



Universidade do Minho  
Escola de Engenharia

António Filipe Martins Costa

Utilização de Geopolímeros para Protecção  
de Betão: Resistência a altas temperaturas

António Filipe Martins Costa  
Utilização de Geopolímeros para Protecção  
de Betão: Resistência a altas temperaturas





Universidade do Minho  
Escola de Engenharia

António Filipe Martins Costa

Utilização de Geopolímeros para Protecção  
de Betão: Resistência a altas temperaturas

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

Trabalho efetuado sob a orientação do  
Professor Doutor José Barroso Aguiar  
Professor Doutor Fernando Pacheco Torgal

Dezembro de 2012

## **DEDICATÓRIA**

**Aos meus pais**, que sempre me apoiaram nos bons e maus momentos,

**E aos amigos** que sempre me acompanharam ao longo da vida.



## **AGRADECIMENTOS**

Queria agradecer primeiramente ao Departamento de Engenharia Civil por disponibilizar os meios necessários para a realização desta dissertação.

Ao Professor Barroso Aguiar agradeço toda a disponibilidade, orientação e ajuda prestada ao longo da elaboração desta dissertação.

Ao Doutor Fernando Pacheco Torgal pelo seu conhecimento e conselhos que ajudaram a enriquecer esta dissertação.

Aos Técnicos do Laboratório de Materiais do Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho agradeço toda a simpatia, boa disposição, disponibilidade, ajuda e dedicação prestada na parte laboratorial da dissertação.

Aos companheiros de laboratório e colegas de mestrado pelo companheirismo, ajuda e trocas de impressões que foram sem dúvida uma mais-valia para a elaboração desta dissertação.

Utilização de Geopólimeros para Protecção de Betão

Resistência a altas temperaturas

---

## **RESUMO**

O cimento Portland continua a ser o produto mais utilizado no mundo da construção. Contudo, este apresenta a grande desvantagem de produzir enormes quantidades de gases poluentes que afectam de certo modo a nossa atmosfera, contribuindo para o grande problema do nosso planeta, o aquecimento global.

Deste modo, surge cada vez mais a necessidade de encontrar alternativas credíveis para o cimento Portland e é neste campo que surgem os materiais obtidos por activação alcalina, designados de “geopolímeros”. Os geopolímeros apresentam características bastantes tentadoras e vantajosas em relação ao cimento Portland, tais como: elevada durabilidade e resistência a temperaturas elevadas.

Assim, esta dissertação surge no âmbito de tentar encontrar um geopolímero que apresenta características de resistência idênticas ou melhores que o cimento Portland e principalmente elevada resistência a altas temperaturas.

Foram analisadas seis composições geopoliméricas, variando o ligante (cinzas volantes e cal hidratada) até 25% de cal hidratada e uma composição de cimento Portland para fazer a devida comparação.

Os resultados obtidos após a realização dos vários ensaios das diversas composições mostram que relativamente à consistência das misturas geopoliméricas, estas apresentam uma menor trabalhabilidade entre os valores de 15% e 25% de cal hidratada. Em relação aos resultados da resistência à flexão conclui-se que para geopolímeros submetidos a altas temperaturas, estes apresentam uma maior resistência à flexão para 0% de cal hidratada. Em termos de resistência à compressão os resultados são variados, ou seja, os geopolímeros apresentam maiores valores de resistência à compressão para a maior percentagem de cal utilizada (25%). Contudo, para uma percentagem de cal de 0% obtêm-se valores de resistência muito idênticos à anterior, o que leva a concluir que a utilização de cal hidratada não é relevante em termos de resistência à compressão para altas temperaturas.



## **ABSTRACT**

Portland cement remains the most used product in constructions' world. However, it has the major disadvantage of producing huge quantities of greenhouse gases that affect our atmosphere, contributing to the big problem of our planet, global warming.

