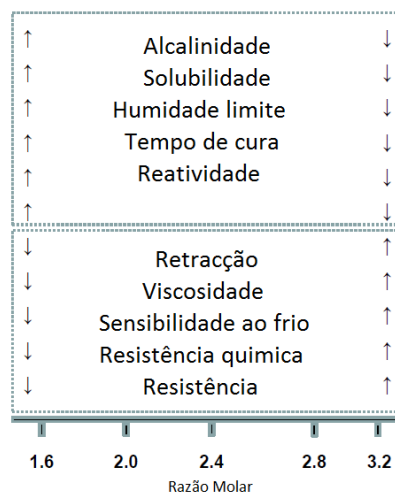


Figura 2.3 - Propriedade dos silicatos alcalinos em relação a sua razão molar adaptado de Leute & Lind, (2012)

A razão molar pode ser calculada da seguinte forma (Leute & Lind, (2012):

$$RM = \frac{Mol SiO_2}{Mol M_2O} \quad (2.2)$$

Onde,

RM – razão molar;

M – Na, K ou Li;

A forma de passar a razão molar (RM) para razão de massas (WR) pode ser efetuada da seguinte forma, dependendo de qual seja o reagente (Leute & Lind, 2012):

Silicato de Sódio –  $RM = 1,032.WR$ ;

Silicato de potássio –  $RM = 1,599.WR$ ;

Silicato de lítio –  $RM = 0,497.WR$ ;

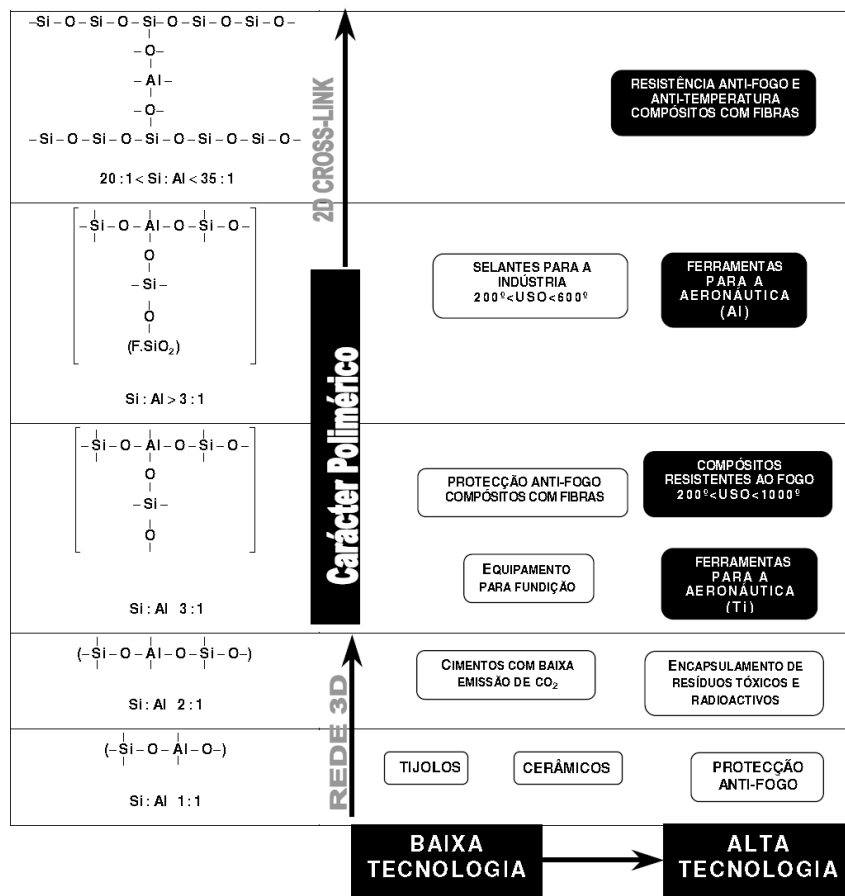


Figura 2.4 - Aplicações de geopolímeros em função da razão Si/Al (Pinto, 2004)

Devido às suas propriedades, muito se tem investigado sob as potencialidades do uso do material. Um exemplo é o uso de geopolímeros como adesivos nos sistemas cerâmicos submetidos a variações cíclicas. Foram testados três tipos de adesivos: um adesivo comercial classificado pela norma brasileira como de alta aderência e os outros dois a partir de ativação alcalina. Os resultados que se obtiveram foi que os adesivos com base geopolimérica tiveram melhor aderência, especialmente com o aumento de temperatura (Gomes et al., 2012).

A utilização como revestimentos por parte dos geopolímeros é uma área que também tem sido explorada, como mostra Temujin et al., (2010) que estudaram o revestimento geopolimérico com base de cinzas volantes no aço para resistir ao fogo, de onde foi possível extrair que, para uma razão Si : Al igual a 3.5, foram conseguidas em termos de aderência forças superiores a 3,5 MPa nas superfícies de aço, além de que as suas características ao fogo foram muito promissoras.

Segundo Temujin et al., (2011) que fizeram também o mesmo estudo, mas com geopolímeros à base de metacaulino, concluindo que como no caso dos geopolímeros à base de cinzas têm uma tensão de aderência à base de 3.5MPa, além disso ocorreu uma expansão térmica de 3% após o aquecimento a 800°C.

### **2.3.3 Propriedades**

Devido à existência de vários precursores geopoliméricos como sejam: as cinzas, metacaulino, escórias, etc., bem como de ativadores das mais variadas naturezas, como: à base de potássio ou de sódio, além das diferentes concentrações, isto faz com que existam varias combinações possíveis, e com isso as propriedades mecânicas resultantes sejam muito variadas (Dias, 2012).

Segundo Osório, (2006), dependendo da composição do ligante, deveremos obter o seguinte:

- Para a resistência à tração existem valores de 16 MPa;
- Podem fabricar-se geopolímeros que resistem bem até a temperatura de 1000 °C;
- Em termos de resistência à compressão têm-se obtido produtos com valores até aos 150 MPa;

- Apresentam uma boa resistência ao desgaste por abrasão (perda de massa máxima inferior a 25%);
- Resistência química elevada;
- Não reagem com os sulfatos;
- Não permitem reações do tipo alcalis-agregado;
- Resistem bem ao ataque dos ácidos.

Quanto à durabilidade é referido por Pinto (2004), que a boa durabilidade dos ligantes geopoliméricos deve-se à elevada inércia e estabilidade química destes materiais.

Existem vários estudos feitos sobre a resistência ao ataque de ácidos por parte dos geopolímeros, como seja o caso do estudo de Bakharev (2005) onde é apresentada uma investigação sobre a durabilidade dos materiais geopoliméricos com cinzas expostos a solução de ácido acético e sulfúrico com concentrações de 5%. Foram avaliados a evolução de massa, resistência à compressão, produtos de degradação e alterações microestruturais. Como jeito de conclusão foi observado que o desempenho dos materiais geopoliméricos quando expostos a soluções ácidas, foi superior ao betão de cimento Portland. É referido também que a deterioração do geopolímero quando em contacto com uma solução ácida deve-se a despolimerização de polímeros de aluminossilicato e libertação de ácido silícico, além da substituição de Na e K por catiões de hidrogénio. Outro facto é a condensação de polímeros e zeólitos siliciosos, que em alguns casos conduz a uma perda significativa de resistência.

Um outro documento de Provis & Van Deventer (2009) refere a grande resistência ao ataque dos ácidos por parte dos geopolímeros, além de que em relação ao cimento Portland para os ácidos nítrico, sulfúrico ou clorídrico o geopolímero tanto com cinzas como com metacaulino apresenta resistências bem mais elevadas. São referidos também algumas observações, como o facto de o betão geopolimérico sujeito a uma concentração de 10% de ácido sulfúrico durante 8 semanas apresenta uma perda de massa de 3%.

O betão geopolimérico com cinzas volantes apresenta, ao fim de um ano, corrosão e erosão nas superfícies mergulhadas no ácido sulfúrico com 2% de concentração. Indica também que existe uma perda significativa de resistência à compressão no caso da concentração de 2%, esta perda, diminui consideravelmente no caso de 1% e 0,5% (Davidovits, 2005).

Esta documentado por Palomo et al. (1999) que utilizou um geopolímero à base de metacaulino sob o ataque do ácido sulfúrico (pH = 3) durante 270 dias e encontrou uma variação reduzida quanto à resistência à flexão apos o ataque.

A concentração do ativador e as razões nelas inseridas fazem variar significativamente as propriedades do geopolímero, como está apresentada na figura 2.5, onde se pode ver que a concentração molar faz aumentar as características físicas do material.

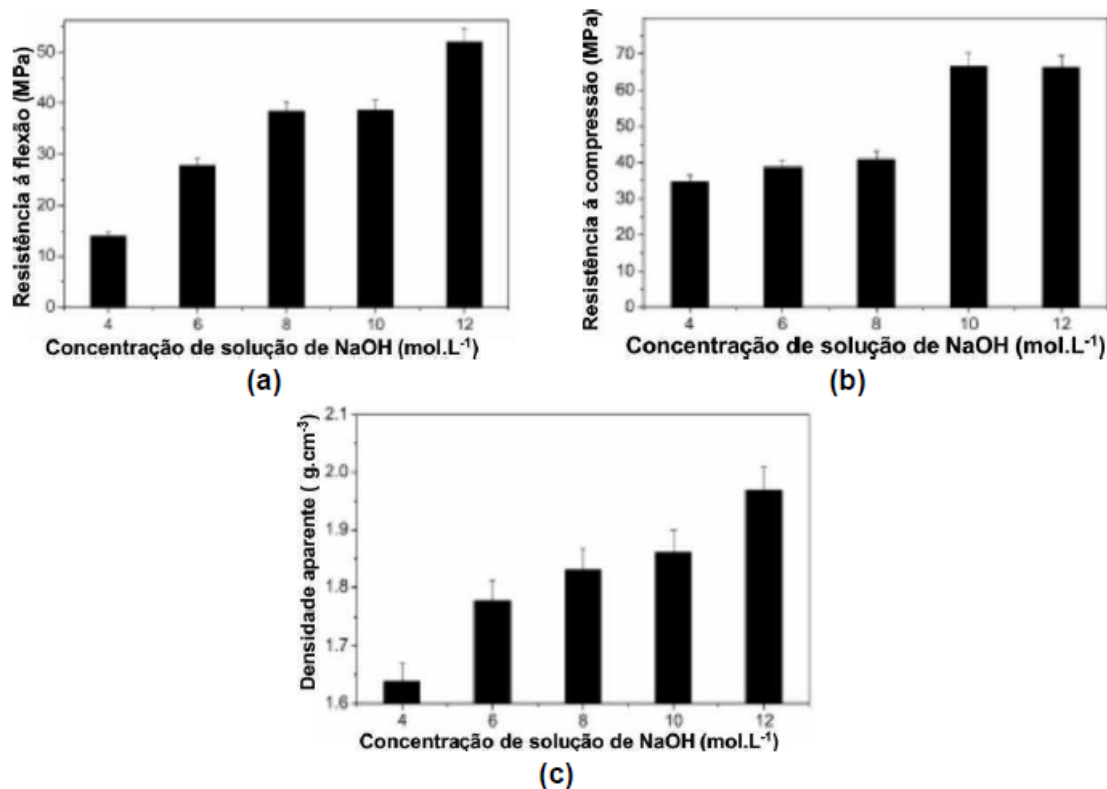


Figura 2.5 - (a) Resistencia à flexão, (b) Resistencia à compressão e (c) densidade aparente dos geopolímeros em relação a suas concentrações das soluções de NaOH adaptado de (Wang et al., 2005)

É referenciado também por Görhan et al., (2014) e Hanjitsuwan et al., (2014) que a concentração do ativador tem uma consequência significativa sobre a resistência à compressão, ou seja existe uma concentração ideal do ativador para o qual existe uma resistência máxima, a partir desse valor, podem ocorrer perdas das propriedades mecânicas do material, isto devido a liberdade de OH<sup>-</sup> na matriz alcalino-ativada, que pode alterar a estrutura geopolimérica do material. A idade e a temperatura de cura são outras variáveis



que podem influenciar a resistência de compressão, apesar de estas duas variáveis, para terem influência deve existir uma concentração considerável de NaOH.

Quanto aos revestimentos, no que à aderência diz respeito deve-se ter muita atenção à sua composição, pois esta tem a capacidade de fazer variar as suas características (Temuujin et al., 2010), (Temuujin et al., 2011).

### **2.3.4 Geopolímero vs Cimento Portland**

Um das grandes diferenças que fica logo pendente desta comparação, é quanto à sua obtenção, enquanto o cimento Portland é obtido pela fusão do calcário e argila, o geopolímero é formado através de uma reação química a temperaturas ordinárias de resíduos e material virgem contendo quantidades suficientes de componentes reativos de alumina e sílica. Por outro lado temos também o fator ambiental onde o geopolímero tem um comportamento bem mais favorável que o cimento Portland (Dias, 2012).

Uma das grandes desvantagens dos ligantes obtidos por ativação alcalina reside no facto de estes apresentarem um custo maior em relação aos betões correntes à base de cimento Portland (Pacheco-Torgal & Jalali, 2005).

Vários investigadores compararam a análise do ciclo de vida do geopolímero em comparação ao cimento Portland, onde foi possível retirar as seguintes conclusões (Dias, 2012):

- As emissões de carbono são 70% inferiores no geopolímero em relação ao cimento Portland;
- Os ligantes geopoliméricos, têm a capacidade de utilizar como matéria-prima qualquer material inorgânico, que tenha como constituição sílica ou alumina;
- Cinzas, escórias ou até mesmo resíduos de minas e pedreiras podem ser usadas como matérias-primas para os geopolímeros.

Quanto à avaliação da durabilidade é de realçar que os geopolímeros têm uma vida útil superior ao cimento Portland, além de terem a capacidade de ao fim de 24 horas já terem adquirido uma resistência bastante elevada, o que permite a execução mais rápida de

estruturas. Em termos de deterioração, existe nos betões à base do cimento Portland uma maior precocidade em relação ao geopolímero (Pacheco-Torgal & Jalali, 2010).

De realçar as elevadas resistências tanto à compressão como à tração apresentadas nos geopolímeros, o que implica reduções no consumo de aço e no volume de betão, traduzindo-se em peças mais económicas (Pacheco-Torgal & Jalali, 2010).

No caso das resistências químicas estudos comprovam a melhoria de qualidade entre o geopolímero e o cimento Portland, como sejam o caso de Dias, (2008), onde refere que os geopolímeros à base de metacaulino apresentaram um melhor desempenho em relação ao cimento Portland, quando mergulhados em soluções de ácido sulfúrico e acético.



Figura 2.6 - Provetes submersos numa solução de ácido sulfúrico com uma concentração de 10% : (a) e (b) argamassa de cimento Portland; (c) e (d) argamassa geopolimérica (Dias, 2008)

A figura 2.6 apresenta os provetes que foram submersos no ácido sulfúrico (10%) onde é possível ver a degradação mais elevada do cimento Portland.

## 2.4 Reabilitações/Reparações

Cada vez mais, as reabilitações/reparações são uma oportunidade de mercado, isto devido à fraqueza das estruturas aos agentes degradantes, além de que uma reabilitação bem conseguida contribui para uma construção sustentável.

Para iniciar uma reparação deve-se efetuar um estudo completo de todas as patologias, sendo o estudo constituído por três partes (Jalali & Silva, 2002):

- Identificação e extensão das patologias;
- Identificação das causas das patologias;
- Estabelecimento do projeto de reparação.

A comunidade científica tem tido uma atenção crescente sobre a utilização de argamassas de reabilitação utilizadas, quer seja em assentamentos de alvenaria de pedra, quer como revestimento dos paramentos dos edifícios (Pacheco-Torgal & Jalali, 2009).

A durabilidade do betão como já foi anteriormente descrito pode ser resumida em traços gerais como a sua capacidade de resistir aos agentes naturais (físicos e químicos).

Uma das propriedades mais importantes que os materiais de reparação devem conter é a sua aderência com o material a ser reparado. E devido a existir um recobrimento poroso da matriz cimentícia, o que permite a entrada de agentes agressivos, assim sendo a durabilidade será mantida tendo em atenção a tentativa de minimizar a entrada destes agentes (Pacheco-Torgal, 2012).

O uso do geopolímero como material de reabilitação foi também alvo de estudo, como seja o caso de Vasconcelos et al. (2010) que tinha como objetivo a utilização de geopolímeros incorporados com manta de fibra de carbono com o fim de serem utilizados na reabilitação de betões.

Relativamente ao estudo das investigações já efectuadas pode concluir-se que muito embora as argamassas geopoliméricas apresentem uma elevada resistência ao ataque em meio ácido superior às argamassas de cimento Portland importa compreender quais as melhores composições para diferentes tipos de ácidos. Nomeadamente a comparação entre o desempenho das argamassas geopoliméricas e de argamassas de cimento Portland revestidas com resinas epoxídicas e pintura acrílica.

Por outro lado como os estudos analisados utilizam ácidos de elevada concentração, com um efeito muito agressivo importa também estudar a resistência das argamassas geopoliméricas e outras para diferentes concentrações.

## **3 MATERIAIS E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL**

### **3.1 Introdução**

Para efetuar qualquer estudo é necessário conhecer os materiais a usar, bem como os procedimentos e os ensaios necessários. Numa primeira fase serão abordados os materiais usados, dando realce às suas principais características e propriedades, seguidos por uma segunda fase onde são apresentados os procedimentos bem como as composições usadas.

Em relação aos ensaios que foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção do Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho, serão referidas técnicas recomendadas pelas normas e os vários equipamentos utilizados por esses ensaios.

De uma forma resumida o estudo engloba duas fases. Numa primeira fase serão estudadas seis composições de argamassas geopoliméricas, modificando o ligante (metacaulino ou cinzas volantes) e a molaridade. E duas composições de betão com cimento Portland.

Numa segunda fase será feita uma escolha das duas melhores composições das argamassas (a melhor com o ligante metacaulino e a melhor com cinzas volantes), e serão testados estas argamassas bem como outros materiais como revestimentos dos betões. Com o objetivo de perceber como reagem aos ácidos.

### **3.2 Materiais**

Neste tópico serão referidos os materiais utilizados para a conceção das argamassas geopoliméricas, como pode ser observado na figura 3.1, além dos materiais utilizados para a preparação dos betões, apresentado na figura 3.2. Além de outros materiais utilizados para os revestimentos.

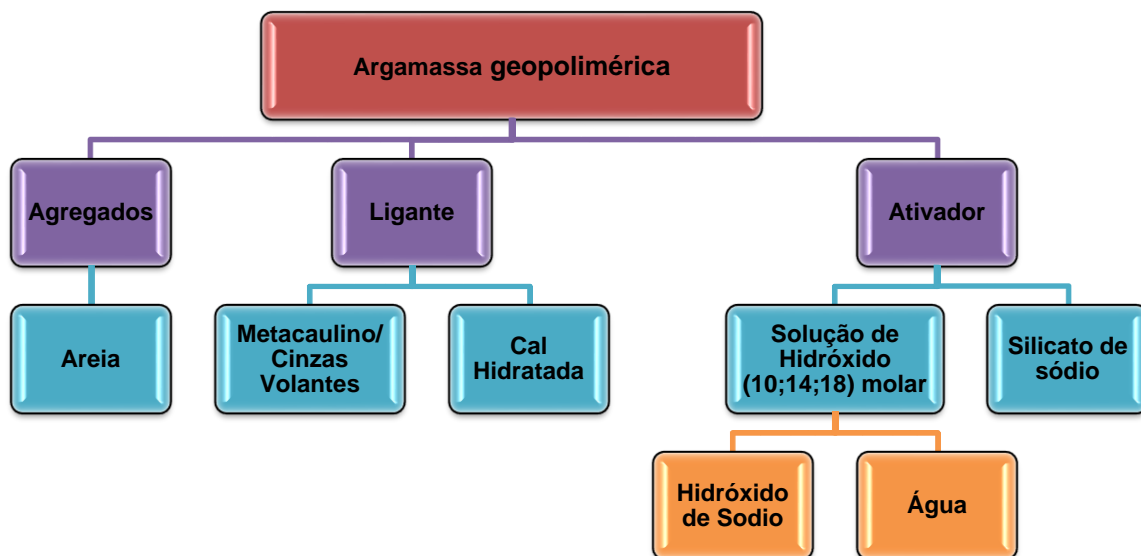


Figura 3.1 – Materiais utilizados na conceção das argamassas geopoliméricas

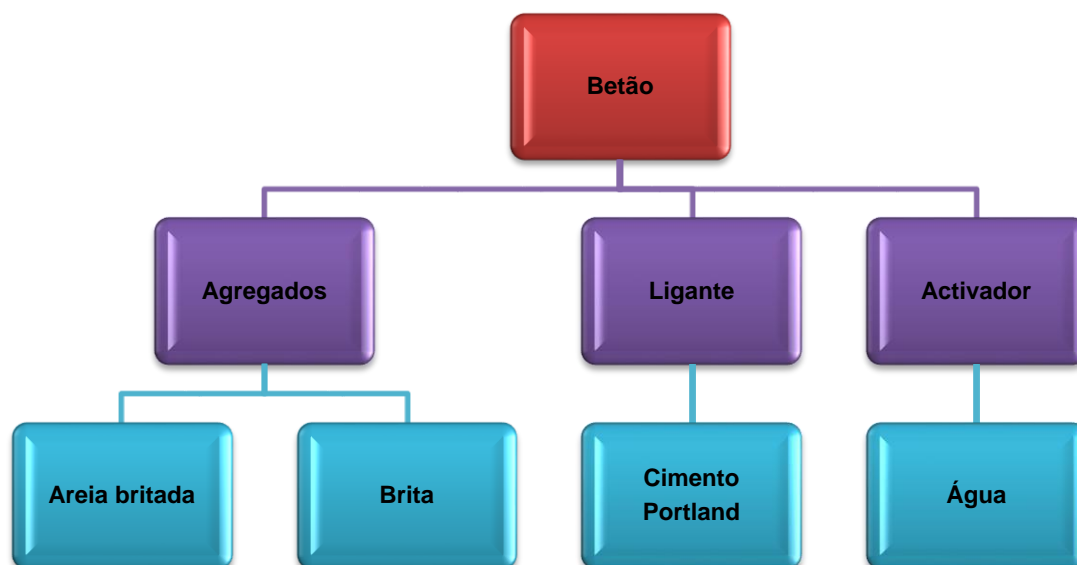


Figura 3.2 – Materiais utilizados para a produção dos betões

### 3.2.1 Agregados

Chama-se agregado a um material com forma e volume aleatórios, detentor de dimensões e propriedades adequadas para o fabrico de argamassas e betões.

#### 3.2.1.1 Areias e brita

A areia utilizada para a preparação de argamassas geopoliméricas é considerada uma “meia areia” pois é considerada uma areia em que os agregados têm dimensões máximas 4 mm.

No caso dos agregados britados (areia britada e brita), utilizados na preparação dos betões, com dimensões compreendidas entre 0 e 8 mm, estes foram fornecidos pela pedreira Britaminho-Granitos e Brita do Minho Lda. da pedreira “sorte do Mato das Lagedas, em Guimarães. As características dos agregados britados estão apresentados na tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Características dos agregados britados utilizados na produção dos betões

Agregado	D <sub>max</sub> (mm)	Teor de finos	Massa Volumica (kg/m <sup>3</sup> )	Absorção de água (%)
Areia britada (0-4)	4	≤ 3	2660.00	0.20
Brita (4-8)	8	≤ 1,5	2620.00	0.60

Foi feita uma análise granulométrica dos agregados, usando o método de peneiração a seco, segundo a EN 933-1, com peneiros especificados na NP EN 933-2 e de acordo com a ISO 3310-1, ISO 3310-2. Sendo que esta análise consiste em fazer o estudo das dimensões da areia e da maneira como se distribuem, sendo que a separação é feita numa série de peneiros, onde posteriormente são determinadas as percentagens de cada um deles, estes resultados são apresentados na tabela 3.2 e figura 3.4.

Tabela 3.2 – Distribuição granulométrica da areia, areia britada e da brita

Peneiro (mm)	Retidos acumulados Areia-Britada (%)	Retidos acumulados Brita (%)	Retidos acumulados Areia (%)
63	0	0	0
31,5	0	0	0
16	0	0	0
8	0	7	0
4	8	89	3
2	32	98	24
1	53	99	51
0,5	68	99	70
0,25	78	99	90
0,125	89	99	98
0,063	97	99	99

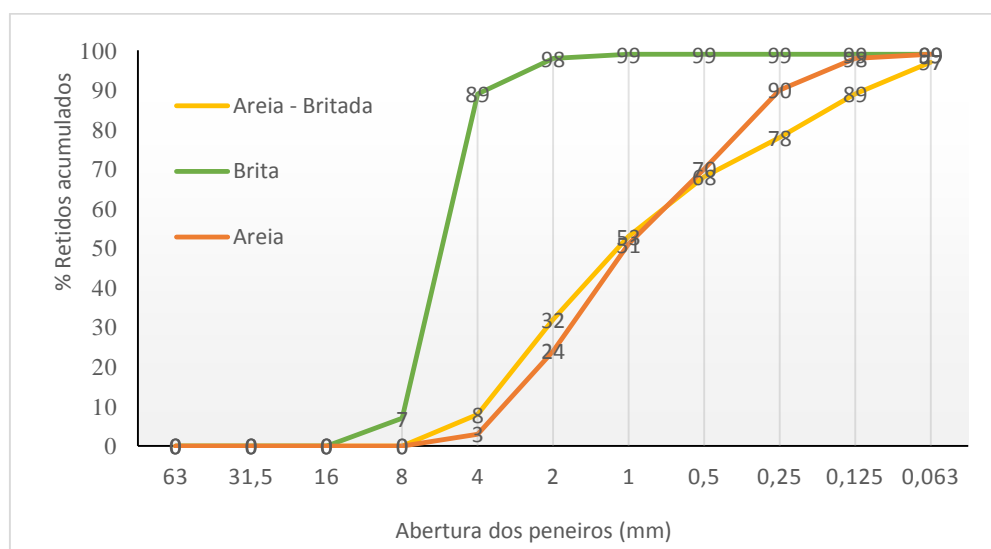


Figura 3.3 – Curva granulométrica dos agregados

De salientar que esta areia foi utilizada em todas as composições, sendo que foi previamente seca na estufa a 100°C, e depois deixada em repouso até atingir a temperatura ambiente.



### 3.2.2 Ligantes

São produtos/materiais que têm a propriedade de aglomerar uma quantidade de materiais, conferindo a este conjunto grande coesão e resistência.

#### 3.2.2.1 Cinzas Volantes

Cinzas volantes são um produto residual, derivado da queima do carvão pulverizado nas caldeiras das centras termoelétricas. Logo têm uma grande disponibilidade no mercado em geral, além de que têm um preço mais baixo em relação a outros ligantes como sejam o cimento Portland, metacaulino, entre outros, porém em relação as suas propriedades mecânicas, não são tão elevadas.

De referir os bons níveis de durabilidade, a baixa necessidade de água de amassadura e eventualmente resistências mecânicas a longo prazo. Em termos químicos as cinzas são constituídas em sua maioria por dióxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ), óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) e óxido de ferro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ).

As cinzas usadas são provenientes do centro de produção de Sines da EDP – Gestão da Produção de Energia, S.A. e tem como características, as apresentadas na tabela 3.3:

Tabela 3.3- Características das cinzas volantes

Características	Valor obtido
Categoria de finura	N
Massa Volumica	2300 kg/m <sup>3</sup>
Valor declarado de finura	16%
Categoria de perda ao fogo	B

#### 3.2.2.2 Metacaulino

O Metacaulino é produzido através do caulino. Para existir esta transformação, é necessário proceder a um tratamento térmico do caulino e assim obter o metacaulino. O metacaulino utilizado foi fornecido pela Mibal. As características do caulino estão apresentados na tabela 3.4, estes valores foram fornecidos pela empresa MIBAL.

Tabela 3.4 – Características do Caulino

Características	Valor obtido
Grau de brancura	75 a 85
Densidade	2400 a 2700 kg/m <sup>3</sup>
Absorção de óleo	34 a 48
pH	6 a 9
Resíduo crivo de 53 u	<0.30%

### 3.2.2.3 Cimento

O cimento utilizado para a preparação dos provetes, foi o Portland CEM I 42.5N, da marca SECIL (figura 3.7) Trata de um material inorgânico fino, com propriedade aglutinantes, e quando adicionado água este torna-se uma pasta homogênea, capaz de endurecer e conservar a sua estrutura.

Tem como principais características químicas, físicas, mecânicas, as que foram fornecidas pelo fabricante e apresentadas nas tabelas 3.5 a 3.7.

Tabela 3.5 – Características Químicas

Propriedades	Método de Ensaio	Valor Especifico
Perda ao Fogo	NP EN 196-2	≤ 5,0 %
Resíduo Insolúvel	NP EN 196-2	≤ 5,0 %
Teor de Sulfatos (em SO <sub>3</sub> )	NP EN 196-2	≤ 4,0 %
Teor de Cloretos	NP EN 196-21	≤ 0,1 %

Tabela 3.6 – Características Mecânicas

Resistência à compressão (MPa), NP EN 196-1		
2 dias	7 dias	28 dias
≥ 20	-	≥ 42.5 a ≤ 62.5

Tabela 3.7 – Características Físicas

<b>Propriedades</b>	<b>Método de Ensaio</b>	<b>Valor Específico</b>
<b>Princípio de Presa</b>	NP EN 196-3	$\geq 60$ min
<b>Expansibilidade</b>	NP EN 196-3	$\leq 10$ mm
<b>Peso específico (kg/cm<sup>3</sup>)</b>	LNEC E 64	3130

#### 3.2.2.4 Cal Hidratada

A cal hidratada é um produto manufaturado que sofre em fábrica o processo de hidratação, sendo que este processo é feito através da junção entre a cal viva (conseguida de um calcário de elevada pureza) com a água.

#### 3.2.3 Ativadores

Como próprio nome indica têm como função ativar, acelerar ou retardar as funções dos ligantes.

##### 3.2.3.1 Hidróxido de Sódio

Trata-se de um material cuja fórmula química é NaOH, conhecida vulgarmente por soda cáustica, sendo comercializada tanto em forma sólida como líquida. No caso deste estudo foi utilizado no estado sólido.

Trata-se de um material que se deve ter cuidado no manuseamento por ter propriedades altamente corrosivas. Com a adição de água tem-se uma libertação de calor e por vezes temos ebulição e ressaltos do produto quente e corrosivo, assim deve-se usar equipamento apropriado, bem como a preparação da solução de hidróxido (hidróxido de sódio + água) deve repousar cerca de 24 horas antes de usar na preparação dos provetes geopoliméricos. Sendo este um problema dado que para preparar os provetes devemos ter anteriormente preparado a solução de hidróxido.

Este ativador foi utilizado com diferentes concentrações de molaridade 10 M, 14 M e 18 M, sendo que a explicação do procedimento adotado para o cálculo desta molaridade será apresentada seguidamente.

### 3.2.3.1.1 Cálculo das razões (H<sub>2</sub>O/NaOH)

O cálculo efetuado, divide-se nas seguintes equações:

$$\frac{\text{Concentração } (\frac{g}{l})}{1l \text{ (água)}} \times \frac{1mol}{\text{Massa Molar}} = \text{Molaridade} \quad (3.1)$$

$$\text{Massa Molar (NaOH)} = 22,989 + 15,999 + 1,007 = 39,995g$$

Agora, recorrendo à fórmula inicial e dando o exemplo de uma molaridade de 10, tem-se:

$$\frac{C}{1} \times \frac{1}{39,995} = 10 \leftrightarrow C = 399,95 \left(\frac{g}{l}\right) \quad (3.2)$$

Assim sabemos que para cada litro de água tem-se 399,95g de hidróxido de sódio, na tabela 3.8, apresenta-se um quadro resumo com as diversas molaridades, bem como as razões entre água e hidróxido de sódio.

Tabela 3.8 – Tabela resumo com as concentrações e as razões em relação a Molaridade

Molaridade	Concentrações (g/l)	Razão H <sub>2</sub> O/NaOH
10	399,95	2,5
14	559,93	1,786
18	719,91	1,389

### 3.2.3.2 Silicato de Sódio

Este material comercializado em sólido ou em solução aquosa, com propriedades alcalinas e adesivas, foi utilizado em solução com a solução de hidróxido de sódio na preparação das composições. Deve-se ter algum cuidado no manuseamento deste material pois pode causar irritação na pele, a sua composição é basicamente constituída por óxido de sódio, Na<sub>2</sub>O, e sílica, Si<sub>2</sub>O.

### 3.2.3.3 Água

A água foi usada tanto na produção dos betões em que tem como função transformar o cimento numa pasta aglomerante, como para a preparação das soluções de hidróxido de sódio.

No caso dos betões a quantidade de água é muito importante, pois dependendo da razão água/cimento, pode-se ter um betão seco e com pequena trabalhabilidade, bem como um betão com baixa resistência devido à elevada quantidade de água.

Neste estudo a água teve como proveniência a rede pública, estando conforme com a EN 1009 (2005).

### 3.2.4 Outros materiais

Neste tópico será feita uma referência a outros materiais que foram utilizados para este estudo.

#### 3.2.4.1 Resina Epoxídica

Trata-se de uma tinta à base de resinas epoxídicas utilizada como revestimentos resistentes a ambientes quimicamente agressivos, neste caso foi utilizada a Sikagard – 62 PT fornecida pela empresa Sika. Alguns dados retirados da ficha técnica fornecida pela empresa estão apresentados na tabela 3.9.

Tabela 3.9 – Dados técnicos

<b>Base química</b>	Resinas de epóxi.
<b>Massa volúmica</b>	1.35±0.03 kg/dm <sup>3</sup>
<b>Teor de sólidos</b>	Aprox. 100% (em volume)/ Aprox. 100% (em peso)
<b>Resistencia Química</b>	Resiste a diversos agentes quimicos

Para efetuar a aplicação desta tinta devemos realizar uma mistura entre os dois componentes numa razão 75 : 25 entre o componente A e B.

### 3.2.4.2 Tinta Acrílica

Trata-se de uma tinta acrílica com excelente resistência a exposição ambiental, neste caso foi utilizada a Sikagard – 660 ES fornecida pela empresa Sika. Alguns dados retirados da ficha técnica fornecida pela empresa estão apresentados na tabela 3.10.

Tabela 3.10 – Dados técnicos

<b>Base química</b>	<b>Resinas acrílicas em solvente</b>
<b>Massa volúmica</b>	1.30±0.02 kg/dm <sup>3</sup>
<b>Teor de sólidos</b>	Aprox. 43% (em volume)
<b>Permeabilidade à água</b>	W = 0.003kg/m <sup>2</sup> .h <sup>-1/2</sup> (Classe III – Baixa)

Neste caso a tinta já está pronta a aplicar, bastando apenas homogeneizar bem o produto antes de usar.

### 3.2.4.3 Ácidos

Foram usados 3 ácidos, sulfúrico, nítrico e clorídrico, com as concentrações de 98%,60% e 33% para os ensaios.

## 3.3 Composição, Mistura e Cura

Com o objetivo de proceder à realização deste trabalho foi necessário escolher as duas composições que melhor respondiam ao problema deste estudo, para tal, foi necessário proceder à preparação de várias misturas de amassaduras, fazendo variar tanto a molaridade da solução de hidróxido de sódio (10,14 e18), como o ligante (cinzas volantes ou metacaulino), como apresentado na tabela 3.11 e 3.12. Foi usada uma composição base (N. Dias, 2012) que foi trabalhada, como ponto de partida para a realização de todas as outras

amassaduras, a razão utilizada no caso das argamassas geopoliméricas à base de cinzas volantes foi 2.1/1/0,6 (agregado/ligantes/ativador), por outro lado no caso das argamassas geopoliméricas com base de metacaulino foi 2.1/1.0/1.05, neste caso foi necessário alterar as razões uma vez que com as razões da composição base, não existia nenhuma trabalhabilidade, assim foi necessário realizar varias amassaduras até chegar a uma em que tivéssemos a mesma trabalhabilidade que o geopolímero com cinzas, para se ter alguma forma de os poder comparar.

Tabela 3.11 – Composição das argamassas geopoliméricas com cinzas volantes

Massa Molar	Materiais (g)					Volume (mm <sup>3</sup> )
	Areia	Cinzas Volantes	Cal Hidratada	Solução Hidróxido	Silicato de sódio	
10	1150	493	55	99	247	768000
14						
18						
	Massa Molar	Hidróxido Sódio	Água			
	10	29	70			
	14	36	63			
	18	42	57			

Tabela 3.12 – Composição das argamassas geopoliméricas com metacaulino

Massa Molar	Materiais (g)					Volume (mm <sup>3</sup> )
	Areia	Metacaulino	Cal Hidratada	Solução Hidróxido	Silicato de sódio	
10	1150	493	55	165	411	768000
14						
18						
	Massa Molar	Hidróxido de sódio	Água			
	10	47,1	117,9			
	14	59,2	105,8			
	18	69,1	95,9			

Posteriormente houve a necessidade de produzir os provetes de betão usados como base para os revestimentos. Para tal foram usados dois tipos um betão convencional (BC) e um betão de elevado desempenho (BED). A composição destes betões (tabela 3.13) foi feita a partir

do método de Faury (folha de cálculo Excel elaborada por Camões A. 2011), esta escolha deveu-se sobretudo a necessidade de criar os betões com o máximo de compactação possível, devido ao tipo de ensaio que estariam sujeitos. O teor de humidade não foi levado em conta na preparação das composições uma vez que os agregados foram previamente secos em estufa antes da sua utilização, sendo apenas contabilizado a sua absorção de água. Além da necessidade do aumento de 1.23 da dosagem de cimento.

Tabela 3.13 – Composições dos betões

Material	BED				BC			
	Dosagens por m <sup>3</sup> de Betão		Dosagens para uma amassadura de betão (l)		Dosagens por m <sup>3</sup> de Betão		Dosagens para uma amassadura de betão (l)	
cimento	442,80	kg	11,07	kg	270,60	kg	6,77	kg
areia britada (0-4)	876,35	kg	21,91	kg	1135,47	kg	28,39	kg
brita (4-8)	782,79	kg	19,57	kg	732,94	kg	18,32	kg
água	205,71	l	5,14	l	182,56	l	4,56	l
Razão A/C	<b>0.45</b>				<b>0.65</b>			

### 3.3.1 Produção

Para a preparação dos geopolímeros, foram seguidas algumas etapas:

1. Com 24 horas de antecedência, este deve ser o primeiro passo, que passa por produzir a solução de hidróxido de sódio com a água. Porém, devem ser tidos em atenção alguns factos, já que a reação entre a água e o hidróxido de sódio é fortemente exotérmica, ou seja liberta muito calor, o tipo de recipiente escolhido deve ter em atenção esse problema. Seguindo o mesmo problema deve-se adicionar cuidadosamente o hidróxido de sódio, e ter em atenção a evaporação de água resultante da reação. Assim, dependendo da concentração adicionou-se uma maior quantidade de água, chegando a um aumento de 10% no caso da concentração de 18 Molar. Por fim fechar o recipiente com proteção da luz;



2. Adicionar no balde da misturadora (figura 3.14) o agregado com os ligantes, durante certa de 300 segundos em velocidade lenta;



Figura 3.4 – Misturadoras normalizadas

3. Adicionar o ativador (hidróxido e silicato), misturado homogeneamente à mistura, durante 180 segundos numa velocidade lenta;
4. Aumentar a velocidade durante 60 segundos, ter em atenção que no caso dos geopolímeros com cinzas volantes a reação dá-se de uma forma muito rápida.

Para a compactação de cada mistura foi utilizada a mesa vibratória (figura 3.15) durante 30s, quanto a suas trabalhabilidades esta era diferente em cada composição indo diminuindo a medida que aumentávamos a concentração, sendo que no caso das concentrações de 18 molar com cinzas volantes o tempo para introduzir nos moldes era muito escasso. Os provetes foram logo moldados, ao fim da preparação das argamassas, e permaneceram no Laboratório de Materiais de Construção a uma temperatura ambiente durante 24 horas, passados este tempo, foram desmoldados (figura 3.16), sendo posteriormente conservados numa caixa fechada protegida da luz e mantida a uma temperatura ambiente.



Figura 3.5 – Equipamento vibratório



Figura 3.6 – Moldagem dos provetes

No caso da preparação dos betões:

Existe a necessidade de ter algum cuidado para que a mistura fique homogénea, assim o procedimento de trabalho foi feito com um pouco da experiência laboratorial, assim sendo a preparação seguida foi a seguinte:

1. Adição na betoneira dos agregados com a seguinte ordem (de maior dimensão para a menor), brita seguida pela areia britada. Misturá-los na betoneira (figura 3.17) durante cerca de 120 segundos;



Figura 3.7 – Betoneira utilizada

2. Introdução do ligante (cimento Portland) e misturá-los durante 120 segundos;
3. Adição de cerca de 70% de água na amassadura durante 120 segundos (figura 3.18);



Figura 3.8 – Adição da água

4. Ir adicionando os 30% de água a mistura durante 120 segundos;
5. Misturar durante mais 120 segundos.

Após a execução das amassaduras, procedeu-se à moldagem dos provetes (figura 3.19), usando a máquina vibratória para conseguir uma melhor compactação, durante 30 segundos. A sua desmoldagem foi efetuada depois de os provetes terem permanecido durante 24 horas à temperatura ambiente.