Thus, there is increasingly a need to find credible alternatives to Portland cement and is in this field that arises materials obtained by alkaline activation, termed "geopolymers". The geopolymers have many tempting and advantageous characteristics when compared to the Portland cement, such as high durability and strength at elevated temperatures.

So, this project aims to find one geopolymer that has resistance characteristics similar or better to Portland cement and mainly higher strength at high temperatures.

Seven compositions of geopolymers were analyzed by varying the binder (fly ash and hydrated lime) from 0% to 25% of hydrated lime and one composition of Portland cement to make a comparison.

The results obtained after performing the various assays show that these various compositions on the consistency of the mixtures geopolymers, they exhibit a decreased workability values between 15% and 25% hydrated lime. Regarding the results of the flexural strength was concluded that geopolymers subjected to high temperatures have a higher flexural strength for 0% hydrated lime. In terms of resistance to compression the results are reversed, ie, the geopolymers have higher values of resistance to compression for the largest percentage of lime used (25%). However, for a lime percentage of 0% is obtained resistance values very similar to the previous one, which leads to the conclusion that the use of hydrated lime is not important in terms of resistance to compression at high temperatures.



## ÍNDICE

<b>Dedicatória.....</b>	<b>i</b>
<b>Agradecimentos .....</b>	<b>iii</b>
<b>Resumo .....</b>	<b>v</b>
<b>Abstract .....</b>	<b>vi</b>
<b>Índice .....</b>	<b>ix</b>
<b>Índice de Figuras .....</b>	<b>xiii</b>
<b>Índice de Quadros.....</b>	<b>xvii</b>
<b>Capítulo 1 – Introdução .....</b>	<b>1</b>
1.1 Motivação do Trabalho .....	1
1.2 Objectivos .....	2
1.3 Organização da Dissertação .....	3
<b>Capítulo 2 – Actualidade do Cimento Portland .....</b>	<b>5</b>
2.1 O problema ambiental.....	5
2.2 Durabilidade.....	9
2.3 Resistência ao Fogo .....	11
2.3.1 Resistência a altas temperaturas.....	12
2.3.2 Ensaios de resistência ao fogo/altas temperaturas.....	15
<b>Capítulo 3 – Misturas Geopoliméricas .....</b>	<b>17</b>
3.1 Introdução aos geopolímeros.....	17
3.1.1 História.....	19

3.1.2 Química.....	23
3.1.3 Aplicações.....	28
3.2 Resistência Mecânica .....	29
3.3 Durabilidade.....	30
3.4 Resistência ao fogo.....	32
3.4.1 Resistência a altas temperaturas.....	34
<b>Capítulo 4 – Materiais Utilizados e Métodos de Ensaio.....</b>	<b>35</b>
4.1 Breve Introdução.....	35
4.2 Materiais.....	35
4.2.1 Cinzas Volantes.....	35
4.2.2 Areia.....	36
4.2.2.1 Análise granulométrica da Areia.....	37
4.2.3 Silicato de Sódio.....	38
4.2.4 Hidróxido de Sódio.....	38
4.2.5 Cal.....	39
4.3 Composição, mistura e cura dos ligantes.....	40
4.4 Métodos de ensaios.....	43
4.4.1 Trabalhabilidade.....	43
4.4.2 Resistência à flexão.....	45
4.4.3 Resistência à compressão.....	48
4.4.4 Resistência ao fogo.....	50
4.4.4.1 Resistência a altas temperaturas.....	50

<b>Capítulo 5 – Análise de resultados.....</b>	<b>53</b>
5.1 Análise da consistência das misturas geopoliméricas.....	53
5.2 Análise da resistência à flexão das misturas geopoliméricas vs cimento Portland para altas temperaturas.....	54
5.3 Análise da resistência à compressão das misturas geopoliméricas vs cimento Portland para altas temperaturas.....	57
<b>Capítulo 6 – Conclusões e trabalhos futuros.....</b>	<b>61</b>
6.1 Conclusões finais.....	61
6.2 Trabalhos futuros.....	62
<b>Capítulo 7 – Bibliografia.....</b>	<b>63</b>
<b>Anexos.....</b>	<b>69</b>