Figura 3.9 – Esquema da preparação, moldagem e desmoldagem dos provetes

### 3.4 Ensaios

Neste tópico será feita referência ao tipo de ensaios usados, bem como uma descrição destes. A caracterização mecânica foi efetuada aos 28 dias.

Foram feitos ensaios de resistência e de durabilidade tanto em argamassas como em betões. Na figura 3.20 está representado o esquema da utilização dos provetes de argamassa nos ensaios. A maior parte dos ensaios são semelhantes tendo apenas algumas diferenças. Em seguida serão apresentados, em maior rigor, o procedimento adaptado para cada um dos ensaios realizados.

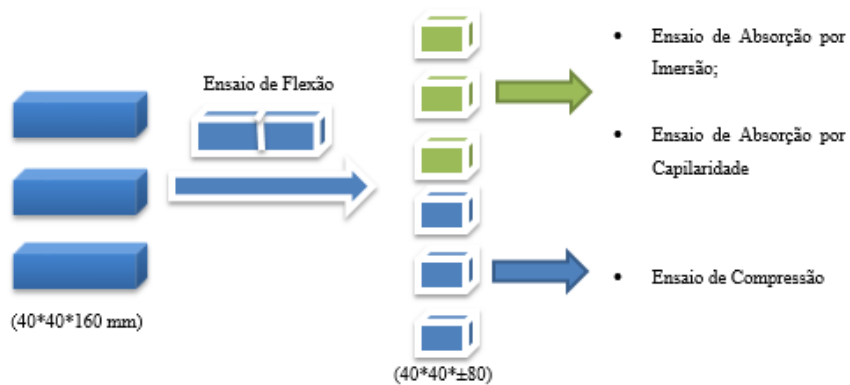


Figura 3.10 – Esquema da utilização dos provetes

### 3.4.1 Ensaio de Consistência

#### 3.4.1.1 Argamassas

Trata-se de um ensaio efetuado quando a argamassa ainda está fresca, logo após cessar a sua produção, assim podemos avaliar a sua trabalhabilidade, e se pode ou não ser útil para o estudo em causa.

Para tal foram usados os procedimentos adotados na Norma Europeia EN 1015-3:

1. Antes de proceder ao ensaio, deve-se verificar o estado do equipamento, quanto à sua limpeza e secagem. Posteriormente, prepara-se o equipamento espalhando óleo de uma forma cuidada, para não afetar o ensaio, sobre todas as peças do equipamento (molde tronco-cónico, mesa de espalhamento e varão metálico de compactação) (figura 3.21).



Figura 3.11 – Mesa de espalhamento

2. Colocando o molde no centro da mesa, vai-se enchendo em duas camadas aproximadamente iguais, sendo estas compactadas com 10 apiloamentos, com o varão metálico normalizado, tendo a atenção que estes devem ser distribuídos sobre toda a superfície e devem ter força suficiente para atingir a espessura da camada, de forma que se tente eliminar os vazios;
3. Alisa-se a superfície da argamassa, retirando-se os excessos;
4. Procede-se ao levantamento do cone, de uma forma vertical, e seguidamente com a manivela faz-se 15 batidas, com uma velocidade de 1 por segundo;



5. Por fim efetua-se a medição do diâmetro da argamassa espalhada com uma régua segundo as três direções assinaladas na mesa de espalhamento.
6. Sendo que o valor de espalhamento é o resultado da média aritmética entre os diâmetros ( $D_{med}$ ):

$$Espalhamento = D_{med} - 100 \quad (\%) \quad (3.3)$$

### 3.4.1.2 Betões

No caso dos betões, a sua trabalhabilidade foi avaliada através do ensaio de abaixamento (*Slump*), após a execução da amassadura, de acordo com a NP EN 12350-2 (1999). Para tal seguiu-se o seguinte procedimento:

1. Enchimento por camadas com 1/3 da altura, ou seja 3 camadas do cone de Abrams (figura 3.22);



Figura 3.12 – Imagem representativa do cone de Abrams

2. Ao fim de cada camada proceder à compactação com 25 pancadas com o varão de compactação;
3. Proceder-se ao nivelamento da superfície, quando esta chega ao topo do cone, e num movimento firme vertical durante 10 segundos retira-se o cone, sem transmitir movimentos laterais;
4. O abaixamento deve ser simétrico, caso esta condição não se verifique, repete-se o ensaio;
5. A medição é feita desde o topo do cone de Abrams até ao topo da mistura (figura 3.23)



Figura 3.13 – Procedimento para fazer a medição

### 3.4.2 Ensaio de Resistência à Flexão

Este ensaio foi feito segundo a norma EN 1015-11 (1999). Para tal foram utilizados series de 3 provetes com  $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$ , para cada composição, aos 28 dias. Foi utilizada uma máquina universal de ensaio (figura 3.24), LLOYD LR30K (EN ISO 7500-1, 2004), para proceder à realização dos ensaios.



Figura 3.14 – Equipamento usado para o ensaio de flexão

O procedimento foi o seguinte:

1. Primeiro efetuou-se a marcação nos provetes, para que eles posteriormente fossem posicionadas sobre os dois apoios cilíndricos do equipamento, de forma a ficarem centrados e assim o centro do provete coincida sobre o ponto de aplicação da força;
2. Vai-se aproximando o cutelo com cuidado da superfície superior do provete;
3. Liga-se a máquina que de uma forma gradual vai aplicando uma carga, com uma velocidade de 15N/s, parando quando se verificar a rotura do provete;
4. A força de rotura é retirada posteriormente, através do software NEXYGEN plus, instalado na máquina de ensaio, que nos fornece um gráfico relacionado com a carga efetuada.
5. A tensão de cedência é calculada pela seguinte expressão (3.4):

$$f = 1.5 \frac{F.l}{b.d^2} \quad (3.4)$$

Sendo que:

f - resistência à flexão (N/mm<sup>2</sup>);

F- valor da carga máxima aplicada à amostra (N);

l – distância entre os eixos de apoio que suportam o provete (mm)

b- largura do provete (mm)

d – altura do provete (mm)

Os valores finais resultam da média aritmética entre os 3 provetes.

### 3.4.3 Ensaio de Resistência à Compressão

Para conhecer a resistência a compressão foi necessário proceder a um ensaio de compressão. Para tal foram utilizadas 3 metades originadas do ensaio de flexão dos provetes (40x40x160 mm<sup>3</sup>), ficando desta forma provetes [40x40x(±80)] mm<sup>3</sup>. Este procedimento foi adotado para cada composição e o ensaio decorreu aos 28 dias de idade.

No caso dos betões, os provetes utilizados tinham o tamanho de (100x100x100 mm<sup>3</sup>), e um tempo de cura de 28 dias. Os ensaios realizados foram feitos adaptando a NP EN 12390-3 (2009) no caso dos betões e EN 1015-11(1999) para as argamassas.



Para tal foi usada uma máquina universal de ensaio (figura 3.25) da marca ELE, com uma unidade de medida digital DK38, e um transdutor de força C18/3MN I. Na tabela 3.14 estão referenciadas as características da máquina.



Figura 3.15 – Equipamento utilizado no ensaio de compressão

Tabela 3.14 – Características do instrumento

<b>Capacidade</b>	<b>30 kN</b>
<b>Banda de Velocidades</b>	0.001 a 508 mm/min
<b>Precisão da Velocidade</b>	< 0.2 % no estado estacionário
<b>Máximo deslocamento</b>	870 mm
<b>Largura entre colunas</b>	404 mm
<b>Resolução mínima</b>	0.001
<b>Precisão da carga</b>	0.5 %
<b>Extensão da resolução</b>	0.05 microns
<b>Extensómetro</b>	Analógico ou digital
<b>Sistema de medida de carga</b>	EN ISO 7500: 2004 Class 0.5 ASTM E4
<b>Temperatura de operação</b>	5°C a 35°C

Sendo que o valor da resistência é obtido a partir da equação apresentada em baixo, desta forma o valor de cada composição é feita a partir da média aritmética de 3 provetes.

$$f = \frac{F}{A} \quad (3.5)$$

Onde,

F – resistência à compressão (MPa);

F – carga máxima de rotura (N);

A – área de aplicação da carga (40 x 40 mm<sup>2</sup>)

#### 3.4.4 Ensaio de Absorção por Imersão

Trata-se de um ensaio ligado à durabilidade e consiste na avaliação das diferenças de massas dos provetes imersos em água e secos. Para a realização deste ensaio utilizou-se 3 metades originárias do ensaio de flexão [40x40x(±80)] mm<sup>3</sup> (figura 3.26) aos 28 dias para cada composição.

No caso dos betões os provetes tinham a dimensão de (100x100x100) mm<sup>3</sup>, e um tempo de cura de 28 dias (figura 3.26).



Figura 3.16 – Provetes utilizados no ensaio (lado esquerdo – Argamassas geopoliméricas; lado direito – Betões de cimento Portland)

O procedimento adotado foi o da especificação do LNEC E 394 (1993), consistindo no seguinte:

1. Secagem dos provetes numa estufa a  $105 \pm 5^\circ\text{C}$  até se obter uma massa constante, a pesagem destes provetes foi realizada com um intervalo de 24 horas, tendo como paragem a condição de se obter uma variação  $\leq 0,1\%$ ;
2. Seguidamente passou-se à introdução do provete num recipiente com água proveniente da rede pública a uma temperatura de  $10 \pm 5^\circ\text{C}$ , até se conseguir uma massa constante, utilizando a mesma condição que a etapa anterior, sendo que esta massa foi considerada  $m_1$ . A imersão dos provetes foi realizada de uma forma sucessiva 1/3, 2/3 e 3/3 do provete com um intervalo de 1 hora, tendo em atenção como recomendado pela especificação do LNEC E 394 (1993), em que o nível da água não deve ultrapassar os 20 mm da superfície superior dos provetes;
3. Secou-se a superfície com um pano absorvente húmido, antes de cada pesagem com o objetivo de remover toda a água superficial;
4. Pesou o provete dentro de água ( $m_2$ ), sendo  $m_2$  a massa hidrostática, após saturação;
5. Secagem dos provetes em estufa a  $105 \pm 5^\circ\text{C}$  até se obter uma massa constante ( $m_3$ ), com um intervalo de 24 horas, utilizando como condição de paragem a mesma dos passos anteriores.
6. Por fim os resultados são retirados utilizando a seguinte expressão:

$$Ai = \frac{m_1 - m_3}{m_1 - m_2} \times 100 \quad (3.6)$$

Em que,

$m_1$  – é a massa do provete saturado no ar (g);

$m_2$  – é a massa hidrostática do provete saturado (g);

$m_3$  – é a massa do provete seco (g);

$Ai$  – é o valor da absorção de água por imersão (%).

### 3.4.5 Ensaio de Absorção por Capilaridade

Trata-se de outro ensaio relacionado com a durabilidade (figura 3.27), é um ensaio semelhante ao anterior, mas com varias nuances, como seja o facto de apenas uma das faces

estar em contacto com a água durante um determinado tempo, e a necessidade da utilização dos provetes secos.

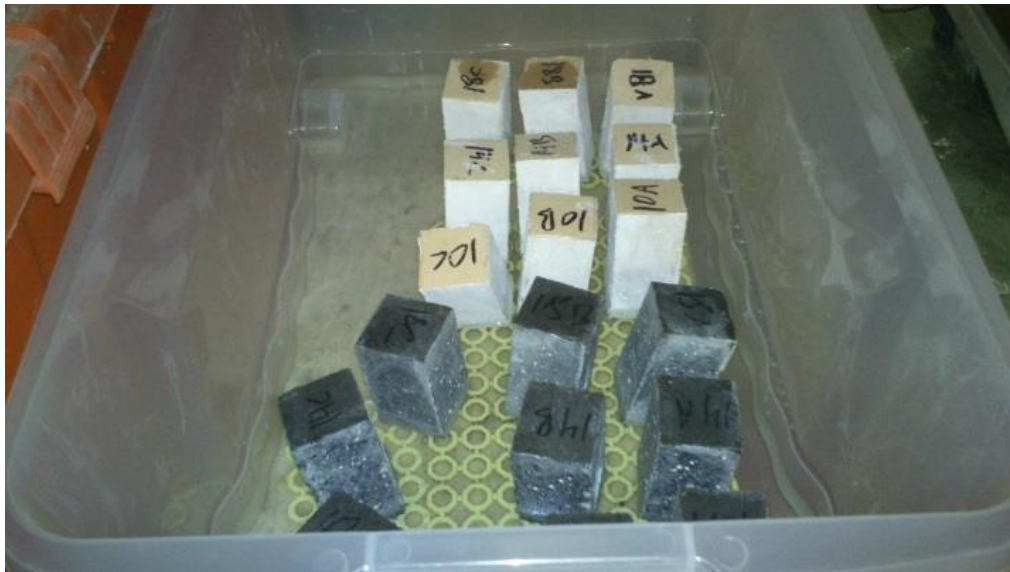


Figura 3.17 – Provetes de argamassas geopoliméricas durante o ensaio

Para a realização deste ensaio utilizou-se 3 provetes com  $[40 \times 40 \times (\pm 80)] \text{ mm}^3$  para cada uma das composições no caso das argamassas e no caso dos betões os provetes  $(100 \times 100 \times 100) \text{ mm}^3$  para cada uma das composições. O procedimento adotado foi de acordo com a especificação do LNEC E 393 (1993):

1. Procedeu-se à secagem dos provetes em estufa a  $105 \pm 5^\circ\text{C}$  até se obter uma massa constante ( $M_0$ ), segundo um intervalo de 24 horas e com a condição de paragem de se obter uma variação  $\leq 0,1\%$ ;
2. Colocar no fundo do recipiente os suportes destinados a manter a face inferior do provete em contacto com a água, e fazer o tratamento das faces laterais, de forma a impermeabilizá-las com silicone;
3. Procurar uma temperatura de  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  e uma humidade de  $65 \pm 5\%$  para posicionar o recipiente;
4. De uma forma cuidadosa proceder ao enchimento do recipiente sem molhar as outras faces, até se obter um nível de água com  $10 \pm 1 \text{ mm}$  da face inferior do provete;
5. Fechar o recipiente com o objetivo de manter o nível da água constante durante o ensaio;

6. Fazer as medições ao fim de tempo ( $t_i$ ) iguais a 0, 5, 10, 20, 30, 60, 90, 120, 180, 240, 300, 360, 420, 480 minutos a contar desde a colocação dos provetes em contacto com a água. Proceder à leitura ao fim de 24 horas com um intervalo de medições de 90 min, depois ao fim de 48 horas de 3 em 3 horas, fazendo o mesmo para 72 horas e assim sucessivamente até se obter a condição de paragem;
7. Para efetuar as medições, deve-se retirar os provetes do recipiente para uma base plana não absorvente, permitindo que a água esorra durante um tempo de  $30 \pm 5$  segundos. Pesa-se o provete e volta-se a colocar no recipiente, e regista-se a massa ( $M_i$ ) com o tempo ( $t_i$ );
8. O resultado da absorção de água é obtida pela seguinte expressão:

$$AC = \frac{M_i - M_0}{A} \times 1000 \quad (3.7)$$

Sendo que,

$M_0$  – é a massa do provete seco (gr);

$M_i$  – é a massa do provete a um tempo ( $i$ ) (gr);

$t_i$  – tempo decorrido desde o início do ensaio (min);

$A$  – área da superfície inferior em contacto com a água ( $\text{mm}^2$ );

$Ac$  – valor de absorção de água por capilaridade, ( $\text{kg}/\text{m}^2$ ).

9. Por fim o valor do coeficiente de absorção de água por capilaridade ( $C$ ) expresso em  $[\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \sqrt{\text{horas}})]$  é obtido pela determinação do declive da recta para um intervalo dos valores de tempo de ensaio.

### 3.4.6 Ataque Químico

Antes de realizar o ensaio propriamente dito, houve a necessidade de preparar os provetes para o estudo em causa, ou seja proceder ao revestimento destes. Foram utilizados 4 revestimentos, 2 argamassas geopoliméricas com 1 cm em cada uma das faces e 2 tintas com duas camadas em cada face (parâmetro este devido as fichas técnicas), o revestimento foi feito sobre provetes de betão (BC) ( $100 \times 100 \times 100$ )  $\text{mm}^3$  com 28 dias de cura (figura 3.28).

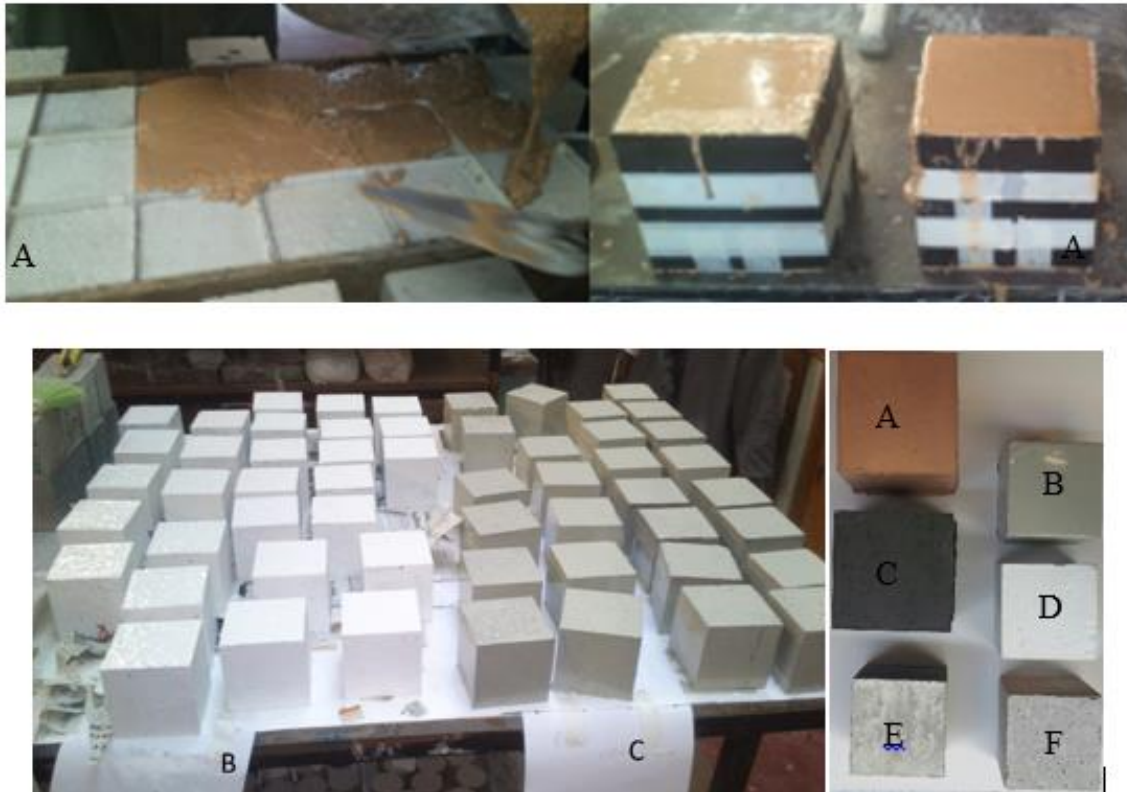


Figura 3.18 – Preparação dos provetes e resultados finais (A – revestimento com argamassa geopolimérica à base de metacaulino, B – revestimento com tinta epoxídica, C – revestimento com argamassa geopolimérica à base de cinzas volantes, D – revestimento com tinta epoxídica, E – BC e F – BED)

O ensaio propriamente dito incidu, como foi anteriormente referido sobre provetes (100x100x100) mm<sup>3</sup> com e sem revestimento, para todos estes provetes foram usados 3 ácidos (sulfúrico, nítrico e clorídrico) cada um deles com 3 concentrações diferentes (10%, 20% e 30%).

O procedimento de acordo com as normas ASTM C-267 (2006) e a EN 13529 (2003), da seguinte forma:

1. Numa primeira fase como foi referido anteriormente houve uma preparação dos provetes;
2. Preparação dos recipientes com os ácidos, água e os suportes dos provetes (figura 3.29);
3. Registo da pesagem ( $W_0$ ) (usada uma balança com 2 casas decimais), e uma breve descrição da cor e aparência da superfície dos provetes;





Figura 3.19 – Preparação dos provetes e início do ensaio

4. Colocação dos provetes nos recipientes com as soluções ácidas (ácido + água), ter em atenção que os provetes devem estar completamente submersos e estar com pelo menos 1 cm de cada uma das superfícies em contacto com o ácido. Por último tapar o recipiente usado;
5. Examinar os provetes aos 1, 3, 7, 14, 21, 28 e 56 dias de imersão, para assim determinar a taxa de ataque a que foi submetido, para isto deve-se:
  - 5.1. Retirar os provetes do recipiente;
  - 5.2. Limpar os provetes em água corrida e secá-los com uma toalha de papel em cada lavagem;
  - 5.3. Deixar os provetes a secar durante 30 min;
  - 5.4. Registo da pesagem ( $W_i$ ), com uma breve descrição da aparência das superfícies do provete;
6. O resultado da perda de massa é obtido pela seguinte fórmula, para cada um dos provetes, sendo que no final faz-se a média aritmética:

$$\text{Perda de massa}(\%) = \frac{W_i - W_0}{W_0} \times 100 \quad (3.8)$$

Onde,

$W_0$  – é a massa do provete antes do início do ensaio (g);

$W_i$  – é a massa do provete depois da imersão na solução (g).



## 4 ANÁLISE DE RESULTADOS

Serão apresentados neste capítulo os resultados dos ensaios realizados durante este projeto. Estes serão apresentados e analisados, através de gráficos e tabelas, para ser mais perceptível a sua análise.

### 4.1 Trabalhabilidade

Aqui vão ser abordados os ensaios de abaixamento dos betões e o de espalhamento das argamassas geopoliméricas.

#### 4.1.1 Ensaio de Espalhamento

Na figura 4.1 estão apresentados os resultados obtidos do espalhamento das argamassas geopoliméricas em função da sua concentração molar e do seu tipo de ligante (cinzas volantes ou metacaulino).

Pode-se dizer que as argamassas com a mesma concentração molar (M) têm consistências muito semelhantes, existindo um pequeno aumento (em media 3.33%) entre os geopolímeros com cinzas volantes (CV) em relação aos geopolímeros com metacaulino (MK). De referir também um decréscimo da consistência em relação ao aumento da concentração molar.

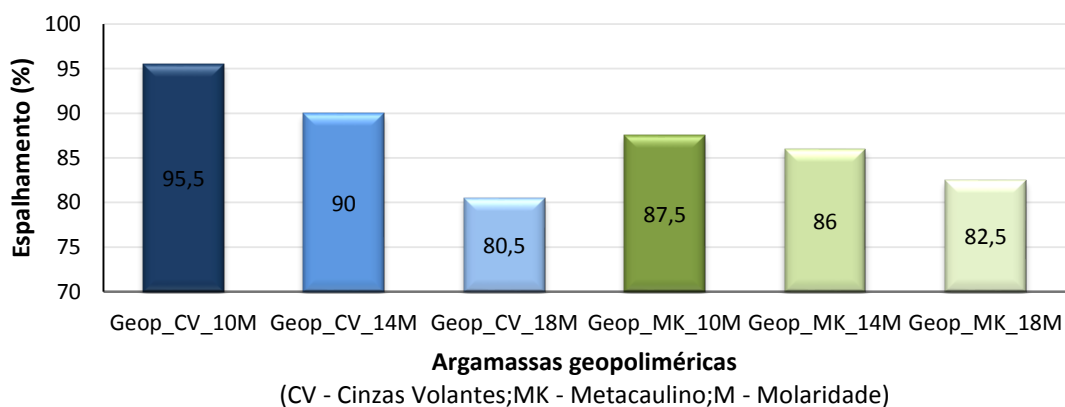


Figura 4.1 – Espalhamento em relação à concentração molar e tipo de ligante

Na tabela 4.1, e já falando da trabalhabilidade do material, pode-se ver as composições utilizadas bem como o tempo até que o material endurecia ou ficava com uma trabalhabilidade praticamente nula. Estes tempos foram obtidos pela média das várias misturas efetuadas, a partir do momento que se desligava a misturadora.

De realçar que, como foi relatado no capítulo anterior houve a necessidade de alterar a razão entre o ligante e o ativador no caso das argamassas com metacaulino, para tentar manter a mesma trabalhabilidade. Já que com a razão apresentada no caso das cinzas, o resultado era uma pasta completamente seca.

Tabela 4.1 – Composições das argamassas geopoliméricas, suas consistências e tempos de endurecimento

Composição	Agregado		Ligante		Ativador		Consistência (%)	Tempo de endurecimento (min)
	Areia (g)	Metacaulino (MK)/Cinzas volantes (CV) (g)	Cal (g)	Hidróxido de sódio (g)	Água (g)	Silicato de sódio (g)		
Geop_CV_10M				29	70		95,5	60
Geop_CV_14M	1150	493	55	36	63	247	90	30
Geop_CV_18M				42	57		80,5	8
Geop_MK_10M				47	118		87,5	>60
Geop_MK_14M	1150	493	55	59	106	411	86	60
Geop_MK_18M				69	96		82,5	45

Na globalidade as argamassas geopoliméricas com cinzas volantes endurecem muito mais rapidamente que as com metacaulino, isto pode dever-se ao facto de as cinzas volantes reagirem mais rápido com a solução de hidróxido e silicato. No caso da argamassa geopolimérica com cinzas volantes e com uma concentração de 18M, o tempo era mesmo muito escasso, chegando em alguns casos a argamassa a endurecer mal se punha na mesa de espalhamento.

Em relação às argamassas com metacaulino, estas eram muito viscosas, fazendo com que não fosse muito fácil trabalhar com elas, enquanto no caso das cinzas, estas eram muito mais fluidas. Sendo esta uma possível razão de o metacaulino ter uma menor consistência.

### 4.1.2 Ensaio de Abaixamento

Na tabela 4.2 e na figura 4.2 estão apresentadas as composições utilizadas, as quantidades dos materiais utilizadas para a realização dos betões, bem como o valor de abaixamento.

Tabela 4.2 – Composições e valores de abaixamento obtidos

Composição	Areia britada (kg/m <sup>3</sup> )	Brita (kg/m <sup>3</sup> )	Cimento (kg/m <sup>3</sup> )	Água (l/m <sup>3</sup> )	Abaixamento (mm)	Classe de abaixamento
BC	1135,47	732,94	270,6	182,56	35	S1
BED	876,35	782,79	442,8	205,71	75	S2

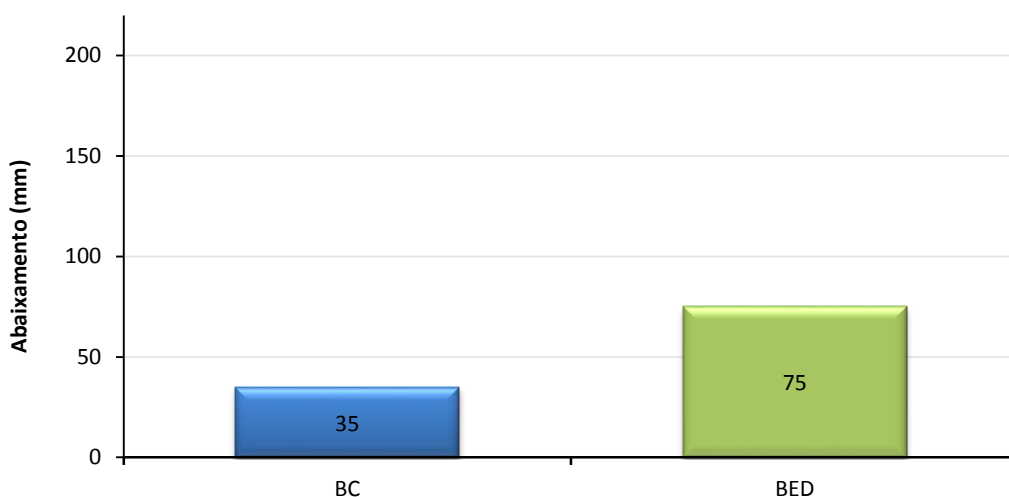


Figura 4.2 – Abaixamento obtido para cada composição

Com estes dados pode-se dizer que o betão BC obtido, foi um betão seco, enquanto BED tem umas propriedades bem mais razoáveis. Isto deve-se ao facto da composição BC ter uma razão água/ligante muito mais elevada.

## 4.2 Ensaio de Compressão

Será feita uma divisão neste tópico em relação aos assuntos abordados, por um lado teremos o ensaio efetuado para os betões e a sua análise, por outro as argamassas bem como a sua análise.

### 4.2.1 Argamassas

Na figura 4.3 estão apresentados os gráficos referentes aos valores obtidos para a resistência a compressão aos 28 dias para as argamassas geopoliméricas.

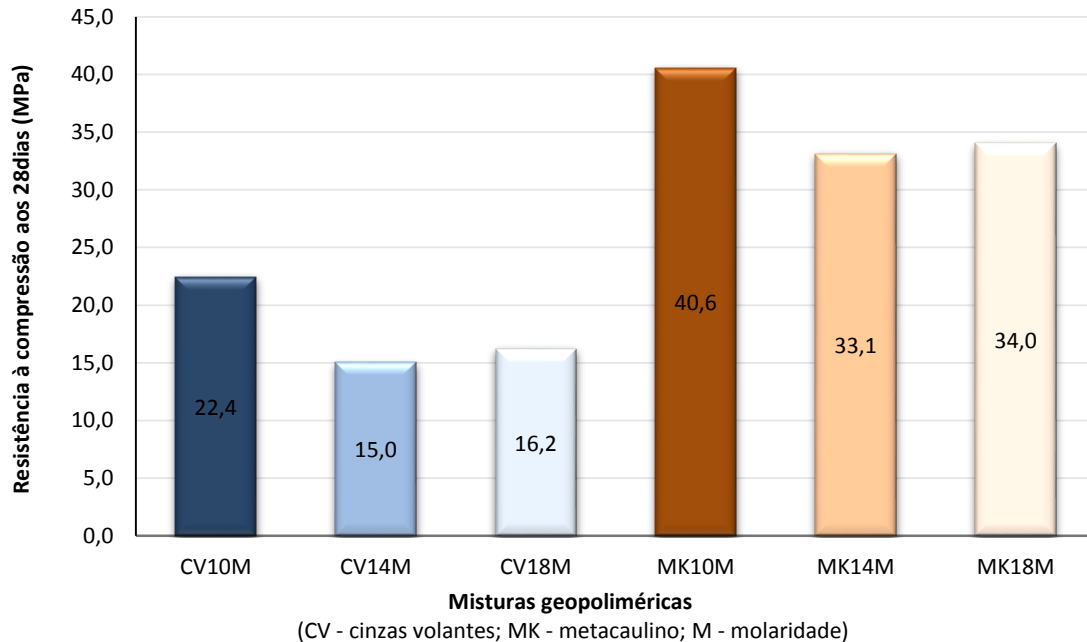


Figura 4.3 – Valores obtidos de resistência a compressão aos 28 dias

Na globalidade os valores são mais elevados (cerca de 28.8% em média) para as misturas com metacaulino o que se fica a dever à maior reactividade deste aluminossilicato. Em ambos os casos os valores mais elevados são aqueles para as concentrações de 10M. Entre as concentrações de 14M e 18M, existe novamente um aumento, ainda que pequeno, isto pode querer dizer que existe um intervalo de concentrações para o qual os geopolímeros criados têm piores propriedades. Estes resultados são contrários aos obtidos por outros autores nomeadamente (Pacheco-Torgal, 2007) o qual constatou que ao aumento da concentração do hidróxido de sódio correspondia sempre um aumento da resistência à compressão. A explicação para o ocorrido pode ficar a dever-se ao aumento da viscosidade das amostras que não permitiu uma adequada colocação e compactação das mesmas levando por esta via a uma redução da sua resistência à compressão.

#### 4.2.2 Betões

Foi feita uma análise a provetes (100x100x100) mm<sup>3</sup> com 28 dias de cura, sendo esta feita ao ambiente. Na figura 4.4 esta apresentado um gráfico que aborda a resistência a compressão de ambas as misturas, enquanto na tabela 4.3 estão apresentados os dados referentes à resistência à compressão.

Tabela 4.3 – Valores da resistência à compressão dos betões com 28 dias

Composição	Provetes	Dimensões (mm)	Carga (KN)	Resistencia à compressão (Mpa)	Media (Mpa)
BC	A	100x100x100	292,3	29,2	29,3
	B		292,2	29,2	
	C		294	29,4	
BED	A	100x100x100	451,8	45,2	46,2
	B		451,5	45,2	
	C		481,5	48,2	

De reter a grande diferença em relação à resistência de compressão, entre os dois tipos de betão. Este ensaio serviu de ajuda para fazer uma escolha sobre o tipo de betão que era escolhido para ser revestido (BC).

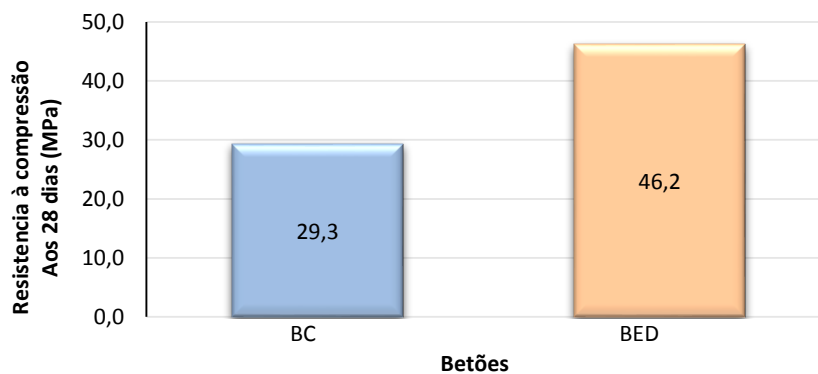


Figura 4.4 – Resistência à compressão dos betões

### 4.3 Resistência à flexão

Na figura 4.5 estão apresentados os valores da resistência à flexão de cada argamassa, estes valores correspondem a provetes ensaiados aos 28 dias com as dimensões (40x40x160) mm<sup>3</sup>.

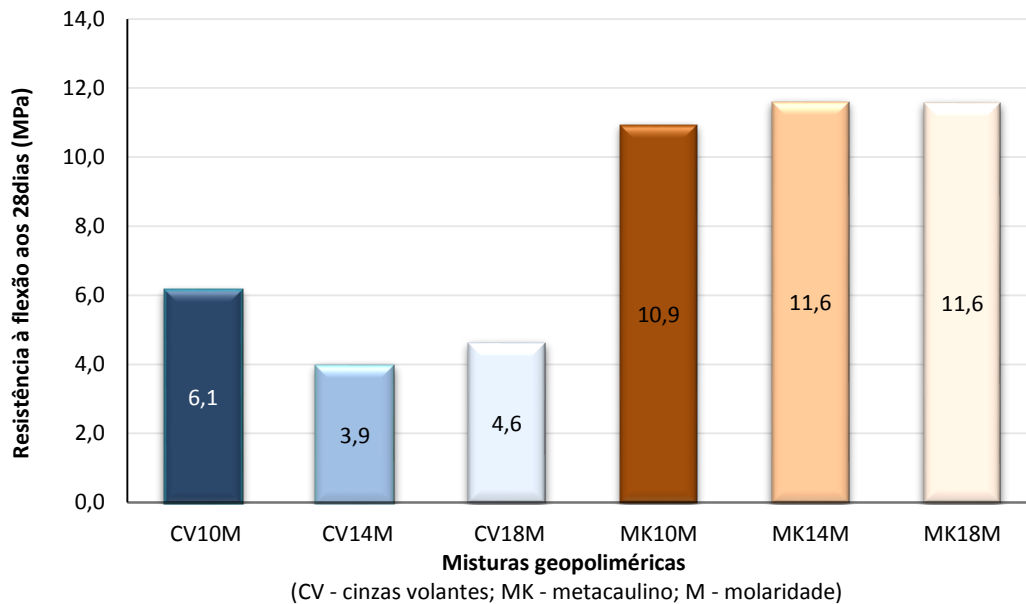


Figura 4.5 – Valores da resistência à flexão das várias argamassas aos 28 dias

Percebe-se que as resistências à flexão dos geopolímeros com cinzas volantes, têm valores muito mais baixos em relação ao metacaulino. Quanto ao aumento da concentração de hidróxido de sódio, as conclusões não são muito explícitas, uma vez que no caso do metacaulino, os valores são muito próximos. Podendo este facto dever-se ao facto de que alguns provetes apresentaram retração.

Esta retração pode dever-se ao facto de que a cura foi feita a temperatura ambiente, apesar de se ter tentado controlar as condições para estas serem as mesmas para todos os provetes, fechando os provetes em caixas térmicas. No caso das argamassas com cinzas o aumento da concentração segue a mesma lógica que no ensaio da resistência à compressão.

### 4.4 Absorção de água por imersão

Neste tópico serão abordados os valores relativos a absorção de água por imersão das argamassas e dos betões, sendo estes dois materiais estudados separadamente.

#### 4.4.1 Argamassas

Neste capítulo serão abordados os valores referentes aos provetes ensaiados aos 28 dias com as dimensões (40x40x80) mm<sup>3</sup>. Para tal recorreu-se ao gráfico apresentado na figura 4.6 e a tabela 4.4 para uma apresentação dos resultados.

Tabela 4.4 – Resultados obtidos do ensaio de absorção de água por imersão das argamassas geopoliméricas

	Composição	Secção (mm)	Valores Médios			
			M <sub>1</sub> (g)	M <sub>2</sub> (g)	M <sub>3</sub> (g)	Absorção (%)
Argamassas geopoliméricas	CV_10M	40x40x80	253,37	148,30	275,97	17,69
	CV_14M		253,00	149,30	279,30	20,25
	CV_18M		250,43	148,90	277,57	21,07
	MK_10M		253,37	137,37	261,17	5,84
	MK_14M		253,00	138,20	265,53	9,61
	MK_18M		250,43	147,20	280,97	22,48

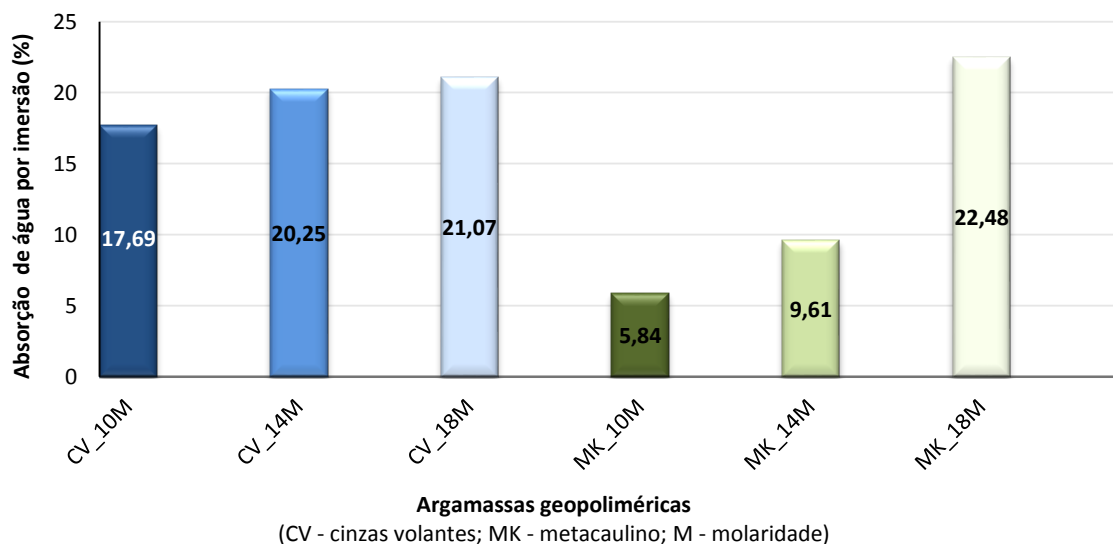


Figura 4.6 - Resultados obtidos do ensaio de absorção de água por imersão das argamassas geopoliméricas

Em ambos os casos existe um aumento da absorção à medida que se aumenta a molaridade, este facto poderá dever-se à diminuição do tempo de endurecimento, e assim deixando mais espaços vazios, ficando então a argamassa mais porosa. O tempo de endurecimento pode representar também uma justificação perante o facto de as argamassas com cinzas terem na generalidade dos casos uma absorção mais acentuada que no caso do metacaulino.

No caso da concentração de 18 molar apresentada na argamassa geopolimérica com metacaulino, os resultados obtidos podem justificar-se por eventual problema de colocação e compactação o que levou a uma maior porosidade e permite explicar a sua menor resistência à compressão.

#### 4.4.2 Betões

Para a realização deste ensaio foram usados provetes (100x100x100) mm<sup>3</sup> com 28 dias, os valores obtidos estão apresentados na tabela 4.5.