## ÍNDICE DE FIGURAS

### Capítulo 2 - Actualidade do Cimento Portland

Figura 2.1 - Evolução do aumento de temperatura global média com o nível de concentração de CO <sub>2</sub> atmosférico (Pacheco-Torgal, et al., 2011).....	5
Figura 2.2 - Previsão do consumo de cimento Portland (Taylor, et al., 2006).....	6
Figura 2.3 - Tipologia dos resíduos industriais em Portugal (Pacheco-Torgal, et al., 2005).....	8
Figura 2.4 - Estrutura de betão de CPN em elevado estado de degradação (Pacheco-Torgal, et al., 2010).....	10
Figura 2.5 - Efeito de vários tipos de agregados na resistência ao fogo de uma placa de 12,1cm de betão CPN (NFPA, 1986), (Osório, 2006).....	14
Figura 2.6 - Variação das propriedades mecânicas do betão com a temperatura (LNEC, 1990), (Osório, 2006).....	14
Figura 2.7 - Variação da temperatura, $T - T_0$ , com o tempo $t$ , no fogo normalizado ISO 834 (LNEC, 1990), (Osório, 2006).....	15
Figura 2.8 - Redução da resistência à compressão de betão com agregados calcários (Neville, 1995), (Osório, 2006).....	16

### Capítulo 3 – Misturas Geopoliméricas

Figura 3.1 - Perspectiva do Coliseu de Roma, onde terá sido usada argamassa geopolimérica no miolo das paredes exteriores, há perto de 2000 anos (Osório, 2006).....	18
Figura 3.2 - Sialatos base para a formação dos geopolímeros (Pinto, 2004).....	23
<b>Figura 3.3</b> - Aspectos Estruturais e Nomenclatura (Pinto, 2004).....	25
Figura 3.4 - Canais e estrutura aberta dos zeólitos (Zeólito A <sup>1</sup> ) (Osório, 2006).....	26

Figura 3.5 - Aplicações bem sucedidas de geopolímeros pelo Instituto Géopolymère (Pinto, 2004).....	29
Figura 3.6 - Resistência aos ácidos de cimento Portland e ligantes geopoliméricos (Pacheco-Torgal, et al., 2011).....	32
Figura 3.7 - Resistência ao fogo de placas de betão activado alcalinamente (Pacheco-Torgal, et al., 2011).....	32
Figura 3.8 - Placas obtidas por activação alcalina sujeitas a fase térmica. São visíveis dois termopares aplicados na face posterior da placa (Pacheco-Torgal, et al., 2011).....	33

## **Capítulo 4 – Materiais Utilizados e Métodos de Ensaio**

Figura 4.1 - Série de peneiros e máquina de agitar para análise granulométrica.....	36
Figura 4.2 - Curva granulométrica do agregado.....	37
Figura 4.3 - Silicato de sódio.....	38
Figura 4.4 - Hidróxido de sódio.....	39
Figura 4.5 - Cal Hidrata.....	40
Figura 4.6 - Reacção da cal hidratada.....	40
Figura 4.7 - Equipamento de mistura mecânico e recipiente normalizado.....	42
Figura 4.8 - Mesa vibratória para efectuar a compactação.....	42
Figura 4.9 - Mesa de espalhamento .....	43
Figura 4.10 - Fases de execução do ensaio para determinação da trabalhabilidade .....	44
Figura 4.11 - Molde de 3 provetes .....	45
Figura 4.12 - Máquina universal de ensaios LLOYD .....	46
Figura 4.13 - Exemplo de cálculo do valor máximo de resistência à flexão obtido pelo gráfico no programa NEXYGEN plus, da máquina de ensaio LLOYD .....	47