Tabela 4.5 – Valores obtidos do ensaio de absorção de água por imersão para os provetes de betão

Composição	Secção (mm)	M <sub>1</sub> (g)	M <sub>2</sub> (g)	M <sub>3</sub> (g)	Absorção (%)
BC	100x100x100	2247,03	1395,37	2402,10	15,40
BED		2204,13	1352,70	2350,50	14,67

A partir destes valores, pode-se referir que a mistura BC é a mais porosa, isto deve-se a quantidade de ligante que é maior no caso BED. Um outro facto é o de que o BED como é menos poroso, ou seja mais resistente a entrada de água, faz com que seja plausível que no ensaio químico, tenha também um melhor resultado.



## 4.5 Ensaio de absorção por capilaridade

Mais uma vez será subdividido o ensaio em 2 grupos, argamassas e betões. Em ambos os casos os provetes utilizados tinham 28 dias.

### 4.5.1 Argamassas

Nas figuras 4.7 a 4.9 estão representados os valores obtidos a partir da média de três provetes (40x40x80) mm<sup>3</sup>. Esta análise foi feita através de curvas, representando a quantidade de água absorvida por unidade de superfície em contacto com a água em razão da raiz quadrada do tempo.

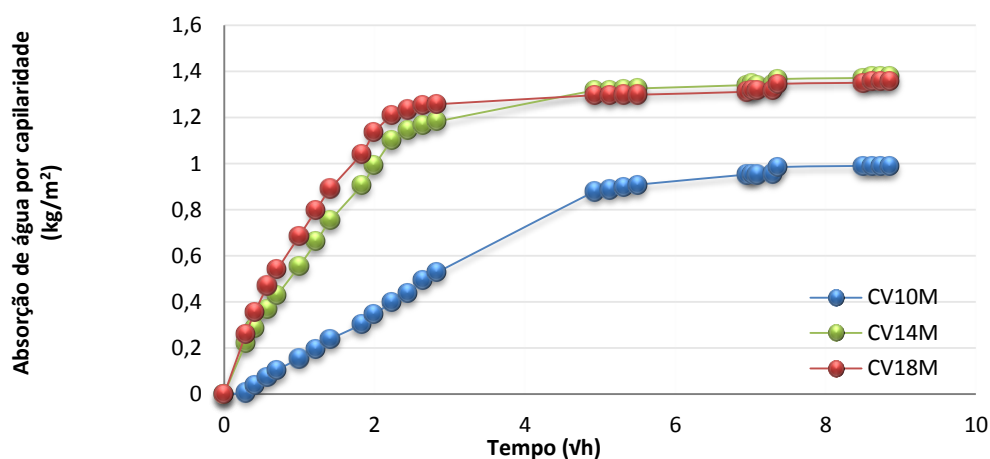


Figura 4.7 – Absorção de água por capilaridade para as argamassas geopoliméricas com cinzas volantes (CV – cinzas volantes; M – molaridade)

Pode-se ver que a mistura com menor concentração de hidróxido de sódio é aquela também com menor absorção de água. À medida que esta concentração aumenta, a absorção também é maior, aproximando-se os valores no caso CV14M e CV18M.

Já no caso da figura 4.8, existe uma aproximação de todas as misturas, no que toca à absorção de água por capilaridade propriamente dita. Porém, continua a concentração menor de CV10M a ter a menor absorção de água.

Em ambas as figuras (4.7 e 4.8) pode ver-se, que à medida que se aumenta a quantidade de hidróxido de sódio, mais água é absorvida num curto espaço de tempo. Ou seja as curvas são mais acentuadas para as concentrações mais elevadas. Uma justificação, pode ser o facto de

que como a presa se dá muito mais rapidamente nas concentrações mais elevadas, tem-se mais porosidade. O que não acontece tão acentuadamente no caso de concentrações mais baixas.

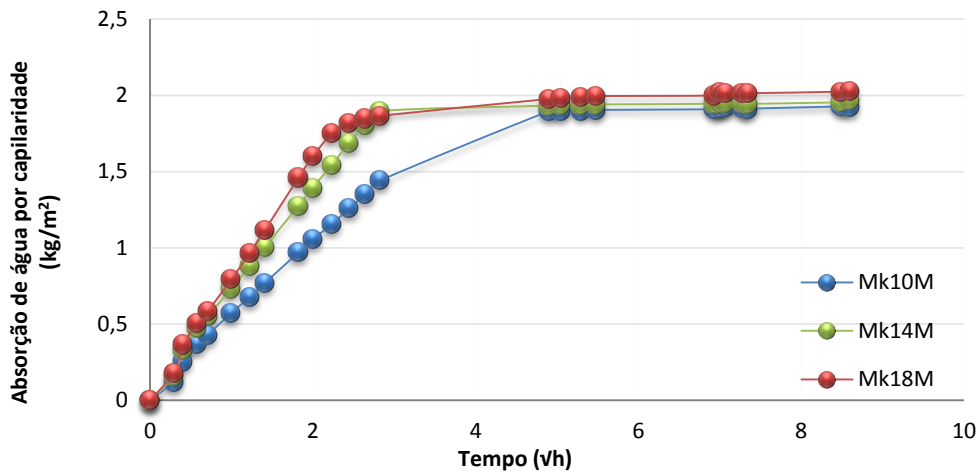


Figura 4.8 - Absorção de água por capilaridade para as argamassas geopoliméricas com metacaulino (Mk – metacaulino; M – molaridade)

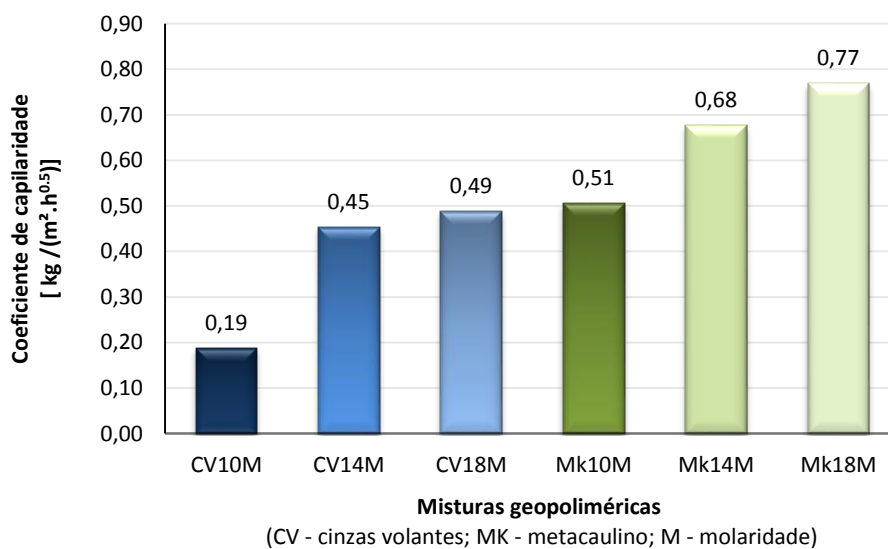


Figura 4.9 – Coeficiente de capilaridade das misturas geopoliméricas

Na figura 4.9, estão apresentados os valores dos coeficientes de capilaridade para todas as misturas. Sendo que estes valores são obtidos a partir da média dos três provetes. Fica claro a diferença entre as misturas com cinzas volantes e as com metacaulino, este facto pode dever-se à retracção, uma vez que os provetes com metacaulino apresentavam maior retracção

que os de cinzas volantes. Em ambos os casos à medida que se aumenta a molaridade, tem-se, também, um aumento do coeficiente de capilaridade.

Concluindo-se que a incorporação de cinzas volantes em detrimento do metacaulino, e utilização de concentrações mais baixas de hidróxido de sódio, permite obter argamassas geopoliméricas com menos capacidade de absorver a água, e menos porosas.

Em relação ao artigo Pacheco-Torgal et al. (2012) onde são ensaiados betões com incorporação de cinzas volantes e metacaulino, obtendo coeficientes de capilaridade médios de  $0.58 \text{ kg/m}^2$  o que significa que as argamassas geopoliméricas apresentam resultados muito semelhantes.

#### 4.5.2 Betões

Foram utilizados provetes ( $100 \times 100 \times 100$ )  $\text{mm}^3$  aos 28 dias, os resultados obtidos estão apresentados nas figuras 4.10 e 4.11.

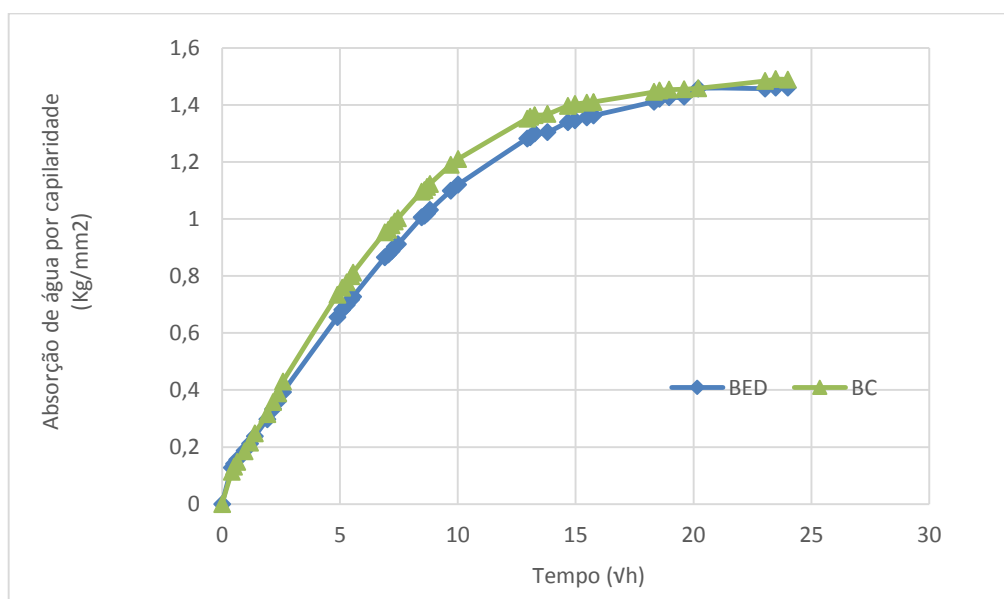


Figura 4.10 – Absorção de água por capilaridade dos provetes de betão

Não existe uma clara diferença entre os dois tipos de betão, mas apesar disso, nota-se que os provetes BED têm uma menor absorção quando comparados com os provetes BC.

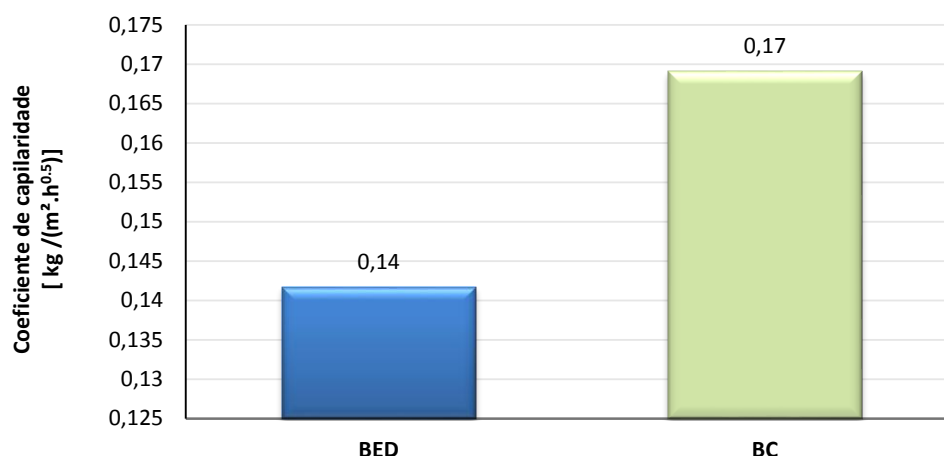


Figura 4.11 – Coeficiente de capilaridade dos provetes de betão

Mais uma vez não se nota uma diferença grande entre os provetes, continuamos a ter o BED com menor coeficiente de capilaridade.

## 4.6 Ataque químico – Ácidos

Para a realização deste ensaio foram analisados os ensaios anteriores, para a escolha das melhores misturas geopoliméricas. Assim, tendo em conta a análise dos ensaios executados anteriormente, as melhores misturas são a CV10M e a MK10M. Esta análise foi feita tendo em atenção quais seriam os melhores aspetos para proceder a este ensaio, dado que se trata do ensaio base desta dissertação.

Estas argamassas foram utilizadas como revestimentos (cerca de 1cm) dos betões BC, os outros materiais utilizados como revestimentos foram, a tinta acrílica e a resina epoxídica. Foram utilizados também os provetes BED e BC sem revestimentos.

Na análise do ensaio químico, será feita uma divisão em relação ao ácido utilizado, para uma melhor compreensão dos dados obtidos.

### 4.6.1 Ácido sulfúrico

Nas figuras 4.12, 4.14 e 4.16 estão representadas as perdas de massa (%) de todos os provetes em relação a concentração de ácido utilizado (30%, 20% e 10%). Em relação com as imagens

dos provetes, estes estão apresentados em anexo. O ensaio decorreu durante 56 dias, sendo que as pesagens foram feitas aos dias 1, 3, 7, 14, 21, 28 e 56.

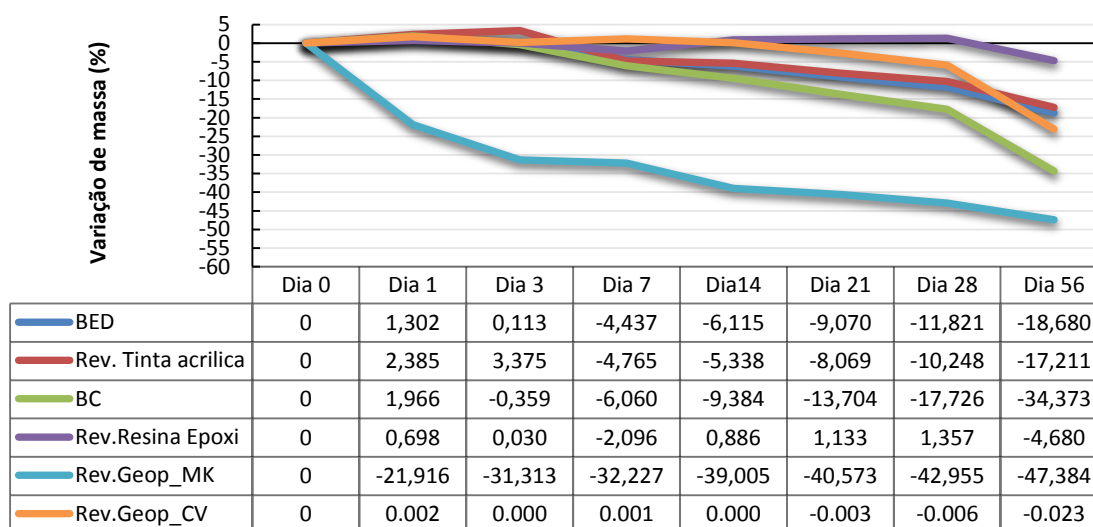


Figura 4.12 – Valores obtidos do ataque ácido sulfúrico (30%)

Analisando a figura 4.12, desde já percebe-se que os provetes que tinham o revestimento do geopolímero com metacaulino (Rev.Geop\_MK), foi claramente o que sofreu maior dano, sofrendo logo no primeiro dia uma perda de perto de 22% da sua massa. O revestimento propriamente dito teve um desgaste muito acentuado figura 4.13.



Figura 4.13 – Provede de betão revestido com argamassa geopolimérica a base de metacaulino um dia após contacto com o ácido sulfúrico (C=30%)

O melhor material foi sem dúvida a resina epoxídica, que teve uma perda de massa muito reduzida. Isto deve-se às propriedades da tinta, que reagem pouco com o ácido. Ao fim dos 14 dias notava-se um rompimento da tinta nos cantos do provete, fazendo com que este

tivesse aumentado de peso, uma vez que a solução conseguia penetrar no provete mas não conseguia sair na totalidade.

O geopolímero com cinzas volantes (Rev.Geop\_CV), teve um comportamento muito positivo durante os primeiros 28 dias, tendo uma quebra muito grande dos 28 aos 56 dias.

O BED e a tinta acrílica tiveram umas perdas sempre graduais. Porém no caso da tinta acrílica ela desapareceu ao fim de 3 dias figura 4.14. Em relação ao BC o seu desgaste também foi muito acentuado, próximo do geopolímero com metacaulino, isto deve-se ao facto de este material ser mais poroso do que BED e não ter nenhuma proteção.



Figura 4.14 – Provete de betão revestido com tinta acrílica após 3 dias de contacto com o ácido sulfúrico (C=30%)

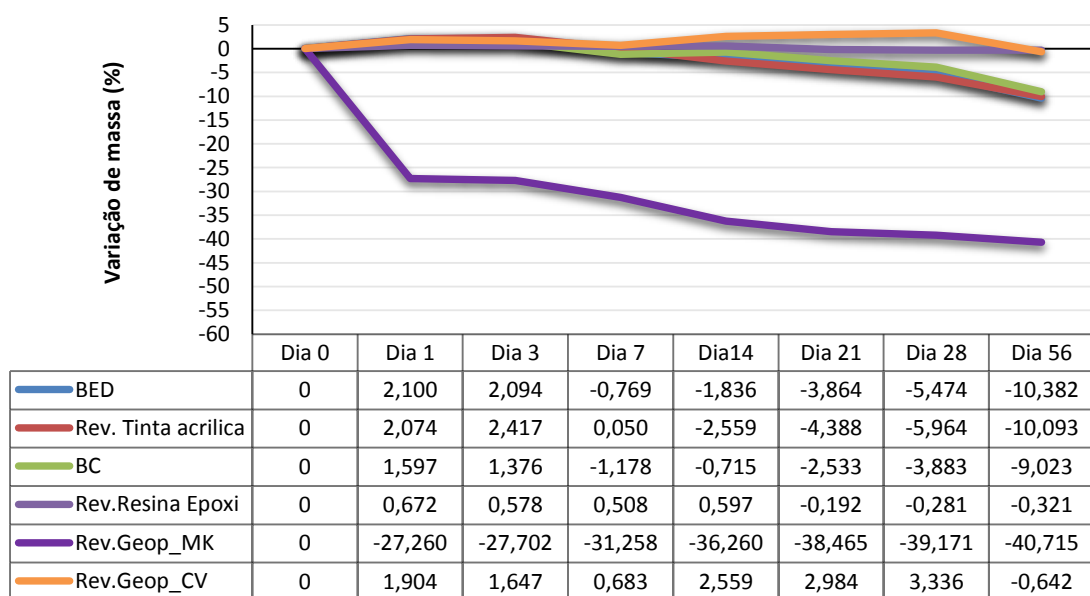


Figura 4.15 – Valores obtidos do ataque do ácido sulfúrico (20%)

Na figura 4.15, continuamos a ter o mesmo acontecimento, o geopolímero com metacaulino continua a ter uma reação muito rápida, conduzindo a uma elevada perda de massa. De realçar o revestimento do geopolímero com cinzas volantes que tem umas perdas de massa baixas, muito próximas da resina epoxídica. Isto deve-se, sobretudo, às boas características das cinzas volantes ao ataque químico e a elevada retração do geopolímero com metacaulino que quando impedida origina fissuras ou deslocamentos.

Em relação aos outros materiais, existe uma clara aproximação entre eles, isto poderá dever-se à diminuição da concentração do ácido.

Em relação à figura 4.16, de realçar a quase inexistente perda de massa do revestimento com resina epóxi e a sua comparação com o geopolímero com cinzas volantes que tem também uma reduzida perda de massa.

No caso do geopolímero com metacaulino nota-se um decréscimo na perda de massa, porém continua muito acima de todos os outros materiais. O comportamento do BED também teve uma melhoria muito significativa, notando-se claramente a diminuição da concentração do ácido.