Figura 4.14 - Equipamento de ensaio à compressão .....	48
Figura 4.15 - Visor da máquina universal de ensaios ELE .....	49
Figura 4.16 - Equipamento para realizar o ensaio de altas temperaturas .....	50
Figura 4.17 - Arrefecimento do provete após submissão a altas temperaturas .....	51

## **Capítulo 5 – Análise de Resultados**

Figura 5.1 - Consistência vs percentagem de cal das misturas geopoliméricas.....	53
Figura 5.2 - Resistência à flexão das misturas geopoliméricas vs cimento Portland à temperatura ambiente, aos 7 e 14 dias.....	55
Figura 5.3 - Resistência à flexão da mistura 1 vs cimento Portland à temperatura ambiente, aos 7 e 14 dias.....	55
Figura 5.4 - Resistência à flexão vs temperaturas elevadas das misturas geopoliméricas vs cimento Portland, aos 7 dias.....	56
Figura 5.5 - Resistência à flexão vs temperaturas elevadas da mistura 1 vs cimento Portland, aos 7 dias.....	57
Figura 5.6 - Resistência à compressão das misturas geopoliméricas vs cimento Portland à temperatura ambiente, aos 7 e 14 dias.....	58
Figura 5.7 - Resistência à compressão da mistura 1 vs cimento Portland à temperatura ambiente, aos 7 e 14 dias.....	58
Figura 5.8 - Resistência à compressão vs temperaturas elevadas das misturas geopoliméricas vs cimento Portland, aos 7 dias.....	59
Figura 5.9 - Resistência à compressão vs temperaturas elevadas da mistura 6 vs cimento Portland, aos 7 dias.....	60



## ÍNDICE DE QUADROS

### Capítulo 2 – Actualidade do Cimento Portland

Quadro 2.1 - Percentagem de resistência à compressão de betão CPN relativamente à resistência aos 28 dias quando sujeito a várias temperaturas (Neville, 1995), (Osório, 2006).13

### Capítulo 3 – Misturas Geopoliméricas

Quadro 3.1 - Resenha histórica sobre alguns acontecimentos importantes acerca de cimentos obtidos por activação alcalina e cimentos alcalinos (Li, et al., 2010).....21

Quadro 3.2 - Percentagem de resistência residual de amostras submetidas a um aumento de temperatura (Pacheco-Torgal, et al., 2011).....34

### Capítulo 4 – Materiais Utilizados e Métodos de Ensaio

Quadro 4.1 - Análise granulométrica da areia.....37

Quadro 4.2 - Composições das misturas geopoliméricas.....41

Quadro 4.3 - Composições do cimento Portland.....41

Quadro 4.4 - Características da LLOYD LR30K.....46

Quadro 4.5 - Características da máquina de ensaio ELE.....48



## Capítulo 1 – INTRODUÇÃO

### 1.1 Motivação do trabalho

A indústria cimenteira mundial é um dos grandes responsáveis pela emissão de elevadas quantidades de dióxido de carbono e, por outro lado, o cimento Portland apresenta sérias fragilidades em termos da sua durabilidade. Assim, assume-se como um desígnio urgente por parte da comunidade científica a procura de soluções alternativas a este material que sejam menos poluentes e mais duráveis (Pacheco-Torgal, et al., 2005; Pacheco-Torgal e Jalali, 2011).

Os ligantes geopoliméricos apresentam-se como um produto inovador alternativo ao cimento Portland, quer em termos ambientais, devido às suas baixas emissões, quer ao facto de poderem ser produzidos a partir de resíduos, quer mesmo em termos da sua inequívoca superior durabilidade (Pacheco-Torgal, et al., 2005; Pacheco-Torgal e Jalali, 2011).