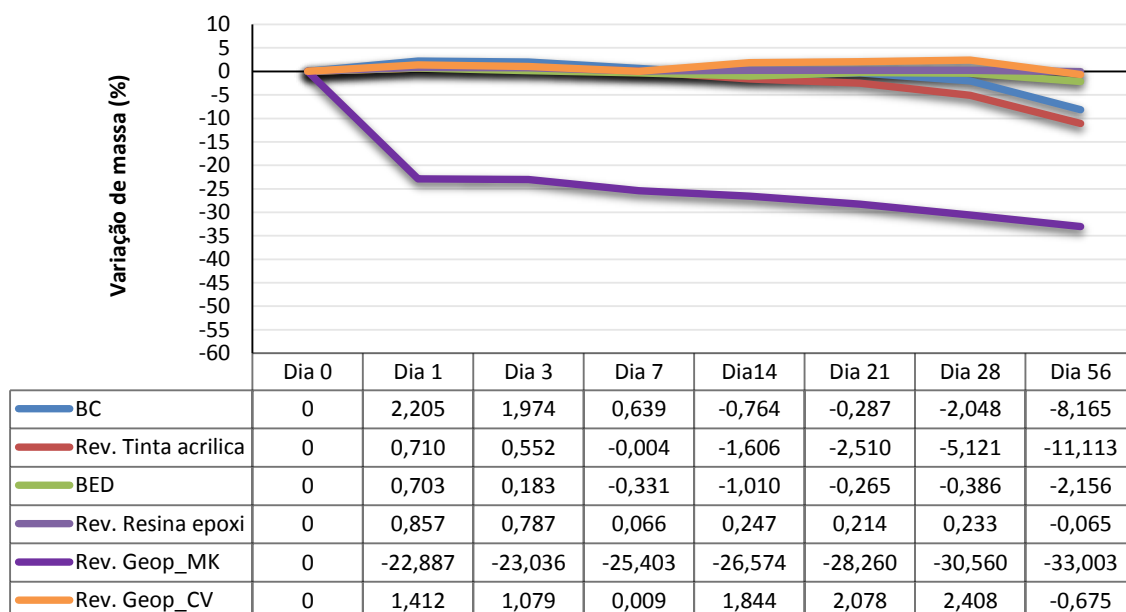


Figura 4.16 – Valores obtidos do ataque do ácido sulfúrico (10%)

Em relação à tinta acrílica, não se notou a diminuição da concentração do ácido sulfúrico, uma vez que ao fim dos 3 primeiros dias a tinta já tinha desaparecido praticamente toda, notando-se uma rápida reação entre a tinta e o ácido.

O BC revela uma diminuição da perda de massa quando comparada com as outras concentrações.

Um facto que aconteceu na globalidade dos casos foi um aumento do peso nos primeiros dias, uma das razões, pode ser devido à solução preencher os espaços vazios do material, fazendo com que este aumente de peso, e à medida que vai acontecendo a reação, teremos então uma perda de massa gradual.

Existe uma diminuição de perda de massa gradual em praticamente todos os materiais à medida que se diminui a concentração, isto deve-se sobretudo à diminuição também da velocidade e poder de reação do próprio ácido.

Claramente o material mais afetado é o geopolímero com metacaulino, tendo tido em todas as concentrações perdas muito elevadas. Os materiais que têm melhor comportamento são a resina epoxídica, que mantém uma perda muito reduzida em todos os casos, seguidamente o geopolímero com cinzas que apresenta bons resultados para concentrações mais baixas (20% e 10%), porém para 30% apresentam elevadas perdas. Por outro lado o BED apresenta um nível de perdas muito constante, tendo o seu valor mais elevado aos 30% e mais baixo aos 10%.

#### **4.6.2 Ácido Nítrico**

Os resultados obtidos no ensaio com o ácido nítrico, estão expressos nas figuras 4.17 a 4.19, divididas por concentrações (30%, 20% e 10%). Tal como aconteceu no ácido sulfúrico foram utilizados os mesmos tempos para as pesagens, e os mesmos tipos de provetes. As imagens relativas aos provetes ensaiados estão apresentados em anexo.

Na figura 4.17, temos logo uma clara diferença em relação ao ácido sulfúrico, o facto de os provetes com tinta acrílica não terem tido uma degradação tão elevada. Na realidade a tinta manteve-se quase intacta.



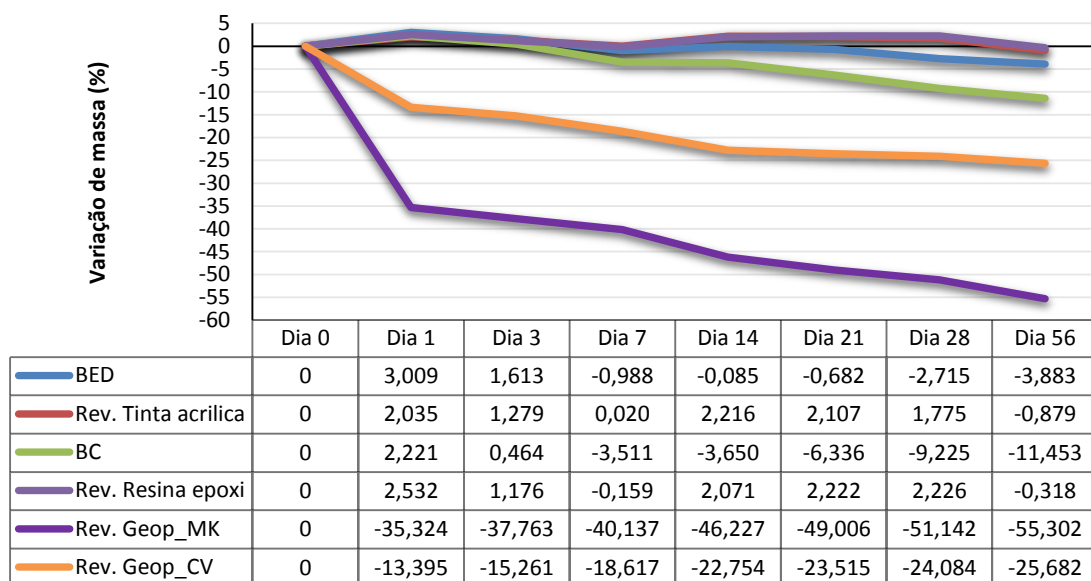


Figura 4.17 – Valores obtidos do ataque do ácido nítrico (concentração = 30%)

Por outro lado temos os provetes revestidos com argamassas geopoliméricas à base de cinzas volantes, que tiveram uma grande perda de massa, o que sugere logo à partida que as cinzas não têm grande resistência contra todos os ácidos.

Em relação à resina epoxídica, tal como aconteceu com os provetes revestidos com tinta acrílica, tiveram poucos danos. Tendo acabado o ensaio com a tinta praticamente intacta.

No que aos geopolímeros com metacaulino diz respeito, teve a mais elevada perda de massa de todos os outros materiais, ao fim do primeiro dia o revestimento já tinha desaparecido, quase na totalidade.

Os provetes BC e BED seguem a mesma lógica, que aparecia no caso do ácido sulfúrico. Tendo a nuance de existir na globalidade dos dois, uma menor perda de massa, o que sugere uma maior resistência a este tipo de ácido.

Em relação à figura 4.18, temos uma quebra no que toca à perda de massa muito significativa em relação às cinzas volantes, foi o material que teve um maior diferencial de perda entre as duas concentrações dos ácidos.

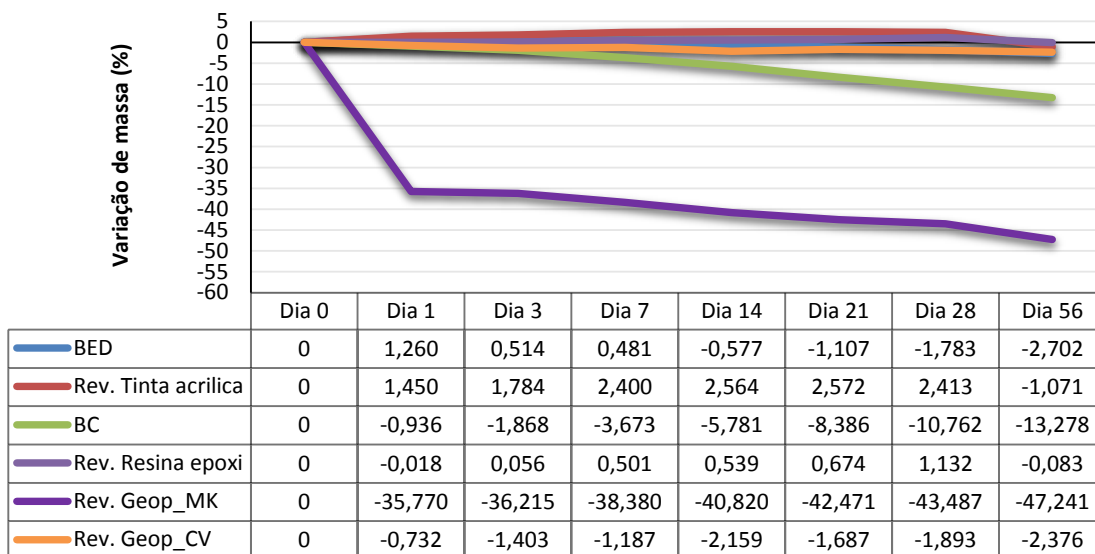


Figura 4.18 – Valores obtidos do ataque do ácido nítrico (concentração = 20%)

No lado oposto temos o revestimento com tinta acrílica e o BC, que tiveram uma maior perda que na outra concentração, ainda que a diferença seja pequena.

O revestimento com argamassas geopoliméricas à base de metacaulino e resinas epoxídicas, tiveram uma diminuição significativa face à concentração mais elevada. No caso do geopolímero com metacaulino, a sua perda continua a ser muito elevada face a todos os outros materiais.

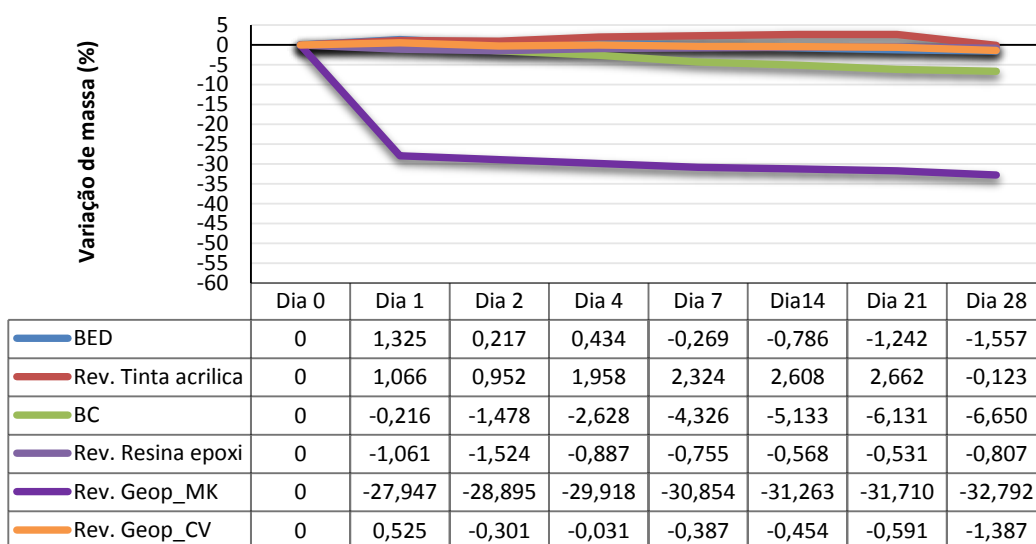


Figura 4.19 – Valores obtidos do ataque do ácido nítrico (concentração = 10%)

No caso da figura 4.19, apresenta-se uma perda muito ligeira na quase globalidade dos materiais, sendo a exceção a argamassa geopolimérica com metacaulino, que apesar de apresentar um decréscimo significativo face às concentrações mais elevadas, continua a ter elevadas perdas de massa.

Em relação ao Rev.Geop\_CV, pode dizer-se que tem uma boa resistência ao ácido nítrico para concentrações mais baixas (<20%), tendo apenas perdas ligeiras de massa. Porém a figura 4.17 sugere que quando aumentamos a concentração do ácido, as suas perdas são logo muito elevadas.

Tanto a resina epoxídica como a tinta acrílica, em todas as concentrações ensaiadas, apresentou bons resultados, sem perdas muito significativas. No caso da tinta acrílica nota-se uma grande melhoria quando comparados os valores com as mesmas concentrações do ácido sulfúrico, o que sugere a incompatibilidade de tratamento para estes tipos de ácidos.

No caso de BC e BED, os valores quando comparados com os valores obtidos no ácido sulfúrico, têm também uma quebra significativa, sendo mais predominante nas concentrações mais elevadas.

### **4.6.3 Ácido clorídrico**

Em relação ao ácido clorídrico, os valores referentes às perdas de massa estão registados nas figuras 4.20 a 4.22. A metodologia adotada foi a mesma que a utilizada para os ácidos anteriormente referidos.

Pode-se referir segundo a figura 4.20, que os revestimentos com tintas (acrílica e resina epoxídica), não tiveram praticamente desgaste, mantendo o seu capeamento até ao fim do ensaio.

Em relação ao BC e Rev.Geop\_CV, tiveram perdas significativas, ainda que menores que 10%. O BED teve um bom comportamento, sem grande desgaste, mantendo perdas muito próximas das apresentadas no ácido nítrico.

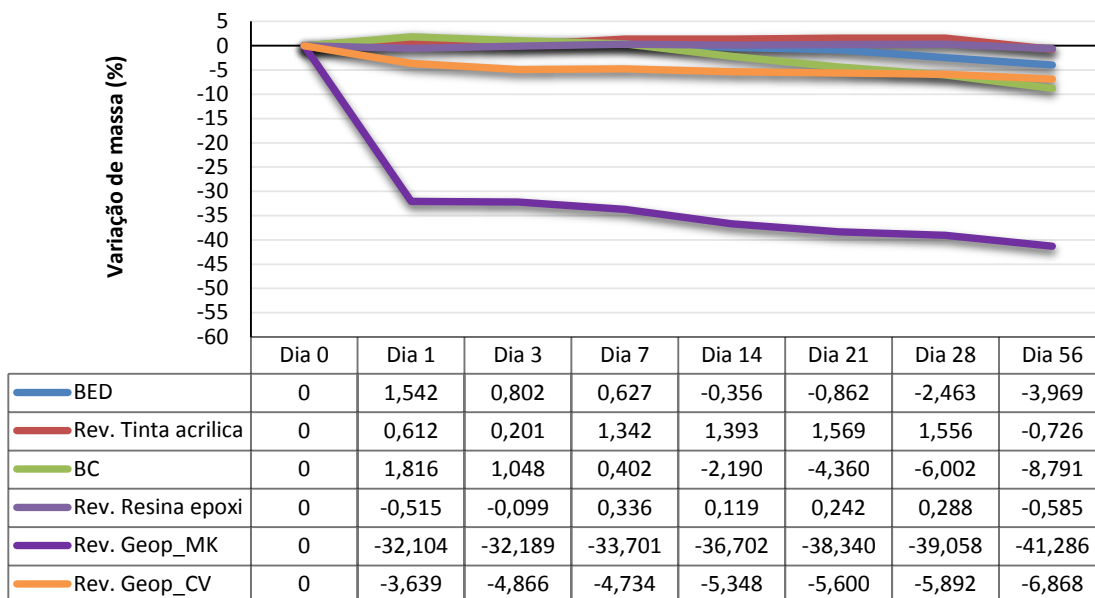


Figura 4.20 – Valores obtidos do ataque do ácido clorídrico (concentração = 30%)

O Rev.Geop\_MK, teve mais uma vez perdas muito elevadas, sendo de longe aquele que apresentou maiores danos. O seu revestimento ao fim do 1º dia já tinha desaparecido quase todo.

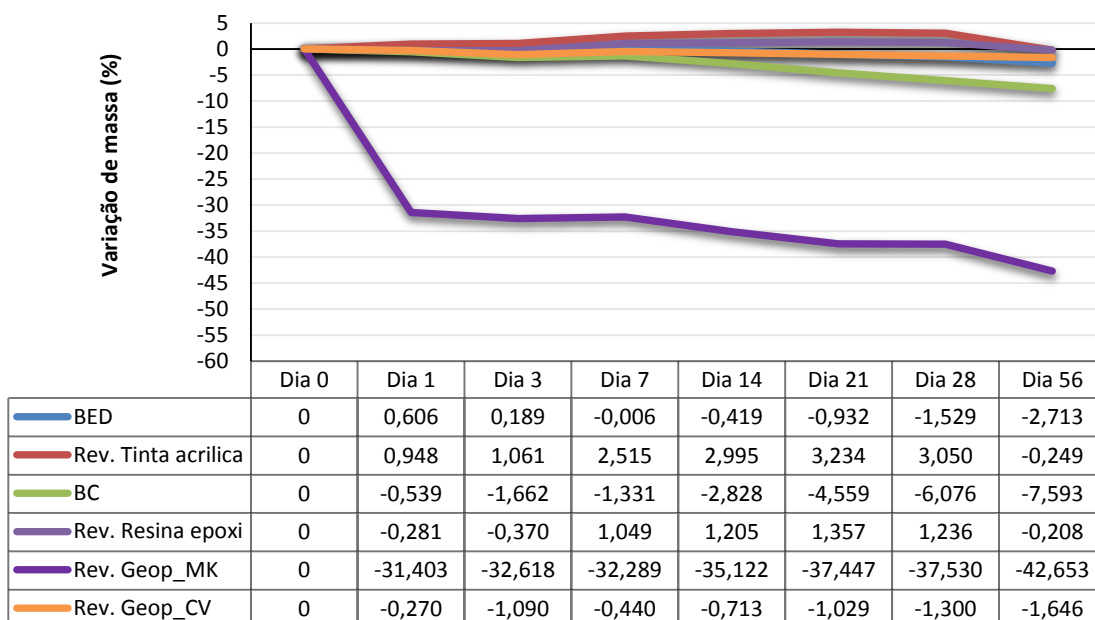


Figura 4.21 – Valores obtidos do ataque do ácido clorídrico (concentração = 20%)

As figuras 4.21 e 4.22, não revelam uma grande diferença de valores em relação às perdas de massa. Aliás em todas as concentrações as perdas apresentadas são muito semelhantes, o

que poderá dizer que não existe grande poder reativo neste ácido, uma vez que à medida que diminuimos a sua concentração as perdas se vão mantendo.

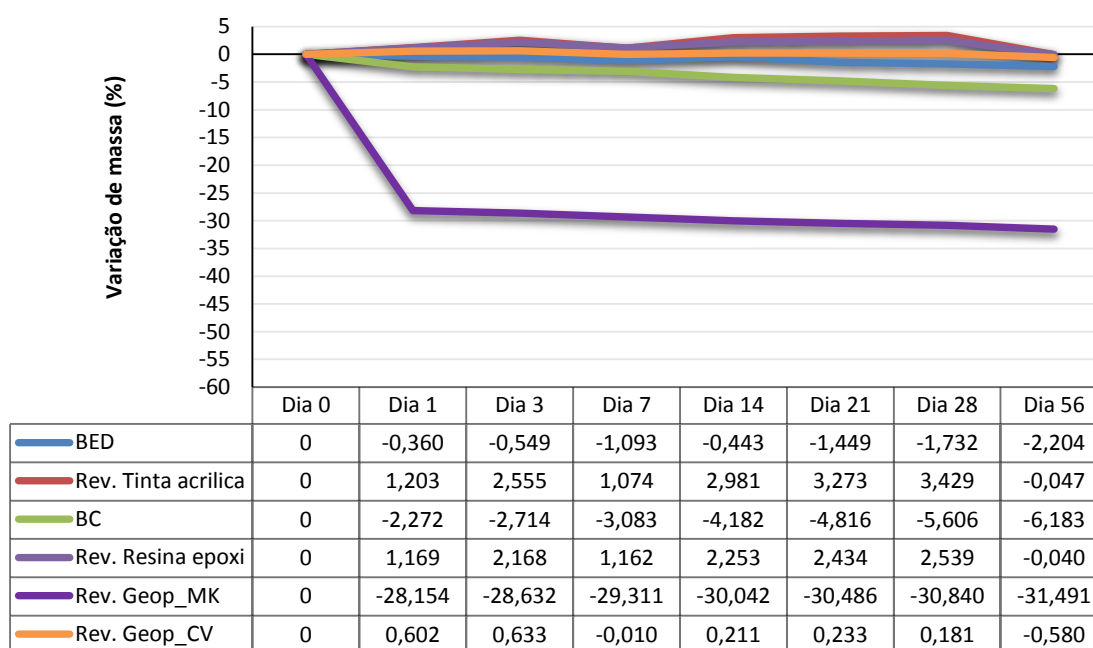


Figura 4.22 – Valores obtidos do ataque do ácido clorídrico (concentração = 10%)

Na globalidade dos casos as perdas são inferiores quando comparadas com os outros ácidos, apesar disso segue a mesma lógica que apresentada no caso do ácido nítrico.

#### 4.6.4 Avaliação do comportamento aos ácidos

Em jeito de resumo, estão apresentados na tabela 4.6 os valores de cada material vs ácido, como forma de ser mais perceptível em que ácidos se verificão maiores perdas de massa.

Na tabela 4.6, pode-se referir que na globalidade dos casos os provetes ensaiados sob a presença do ácido sulfúrico sofreram maior dano, em comparação com os outros ácidos, isto deve-se ao facto das características do ácido sulfúrico serem mais gravosas para materiais cimentícios. Porém os provetes revestidos com argamassas geopoliméricas têm tendência para resistir melhor a este tipo de ácido.

Tabela 4.6 – Quadro resumo dos valores de perda de cada material vs ácido

Materiais		Perdas de massa (%)					
		BED	Rev._Tinta acrílica	BC	Rev._Resina epoxi	Rev._Geop_MK	Rev._Geop_CV
Ácidos	Acido Sulfúrico (C=30%)	-18,680	-17,211	-34,373	-4,680	-47,384	-23,107
	Acido Sulfúrico (C=20%)	-10,382	-10,093	-9,023	-0,321	-40,715	-0,642
	Acido Sulfúrico (C=10%)	-2,156	-11,113	-8,165	-0,065	-33,003	-0,675
	Acido Nítrico (C=30%)	-3,883	-0,879	-11,453	-0,318	-55,302	-25,682
	Acido Nítrico (C=20%)	-2,702	-1,071	-13,278	-0,083	-47,241	-2,376
	Acido Nítrico (C=10%)	-1,557	-0,123	-6,650	-1,524	-32,792	-1,387
	Acido Clorídrico (C=30%)	-3,969	-0,726	-8,791	-0,585	-41,286	-6,868
	Acido Clorídrico (C=20%)	-2,713	-0,249	-7,593	-0,370	-42,653	-1,646
	Acido Clorídrico (C=10%)	-2,204	-0,047	-6,183	-0,040	-31,491	-0,580

O ácido clorídrico é aquele que apresenta valores mais baixos de perdas de massa. Seguido do ácido nítrico, que se excluirmos os revestimentos com argamassas geopoliméricas, o dano é pouco significativo.

O material que teve pior comportamento foi o provete revestido com argamassa geopolimérica com metacaulino, isto pode dever-se ao facto de os provetes com metacaulino apresentarem algum retração. Houve uma tentativa de minorar os efeitos da retração, mantendo os provetes com metacaulino fechados do exterior numa caixa térmica durante 28 dias.

Em relação aos provetes revestidos com argamassas geopoliméricas com cinzas volantes, estes tiveram um comportamento muito interessante, apresentando apenas desgaste elevados no caso do ácido sulfúrico (30%) e nítrico (30%), mostrando-se a boa resistência aos ácidos por parte das cinzas volantes.

No caso da tinta acrílica como se pode ver na tabela 4.6, apresenta um bom comportamento em relação aos ácidos clorídrico e nítrico, porém no que diz respeito ao ácido sulfúrico, apresenta um desgaste total, desaparecendo o seu capeamento em pouco tempo.

Os provetes BC apresentam um desgaste elevado na globalidade dos ácidos, o que era um resultado esperado, uma vez que não apresentava nenhuma proteção.

Em relação aos provetes BED, com a exceção do ácido sulfúrico tem um bom comportamento, porém no ácido sulfúrico apresenta grandes perdas de massa.

A resina epoxídica apresentou perdas muito pequenas em todos os ácidos, na grande maioria dos casos não houve praticamente desgaste da tinta, e quando esta aconteceu foi predominantemente nos cantos dos provetes. Este foi o material que melhor se comportou. Contudo, este material apresenta baixa resistência à radiação ultra-violeta Bijen, (2000) e é muito caro e além disso na sua produção está associado a elevados impactos ambientais.

Outro aspeto é a comparação das argamassas geopoliméricas com cinzas volantes em relação as argamassas obtidas por ativação alcalina de lamas residuais apresentadas no artigo de Pacheco Torgal et al., (2008). Em que as argamassas referenciadas pelo autor obtêm perdas para os três ácidos, sulfúrico, nítrico e clorídrico com concentrações de 5% de 2.6%, enquanto as apresentadas pelas argamassas geopoliméricas com cinzas volantes obtêm para concentrações de 10% perdas de 0.88%.

#### **4.7 Considerações económicas**

Na figura 4.23, estão apresentados os custos dos revestimentos, para tal foram pedidos alguns orçamentos a fornecedores sobre os materiais utilizados neste ensaio. Não foram considerados custos de aplicação, e todos os custos apresentados são sem IVA e sem transporte. Houve também a consideração de uma espessura de 30cm para um exemplo de um m<sup>2</sup> de pavimento de infraestrutura industrial, assim no caso das argamassas geopoliméricas os revestimentos têm 2.5 cm + 27.5 cm do betão. No caso das tintas, utilizaram-se betões com 30 cm e 2 camadas de tinta, parâmetro este devido a ficha técnica, por fim os betões BC e BED têm 30cm de espessura cada um.

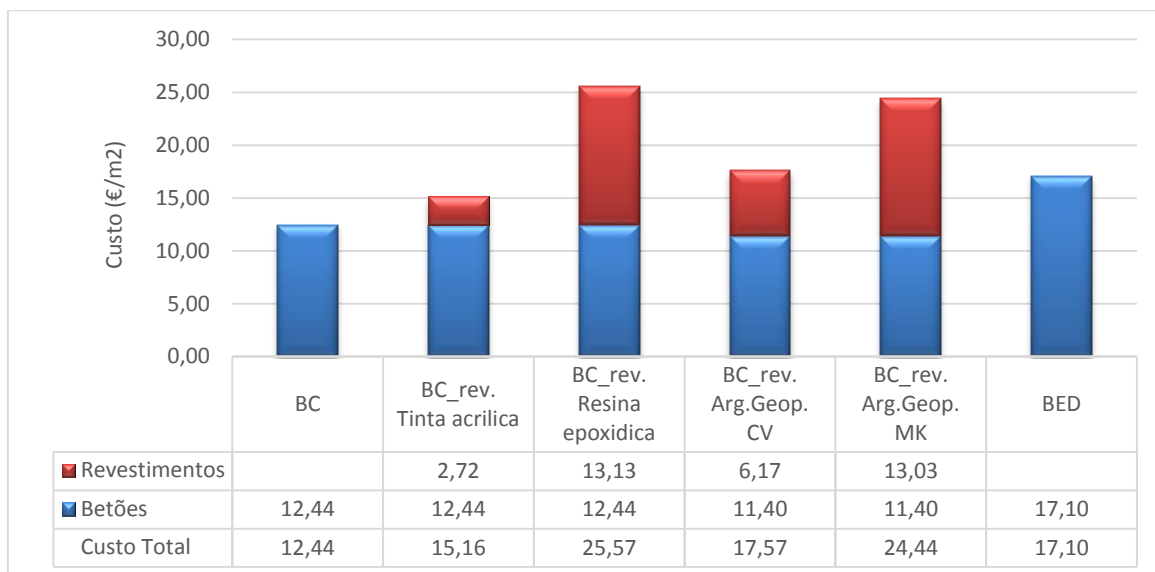


Figura 4.23 – Custos dos materiais (€/m<sup>2</sup>)

Com isto fica mais claro a escolha das argamassas geopoliméricas com cinzas volantes para revestimentos, já que é a que apresenta um baixo preço, e no caso do ácido sulfúrico com uma concentração de 30%, só apresentou perdas consideráveis aos 28 dias, o que sugere que caso exista algum derrame sob o revestimento, este se for sujeito a limpeza, não apresentara danos.

Apesar da resina epoxidica ter apresentado bons resultados na resistência ao ataque em meio ácido, o seu custo é quase 50% mais elevado do que a solução com revestimento de argamassas geopoliméricas à base de cinzas volantes.

A tinta acrílica apresenta um custo muito próximo das argamassas geopoliméricas com cinzas volantes, e pode ser também uma solução, sendo desaconselhável o seu uso perante o ácido sulfúrico.

Consegue-se perceber que o preço do betão convencional é 37% mais baixo, porém os resultados obtidos tanto no ataque químico em que os betões de elevado desempenho (BED) apresentam cerca de metade das perdas do betão convencional (BC), como em termos de resistência a compressão, apresentando um aumento de quase 80%.

Em relação aos gráficos apresentados na figura 4.24 a 4.27, onde estão representados dados referentes a análise custo/eficiência dos materiais utilizados no ensaio de ataque dos ácidos aos 56 dias, a diferentes concentrações (10%, 20% e 30%). Sobressai logo que a argamassa



geopolimérica com metacaulino é a que apresenta piores valores, isto deve-se ao custo que apresenta e a elevada perda de massa que apresentou no ensaio. Em relação a argamassa geopolimérica com cinzas volantes, esta apresenta bons resultados para todos os ácidos com a exceção das concentrações de 30%, e se tomarmos em conta que a abordagem desta dissertação é em relação a uma argamassa geopolimérica para reparação. Significando assim que o material já existe o material suporte, fazendo com que o custo diminua consideravelmente para 2.47€/m<sup>2</sup>, sendo desta forma o material mais barato e com uma das melhores relações entre o custo e a perda.

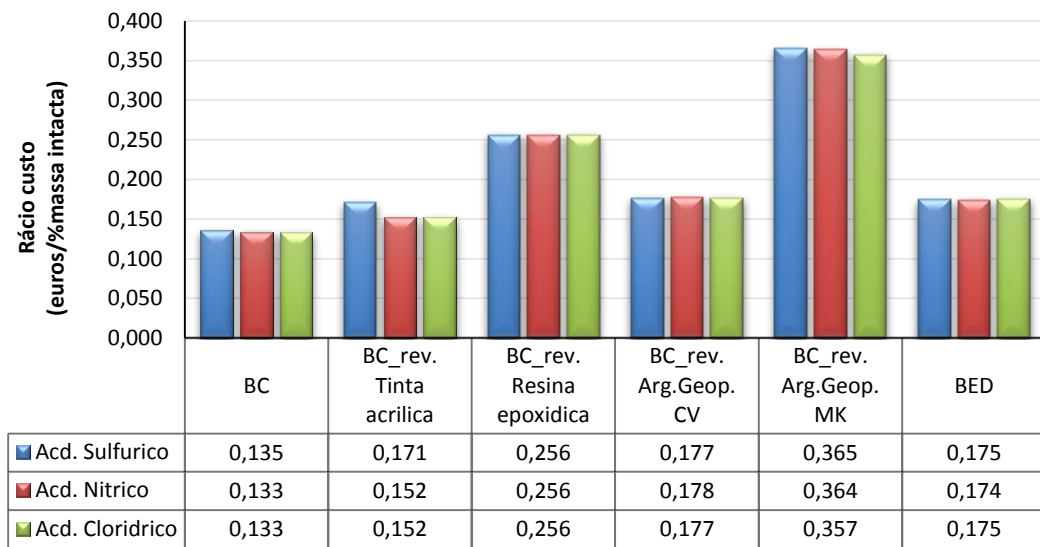


Figura 4.24 – Análise custo/eficiência dos provetes ao ataque dos ácidos (C=10%)

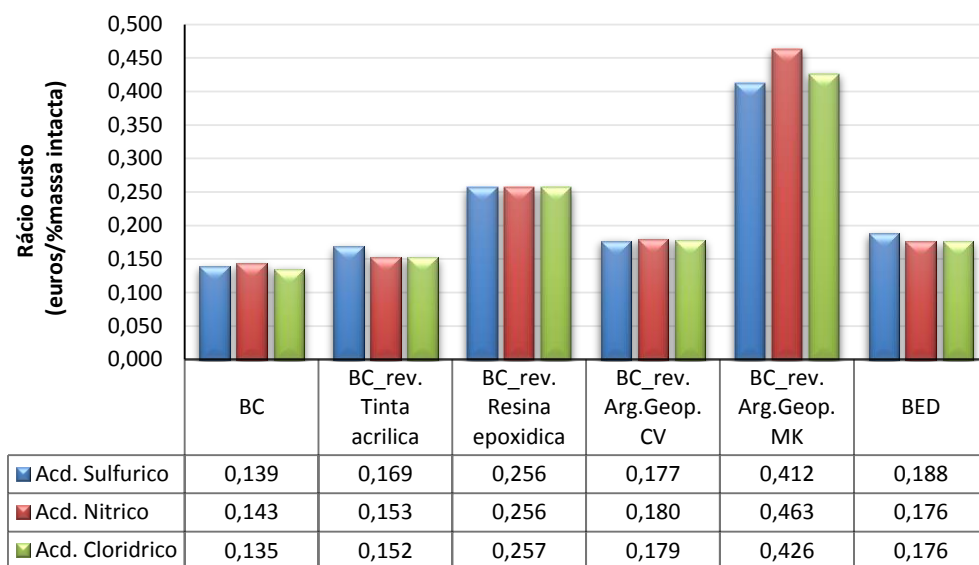


Figura 4.25 – Análise custo/eficiência dos provetes ao ataque dos ácidos (C=20%)

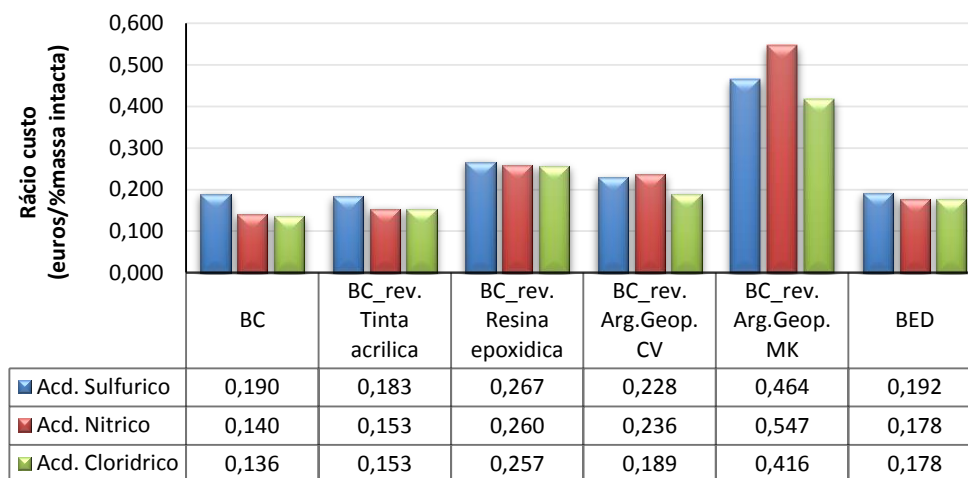


Figura 4.26 – Análise custo/eficiência dos provetes ao ataque dos ácidos (C=30%)

Na figura 4.26 pode ver-se a diferença quando se diminui a espessura das argamassas geopoliméricas, desta forma o revestimento com argamassas geopoliméricas com cinzas volantes passa a ter um dos melhores rácios de eficiência. O facto de o betão convencional ser o que apresenta melhores valores, deve-se sobretudo ao seu baixo custo que consegue compensar a sua elevada perda de massa. Por outro lado a resina epoxídica devido ao seu elevado custo, e apesar de ter perdas muito baixas apresenta valores muito elevados.

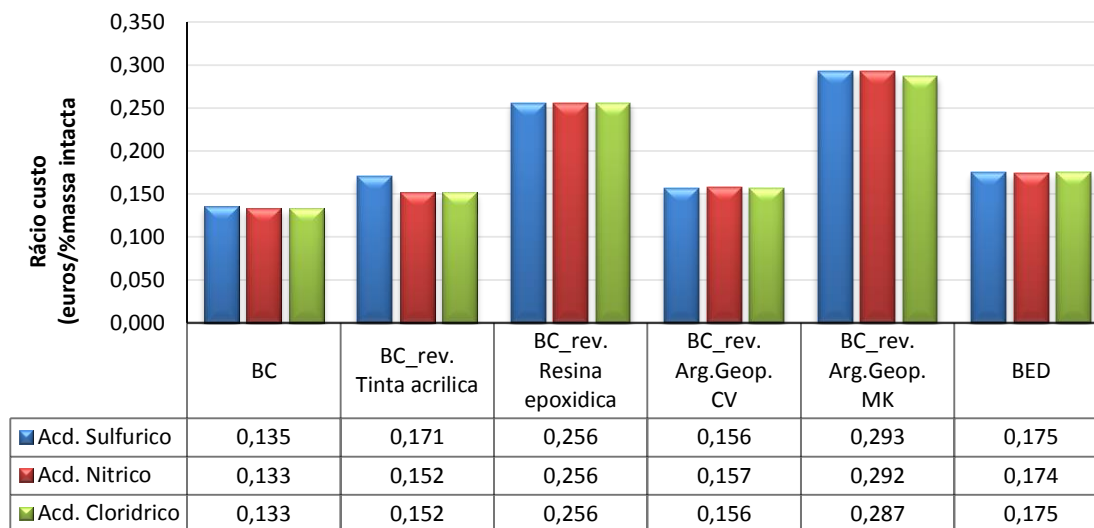


Figura 4.27 – Análise custo/eficiência dos provetes ao ataque dos ácidos (C=10% e espessura dos revestimentos com argamassas = 1.5 cm)

A solução envolvendo a utilização de resina epóxicida embora tenha apresentado elevada resistência ao ataque ácido apresenta um rácio custo/eficiência superior em quase 70% ao rácio da argamassa geopolimérica à base de cinzas volantes. Muito embora a solução de betão convencional apresente o melhor rácio custo eficiência, ligeiramente próximo do rácio da argamassa geopolimérica é preciso ter em conta que como os pavimentos industriais que estão sujeitos a um desgaste muito acentuado e as argamassa geopoliméricas apresentam relativamente a esta variável um elevado desempenho (Pacheco Torgal et al., 2009) face aos betões correntes (C20/25) ou com resistência melhorada (C30/37) que a utilização das argamassas geopoliméricas poderão representar uma solução mais racional.

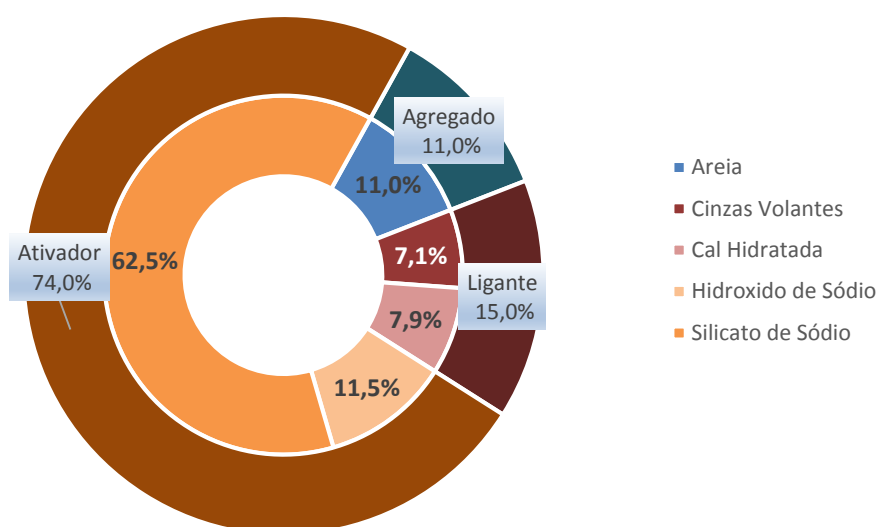


Figura 4.28 – Peso dos custos dos constituintes das argamassas geopoliméricas com cinzas volantes (%)

Por outro lado a figura 4.28 mostra que são os activadores alcalinos os responsáveis pela maior parte do custo da argamassa geopolimérica à base de cinzas volantes, pelo que algumas investigações em curso que pretendem reduzir esta variável de forma significativa (Pacheco-Torgal et al., 2014) irão aumentar a competitividade económica desta última solução.

No caso da figura 4.29, nota-se um equilíbrio maior entre os pesos quando comparado com as argamassas com cinzas volantes, isto deve-se ao preço elevado do metacaulino em relação as cinzas volantes.

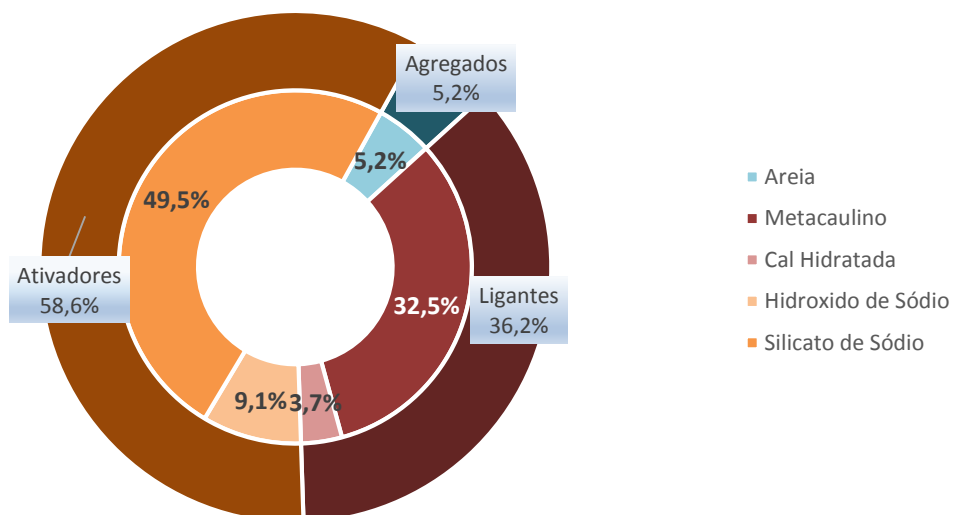


Figura 4.29 – Peso dos custos dos constituintes da argamassa geopolimérica com metacaulino (%)

## 5 CONCLUSÃO

Com a realização deste trabalho, houve uma procura para cumprir com os objetivos definidos no capítulo introdutório. Sendo que o objetivo principal era a utilização de argamassas geopoliméricas para reparação de infraestruturas industriais em ambientes quimicamente agressivos, focando o ataque aos ácidos. De realçar algumas surpresas nos resultados obtidos, pelo facto de alguns dos valores serem mais baixos que o esperado.