A curto prazo e devido ao seu baixo custo, não se esperam grandes alterações no mundo do cimento Portland. No entanto, prevê-se que os betões geopoliméricos com base em cinzas volantes ou escórias venham a contrariar esse facto e se apresentem como produtos predominantes no mercado. Contudo, existem também grandes potencialidades, ainda pouco exploradas em termos de mercado, no domínio dos betões, com substituição de cimento por metacaulino (uma pozolana artificial bastante reactiva, obtida a partir da desidroxilação do caulino), os quais se caracterizam por terem excelentes prestações quer em termos mecânicos quer mesmo em termos da sua durabilidade (Pacheco-Torgal, et al., 2005; Pacheco-Torgal e Jalali, 2011).

Para além da durabilidade e capacidade mecânica que se pretende obter, importa também obter capacidade de resistência ao fogo. Um incêndio pode ter consequências graves tais como o colapso da estrutura, a perda de vidas humanas e perdas económicas, sendo assim, será fulcral analisar o comportamento dos materiais quando submetidos a altas temperaturas.

Assim, a grande motivação desta dissertação, surge no âmbito de desenvolver um geopolímero baseado em cinzas volantes, com elevadas propriedades mecânicas, durável e resistente ao fogo, apresentando-se como uma alternativa ao cimento Portland.

## **1.2 Objectivos e metodologia**

O principal objectivo da realização da presente dissertação é desenvolver geopolímeros de modo a revestir betões e aumentar a sua resistência ao fogo. Os geopolímeros podem conter metacaulino, cinzas volantes ou escórias.

Após várias pesquisas já realizadas, sabe-se que o tipo de materiais precursores utilizado para o fabrico de geopolímeros, desempenha um papel muito importante nas propriedades finais do produto.

Controlar não apenas a composição, mas também a química dos materiais precursores é essencial para as propriedades do geopolímero.

Sendo este tipo de material de pouca trabalhabilidade, para além dos vários activadores, pode-se juntar ao geopolímero outros materiais como plastificantes, para elevar a sua trabalhabilidade e, conseqüentemente, as suas características mecânicas e de durabilidade.

Através de vários ensaios laboratoriais, aplicar-se-á todo o conhecimento obtido para alcançar a melhor mistura de geopolímero com elevadas propriedades mecânicas, trabalhabilidade, durabilidade e resistência a altas temperaturas.

O resultado esperado é o desenvolvimento de geopolímeros com capacidade de protecção do betão face à acção do fogo, mantendo sempre as propriedades e durabilidade elevadas. Sendo este tema ainda um assunto em crescimento e em evolução constante, espera-se então a melhor das soluções para combater a acção do fogo perante o betão.

### **1.3 Organização da Dissertação**

A presente dissertação está dividida em 7 capítulos, incluindo a introdução, conclusões finais e referências, acrescida de anexos.

**Capítulo 1 – Introdução:** Neste capítulo pretende-se situar esta investigação no contexto da realidade, em termos de encontrar alternativas e soluções para o cimento Portland, referindo também o objectivo e estrutura da presente dissertação.

**Capítulo 2 – Actualidade do cimento Portland:** Este capítulo aborda o mundo actual do cimento Portland, referindo as razões e o porquê da procura de novas soluções e alternativas, refugiando-se nos geopolímeros, visto por muitos investigadores como a grande alternativa no presente e no futuro.

**Capítulo 3 – Introdução aos Geopolímeros:** O terceiro capítulo é dedicado aos geopolímeros, revendo toda a história e o surgimento do termo “geopolímero”, composição química e aplicações, assim como as suas características e propriedades das misturas geopoliméricas obtidas por activação alcalina.

**Capítulo 4 – Materiais Utilizados e Métodos de Ensaio:** Este capítulo apresenta os vários materiais utilizados, suas propriedades e caracterização, bem como as composições, procedimentos e ensaios realizados.

**Capítulo 5 – Análise de Resultados:** São apresentados os resultados obtidos dos ensaios realizados, assim como a análise e discussão dos mesmos.

**Capítulo 6 – Conclusões e trabalhos futuros:** Neste capítulo são referidas as considerações finais sobre os conhecimentos adquiridos ao longo desta dissertação, sugerindo também possíveis trabalhos futuros dentro deste tema.

**Capítulo 7 – Bibliografia:** A dissertação termina com o capítulo 7, onde são apresentadas as referências bibliográficas que serviram de apoio para a realização da mesma.



## Capítulo 2 – ACTUALIDADE DO CIMENTO PORTLAND

### 2.1 O problema ambiental

Nas últimas décadas, a sociedade tem-se deparado com um problema de nível mundial. A constante ameaça da alteração climática na Terra, responsável pelas catástrofes naturais, e que se traduz em perdas de milhares de vidas e prejuízos económicos significativos. Para esse efeito, contribuem e muito as emissões de gases, responsáveis pelo aumento do efeito de estufa (GEE), sendo o dióxido de carbono um dos gases que mais contribui para esse aquecimento global (figura 2.1) com uma percentagem de 60% do total (Pacheco-Torgal, et al., 2005).

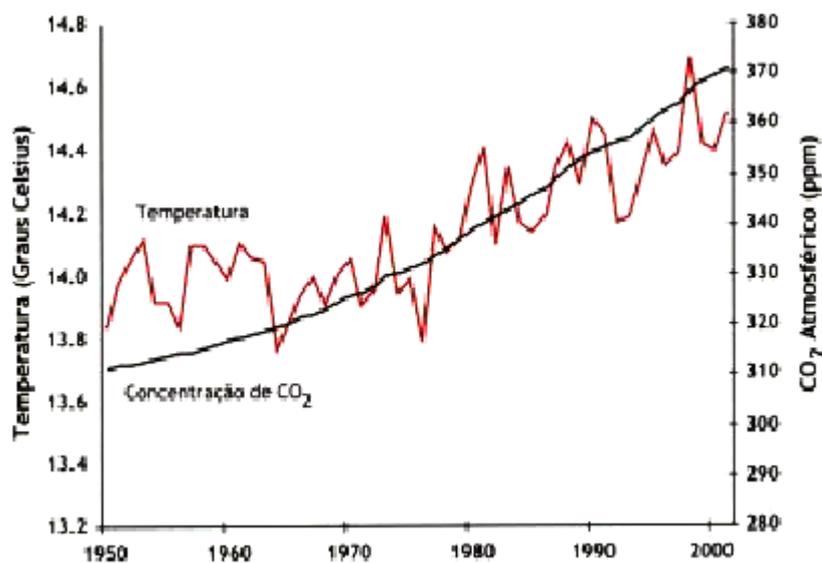
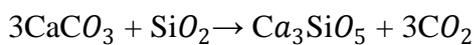


Figura 2.1 – Evolução do aumento de temperatura global média com o nível de concentração de CO<sub>2</sub> atmosférico (Pacheco-Torgal, et al., 2011).

Os gases emitidos para a atmosfera provêm, fundamentalmente, do uso intensivo de combustíveis fósseis, da desflorestação e da indústria do cimento, sendo esta responsável por 5% das emissões mundiais de CO<sub>2</sub> (Pacheco-Torgal, et al., 2005).

“A produção do cimento, não é possível sem a emissão de CO<sub>2</sub> através da descarbonização do calcário (CaCO<sub>3</sub>), quando incinerado conjuntamente com argilas a aproximadamente 1450° C, para a produção do clínquer de acordo com a seguinte reacção” (Pacheco-Torgal, et al., 2005):



Ao produzir uma tonelada de clínquer produz-se quase uma tonelada de CO<sub>2</sub>, ou seja, em cada tonelada de clínquer liberta-se 579 kg de CO<sub>2</sub> para a atmosfera independentemente da eficiência do processo utilizado, acrescentando-se ainda aproximadamente 390 kg de CO<sub>2</sub>, devido à utilização de combustíveis fósseis consumidos durante a produção do clínquer (Pacheco-Torgal, et al., 2009).