Os resultados obtidos mostram que em termos de consistência, na globalidade as argamassas geopoliméricas com metacaulino, obtêm valores mais baixos que em relação às mesmas argamassas com cinzas volantes. Em relação à diferença das concentrações molares, obteve-se uma diminuição de consistência, à medida que se aumentava a concentração molar em ambas as argamassas.

No que aos ensaios de compressão e flexão diz respeito, a argamassa geopolimérica à base de metacaulino atinge valores mais elevados aos 28 dias, em relação às mesmas argamassas com cinzas volantes. Em ambos os casos o aumento da concentração molar, não leva a uma diminuição progressiva, uma vez que no caso das concentrações de 18 molares apresentarem valores mais elevados em relação aos 14 molares, no caso dos ensaios de compressão. Em relação aos ensaios de flexão, mais propriamente no caso das argamassas geopoliméricas com metacaulino, mostra um resultado muito diferente, já que o aumento da concentração leva a um aumento da resistência de flexão, existindo um patamar entre (14mol e 18mol).

Em relação aos ensaios de absorção por imersão e absorção por capilaridade, obteve-se no caso da absorção por imersão, valores mais elevados nas argamassas geopoliméricas com cinzas volantes, de referir também um aumento gradual, quando se aumenta a concentração molar para ambas as argamassas. No caso da absorção por capilaridade, existe uma aproximação dos valores entre as argamassas, existindo porém valores mais elevados no caso das argamassas geopoliméricas com metacaulino. Em ambos os casos o aumento da concentração, demonstra um aumento também do coeficiente de capilaridade.

Em relação aos betões, o objetivo era compreender os tipos de betões que foram usados, então perante os resultados obtidos nos ensaios de compressão, absorção por capilaridade e por imersão, chega-se à conclusão que se trata de um betão convencional e um de desempenho melhorado.

O ensaio que teve como função tentar responder ao problema desta dissertação, o ataque dos ácidos. Segundo os resultados obtidos, pode-se dizer:

- Os provetes de betão revestidos com resina epoxídica são aqueles que têm o melhor comportamento na globalidade dos ácidos, com uma perda média de 0.8%;
- Em relação ao revestimento com tinta acrílica, o seu comportamento dividiu-se em dois tipos, um em que houve uma perda total da tinta no caso do ácido sulfúrico, obtendo uma perda média de 12.8%. No segundo caso, onde a tinta se manteve intacta com uma perda de 0.5%, no caso dos outros ácidos.
- Nos betões de elevado desempenho, obteve-se uma perda média de 5.2%, pode-se referir que no caso do ácido sulfúrico obteve-se a maior perda de massa com 9.8%.
- Os provetes de betão convencional, apresentam uma perda de cerca de 11.1%, obtendo a maior perda 34.4%, no caso do ácido sulfúrico com uma concentração de 30%.
- Os revestimentos das argamassas geopoliméricas à base de cinzas volantes, mostram uma perda de massa de 7%, porém nas concentrações menores que 30%, obtém na globalidade um bom comportamento com uma perda de 1.2% em contraposição com as perdas obtidas nas concentrações mais elevadas de 18.6%.
- O pior comportamento é encontrado nos revestimentos de argamassas geopoliméricas com metacaulino, cerca de 41.3%, existindo um comportamento muito semelhante nas concentrações de 20% e 30%.

Na globalidade dos casos, nota-se um aumento gradual da perda de massa em relação ao aumento da concentração dos ácidos. Com a exceção dos revestimentos das argamassas geopoliméricas com cinzas volantes, todos os materiais apresentam uma perda maior no caso da presença do ácido sulfúrico. Verifica-se, também, que as argamassas geopoliméricas com metacaulino apresentam os piores valores, não devendo ser uma aposta na resolução dos problemas. Tendo em conta o seu desempenho e principalmente os seus custos, as argamassas geopoliméricas à base de cinzas volantes, revelaram ser uma opção com potencial para reparações de infraestruturas em indústrias que envolvem a produção ou a utilização de ácidos. Apesar da resina epoxídica ter apresentado bons resultados na resistência ao ataque em meio ácido, o seu rácio custo/eficiência é quase 70% superior à solução com revestimento de argamassas geopoliméricas à base de cinzas volantes.

## **5.1 Trabalhos futuros**

Neste capítulo, e depois da realização deste estudo, foi possível ter uma abordagem crítica, e perceber que existem áreas, que poderiam servir para complementar e para compreender melhor as aplicabilidades destes materiais.

Um estudo importante seria sobre aderência das argamassas geopoliméricas, e formas de a aumentar.

Seria também muito importante fazer uma análise sobre formas de tratamento da retração das argamassas geopoliméricas a base de metacaulino. Já que foi um dos principais problemas encontrados durante a realização desta dissertação, a elevada retração apresentada por este material.

A análise de argamassas geopoliméricas com mistura dos ligantes, o metacaulino e as cinzas volantes. De forma a entender se as vantagens de cada um destes constituintes, quando misturados conseguiam suprimir as desvantagens do outro.





## 6 REFERÊNCIAS

- EN 206-1, N. E. Betão parte 1: Especificação, desempenho, produção e conformidade (2007).
- Abdollahnejad, Z., Hlavacek, P., Pacheco-Torgal, F., & Barroso de Aguiar, J. L. (2012). Preliminary experimental investigation on one-part geopolymer mixes, Congresso da Construção, Coimbra, 1–11.
- Aguiar, J. L. B. (2007). *Materiais de construção I*. Universidade do Minho. Guimarães.
- Azevedo, F., Pacheco-Torgal, F., Jesus, C., Barroso de Aguiar, J. L., & Camões, A. F. (2012). Properties and durability of hpc with tyre rubber wastes. *Construction and building materials*, 34, 186–191. Doi:10.1016/j.conbuildmat.2012.02.062
- Bakharev, T. (2005). Resistance of geopolymer materials to acid attack. *Cement and concrete research*, 35(4), 658–670. Doi:10.1016/j.cemconres.2004.06.005
- Beddoe, R. E., & Dorner, H. W. (2005). Modelling acid attack on concrete: Part I. The essential mechanisms. *Cement and concrete research*, 35(12), 2333–2339. Doi:10.1016/j.cemconres.2005.04.002
- Bijen J. (2000) *Durability of engineering structures. Design, repair and maintenance*. Woodhead Publishing Limited, Abington Hall, Cambridge
- Chang, Z.-T., Song, X.-J., Munn, R., & Marosszky, M. (2005). Using limestone aggregates and different cements for enhancing resistance of concrete to sulphuric acid attack. *Cement and concrete research*, 35(8), 1486–1494. Doi:10.1016/j.cemconres.2005.03.006
- Dal Molin, D. C. C., Oliveira, A. P. M., & Kulakowski, M. P. (1996). Estudo de concretos com adição de sílica ativa (microsilica) frente ao ataque de agentes agressivos para emprego em pisos especiais. In: *International Congress on High-Performance Concrete and Performance and Quality of Concrete Structures*, Florianópolis:UFSC. P. 590-598.
- Davidovits, J. (1979) Synthesis of new high temperature geo-polymers for reinforced plastics/composites. SPE PACTEC 79 Society of Plastic Engineers, Brookfield Center, pp.151-154
- Davidovits, J. (2005). Geopolymer, green chemistry and sustainable development solutions: Proceedings of the World Congress geopolymer 2005 (p. 235). Geopolymer institute, 2005.
- Dias, A. de A. (2008). Estudo da degradação de argamassa geopolimérica por ácido acético e sulfúrico. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro – UENF.
- Dias, N. (2012). Geopolímeros : contributos para a redução das eflorescências. Dissertação de Mestrado, Universidade do Minho.
- Ferreira, R. M. (2000). Avaliação de ensaios de durabilidade do betão. Dissertação de Mestrado, Universidade do Minho.
- Garcia, J., & Brito, J. De. (2005). Sistema de inspeção e diagnóstico de revestimentos de piso industriais.
- Girardi, F., & Maggio, R. Di. (2011). Resistance of concrete mixtures to cyclic sulfuric acid exposure and mixed sulfates: effect of the type of aggregate. *Cement and concrete composites*, 33(2), 276–285. Doi:10.1016/j.cemconcomp.2010.10.015

- Gomes, K. C., Andrezza, Y. L. P., Rego, S. R., Lira, E. C., Ferreira, D. T. A., Torres, S. M., & Barros, S. de. (2012). Conferencia luso-brasileira de adesão e adesivos. In aplicação de adesivos geopoliméricos nos sistemas cerâmicos submetidos a variações cíclicas (vol. 2933). Rio de Janeiro, Brasil.
- Görhan, G., & Kürklü, G. (2014). The influence of the NaOH solution on the properties of the fly ash-based geopolymer mortar cured at different temperatures. *Composites part B: Engineering*, 58, 371–377. Doi:10.1016/j.compositesb.2013.10.082
- Hanjitsuwan, S., Hunpraturb, S., Thongbai, P., Maensiri, S., Sata, V., & Chindapasirt, P. (2014). Effects of NaOH concentrations on physical and electrical properties of high calcium fly ash geopolymer paste. *Cement and Concrete Composites*, 45, 9–14. Doi:10.1016/j.cemconcomp.2013.09.012
- Jalali, S., & Silva, B. J. (2002). Construção sustentável. In reabilitação de estrutura de betão armado (pp. 23–39). Construtor.
- Leute, M., & Lind, J. (2012). Basics of alkali silicates. Woellner group.
- Marques, S. (2005). Estudo de argamassas de reabilitação de edifícios antigos Sofia Margarida Figueiredo Marques estudo de argamassas de reabilitação de edifícios antigos. Universidade de Aveiro.
- Osório, P. (2006). Concepção de um saferoom anti – tornado em betão geopolimérico. Universidade do Minho, Guimarães. Retrieved from <http://hdl.handle.net/1822/6668>
- Pacheco-Torgal, F., Abdollahnejad, Z., Miraldo, S., Baklouti, S., & Ding, Y. (2012). An overview on the potential of geopolymers for concrete infrastructure rehabilitation. *Construction and Building Materials*, 36, 1053–1058. doi:10.1016/j.conbuildmat.2012.07.003
- Pacheco-Torgal, F.; Labrincha, J.A.; Leonelli, C.; Palomo, A.; Chindapasirt, P. (2014) Handbook of Alkali-Activated Cements, Mortars and Concretes ed. 1. Abington Hall, Cambridge, UK: WoodHead Publishing Limited
- Pacheco-torgal, F. (2012). Reabilitação de infra-estruturas de betão com ligantes de base geopolimérica, *Revista Maquinaria*, 54–62. Retrieved from <http://hdl.handle.net/1822/20084>
- Pacheco-torgal, F., ; Jalali, S. (2005). Cimento portland versus ligantes geopoliméricos: considerações económicas sobre as implicações do mercado do carbono no custo dos betões. Conferência Engenharia 2005 - Inovação e Desenvolvimento: actas". Covilhã : Universidade da Beira Interior
- Pacheco-Torgal, F. (2007) Desenvolvimento de ligantes obtidos por activação alcalina de lamas residuais das Minas da Panasqueira. Tese de Doutoramento, Universidade da Beira Interior, 423pp
- Pacheco-Torgal, F.; Gomes, J. P.; Jalali, S. (2008) Ligantes obtidos por activação alcalina de lamas residuais das Minas da Panasqueira. Resistência ao desgaste e ao ataque ácido. *Revista de Engenharia Civil da Universidade do Minho* nº 31, pp.67-76.
- Pacheco-torgal, F., ; Jalali, S. (2009). Algumas considerações sobre as argamassas de reabilitação. *Revista Construção Magazine* N°32, pp. 35-39
- Torgal, F. P., & Jalali, S. (2009). *Ligantes obtidos por Activação Alcalina* (TecMinho.). Guimarães: Arranjo Gráfico. Retrieved from <http://hdl.handle.net/1822/28947>
- Pacheco-torgal, F., ; Jalali, S. (2010). Ligantes geopoliméricos . Uma alternativa ao cimento portland? *Ingénium*(2010), ii(116), 87–89.
- Pacheco-torgal, F., ; Jalali, S. (2011). A sustentabilidade dos materiais de construção (edição tec.). Guimarães.

- Palomo, A., Blanco-Varela, M. T., Granizo, M. L., Puertas, F., Vazquez, T., & Grutzeck, M. W. (1999). Chemical stability of cementitious materials based on metakaolin. *Cement and concrete research*, 29(7), 997–1004. Doi:10.1016/s0008-8846(99)00074-5
- Pinto, A. T. (2004). *Sistemas ligantes obtidos por activação alcalina do metacaulino*. Tese de Doutorado. Retrieved from <http://hdl.handle.net/1822/671>
- Poggiali, F. S. J. (2009). *Durabilidade de estruturas de concreto em usinas siderúrgicas*. Belo horizonte.
- Provis, J. L., & Deventer, J. S. J. Van d. (2009). *Geopolymers - structure, processing, properties and industrial applications*. Woodhead publishing.
- Rozière, E., Loukili, a., El Hachem, R., & Grondin, F. (2009). Durability of concrete exposed to leaching and external sulphate attacks. *Cement and concrete research*, 39(12), 1188–1198. Doi:10.1016/j.cemconres.2009.07.021
- Swanepoel, J. C., & Strydom, C. A. (2002). Utilisation of fly ash in a geopolymeric material. *Applied geochemistry*, 17(8), 1143–1148. Doi:10.1016/s0883-2927(02)00005-7
- Temuujin, J., Minjigmaa, A., Rickard, W., Lee, M., Williams, I., & Van Riessen, A. (2010). Fly ash based geopolymer thin coatings on metal substrates and its thermal evaluation. *Journal of hazardous materials*, 180(1-3), 748–52. Doi:10.1016/j.jhazmat.2010.04.121
- Temuujin, J., Rickard, W., Lee, M., & Van Riessen, A. (2011). Preparation and thermal properties of fire resistant metakaolin-based geopolymer-type coatings. *Journal of non-crystalline solids*, 357(5), 1399–1404. Doi:10.1016/j.jnoncrysol.2010.09.063
- Vasconcelos, E. (2010). *Reabilitação de estruturas de betão com recurso a geopolímeros e fibras de carbono*. Universidade do minho.
- Wang, H., Li, H., & Yan, F. (2005). Synthesis and mechanical properties of metakaolinite-based geopolymer. *Colloids and surfaces a: physicochemical and engineering aspects*, 268(1-3), 1–6. Doi:10.1016/j.colsurfa.2005.01.016
- Weerdt, K. De. (2011). Geopolymers – state of the art. *Sintef building and infrastructure*, 39.
- Weil, M., & Gasafi, E. (2005). Sustainable design of geopolymers - integration of economic and environmental aspects in the early stages of material development . 11th annual international sustainable integration of economic and environmental aspects in the early stages of material dev.



## 7. ANEXOS

Tabela 7.1– Provetes ensaiados no ácido sulfúrico (C=30%)

















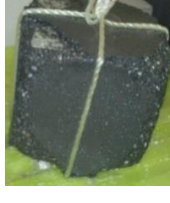

Ácido Sulfúrico (30%)	Tempo		
	Dia 1	Dia 28	Dia 56
<b>Betão convencional</b>			
<b>Revestimento com tinta acrílica</b>			
<b>Betão de elevado desempenho</b>			
<b>Revestimento com resina epoxidica</b>			
<b>Revestimento com argamassa geopolimérica a base de metacaulino</b>			
<b>Revestimento com argamassa geopolimérica a base de cinzas volantes</b>			

Tabela 7.2 – Provetes ensaiados no ácido sulfúrico (C=20%)



















Ácido Sulfúrico (20%)	Tempo		
	Dia 1	Dia 28	Dia 56
<b>Betão convencional</b>			
<b>Revestimento com tinta acrílica</b>			
<b>Betão de elevado desempenho</b>			
<b>Revestimento com resina epoxidica</b>			
<b>Revestimento com argamassa geopolimérica a base de metacaulino</b>			
<b>Revestimento com argamassa geopolimérica a base de cinzas volantes</b>			

Tabela 7.3 – Provetes ensaiados no ácido sulfúrico (C=10%)



















Ácido Sulfúrico (10%)	Tempo		
	Dia 1	Dia 28	Dia 56
<b>Betão convencional</b>			
<b>Revestimento com tinta acrílica</b>			
<b>Betão de elevado desempenho</b>			
<b>Revestimento com resina epoxídica</b>			
<b>Revestimento com argamassa geopolimérica a base de metacaulino</b>			
<b>Revestimento com argamassa geopolimérica a base de cinzas volantes</b>			



Tabela 7.4 – Provetes ensaiados no ácido nítrico (C=30%)














Ácido Nítrico (30%)	Tempo		
	Dia 1	Dia 28	Dia 56
<b>Betão convencional</b>			
<b>Revestimento com tinta acrílica</b>			
<b>Betão de elevado desempenho</b>			
<b>Revestimento com resina epoxidica</b>			
<b>Revestimento com argamassa geopolimérica a base de metacaulino</b>			
<b>Revestimento com argamassa geopolimérica a base de cinzas volantes</b>			



Tabela 7.5 – Provetes ensaiados no ácido nítrico (C=20%)



















Ácido Nítrico (20%)	Tempo		
	Dia 1	Dia 28	Dia 56
<b>Betão convencional</b>			
<b>Revestimento com tinta acrílica</b>			
<b>Betão de elevado desempenho</b>			
<b>Revestimento com resina epoxidica</b>			
<b>Revestimento com argamassa geopolimérica a base de metacaulino</b>			
<b>Revestimento com argamassa geopolimérica a base de cinzas volantes</b>			

Tabela 7.6 – Provetes ensaiados no ácido nítrico (C=10%)












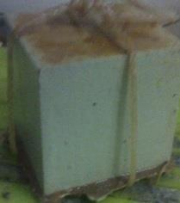






Ácido Nítrico (10%)	Tempo		
	Dia 1	Dia 28	Dia 56
<b>Betão convencional</b>			
<b>Revestimento com tinta acrílica</b>			
<b>Betão de elevado desempenho</b>			
<b>Revestimento com resina epoxídica</b>			
<b>Revestimento com argamassa geopolimérica a base de metacaulino</b>			
<b>Revestimento com argamassa geopolimérica a base de cinzas volantes</b>			

Tabela 7.7 – Provetes ensaiados no ácido clorídrico (C=30%)



















Ácido Clorídrico (30%)	Tempo		
	Dia 1	Dia 28	Dia 56
<b>Betão convencional</b>			
<b>Revestimento com tinta acrílica</b>			
<b>Betão de elevado desempenho</b>			
<b>Revestimento com resina epoxidica</b>			
<b>Revestimento com argamassa geopolimérica a base de metacaulino</b>			
<b>Revestimento com argamassa geopolimérica a base de cinzas volantes</b>			

Tabela 7.8 – Provetes ensaiados no ácido clorídrico (C=20%)























Ácido Clorídrico (20%)	Tempo		
	Dia 1	Dia 28	Dia 56
<b>Betão convencional</b>			
<b>Revestimento com tinta acrílica</b>			
<b>Betão de elevado desempenho</b>			
<b>Revestimento com resina epoxidica</b>			
<b>Revestimento com argamassa geopolimérica a base de metacaulino</b>			
<b>Revestimento com argamassa geopolimérica a base de cinzas volantes</b>			



Tabela 7.9 – Provetes ensaiados no ácido clorídrico (C=10%)

Ácido Clorídrico (10%)	Tempo		
	Dia 1	Dia 28	Dia 56
<b>Betão convencional</b>			
<b>Revestimento com tinta acrílica</b>			
<b>Betão de elevado desempenho</b>			
<b>Revestimento com resina epoxídica</b>			
<b>Revestimento com argamassa geopolimérica a base de metacaulino</b>			
<b>Revestimento com argamassa geopolimérica a base de cinzas volantes</b>	