No final do século XX a produção de cimento Portland, a nível mundial, era de 1.200 milhões de toneladas/ano. Hoje, sabe-se que são produzidas 2.600 milhões de toneladas/ano e as projecções apontam para que estes valores dupliquem nos próximos 40 anos (figura 2.2), o que agravará ainda mais os efeitos negativos das emissões referidas anteriormente (Pacheco-Torgal, et al., 2009).

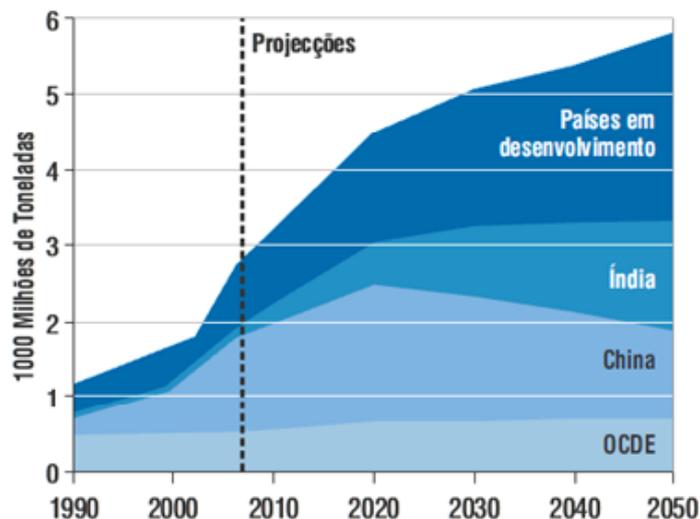


Figura 2.2 – Previsão do consumo de cimento Portland (Taylor, et al., 2006)

Com este crescimento contínuo do cimento Portland, e como já referido, a temperatura média do globo está a aumentar progressivamente e o nível médio do mar está a subir, causando catástrofes naturais com maior frequência (Osório, 2006).

A intervenção do CO<sub>2</sub> no ambiente é de inteira importância, pois, mesmo que a sua concentração atmosférica estabilizasse, o nível dos oceanos continuaria a subir durante mais um milénio (Osório, 2006).

Percebe-se, assim, que as emissões de carbono constituem hoje um motivo de extrema preocupação por parte da sociedade, não só por serem as principais responsáveis pelas alterações climáticas do nosso planeta, como também por causarem elevados problemas a nível financeiro aos países onde são emitidas (Pacheco-Torgal, et al., 2009).

A comunidade científica está empenhada em tentar desenvolver ligantes alternativos ao cimento Portland capazes de um melhor desempenho, quer em termos ambientais quer mesmo em termos da sua durabilidade. Até ao momento nenhuma alternativa se identifica como um substituto efectivo do cimento Portland devido fundamentalmente ao seu baixo custo (Pacheco-Torgal, et al., 2005).

Os cimentos geopoliméricos surgem como uma alternativa inovadora e bastante promissora, uma vez que, comparados com o cimento Portland, sendo produzidos a partir de resíduos, apresentam baixas emissões e elevada durabilidade.

Nos dias de hoje, a indústria cimenteira produz cimentos com substituição parcial por fíler (pó de pedra), subprodutos de características cimentícias (escórias) e pozolânicas (cinzas volantes) e até mesmo metacaulino (pozolana artificial) de forma a reduzir o nível de emissões e o seu custo.

Contudo, o potencial de redução de emissões obtido dessa forma é, no entanto, e segundo alguns investigadores, bastante limitado (Pacheco-Torgal, et al., 2009).

Portugal, não é excepção, e tal como os outros países, apresenta um elevado nível de emissões de CO<sub>2</sub>, estando mesmo acima dos limites assumidos no compromisso internacional referente ao Protocolo de Quioto (UNFCCC, 1997). Grande parte destas emissões deve-se à indústria

cimenteira. Por sua vez, não possui sub-produtos de características pozolânicas em quantidade suficiente, como as cinzas volantes ou as escórias (Pacheco-Torgal, et al., 2005).

Em vez disso, possui elevadas quantidades de resíduos de minas e pedreiras (figura 2.3), representando 57% dos 30 milhões de toneladas de resíduos industriais produzidos anualmente, podendo assim produzir alternativas ao cimento Portland a partir deste tipo de resíduos (Pacheco-Torgal, et al., 2010).

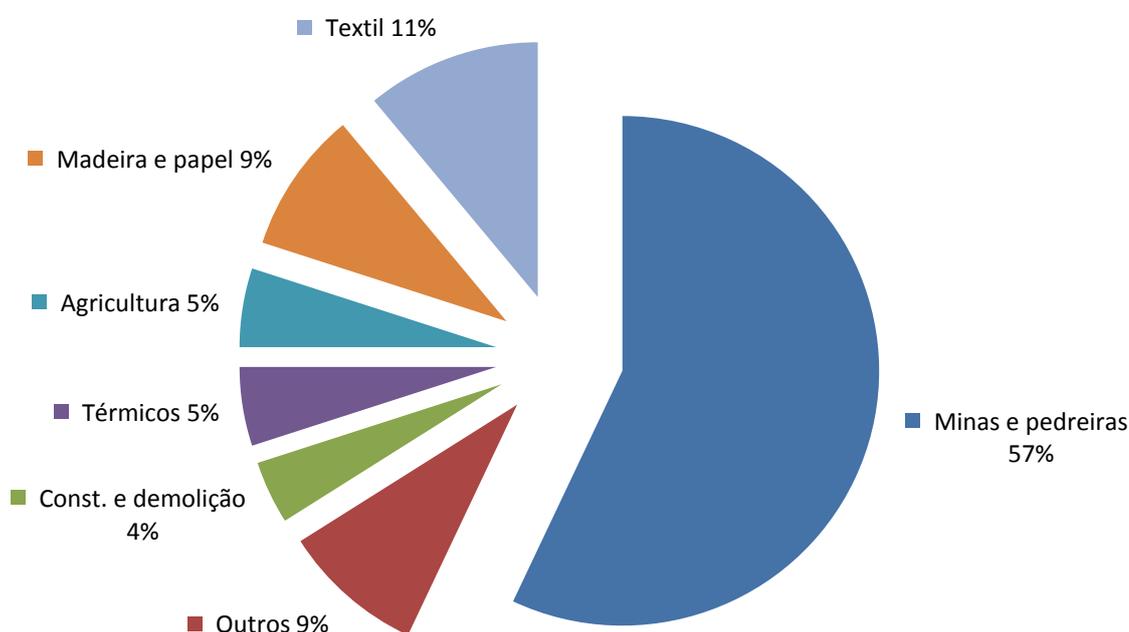


Figura 2.3 – Tipologia dos resíduos industriais em Portugal (Pacheco-Torgal, et al., 2005).

Estes resíduos padecem da desvantagem de estarem depositados em aterros por todo o território português, fazendo com que se constituam como um entrave à preservação da biodiversidade. Este problema é agravado porque as zonas de maior concentração de biodiversidade, coincidem com locais onde actualmente se levam ao cabo actividades de mineração. De modo a inverter esta situação, torna-se necessário afectar uma parte significativa do território do país a zonas de protecção, sendo que o reaproveitamento dos resíduos de minas e pedreiras em ligantes geopoliméricos, com a consequente redução das

áreas ocupadas por este tipo de resíduos constitui um contributo ambiental de relevo (Pacheco-Torgal, et al., 2010).

## 2.2) Durabilidade

O cimento Portland, foi por excelência o ligante do século XX devido à sua versatilidade, abundância de recursos naturais para o seu fabrico, e, fundamentalmente, devido ao seu baixo custo. No entanto, e como referiu Sousa Coutinho (1988), “...a sua elevada alcalinidade torna-o um material instável...pelo que a sua duração não será muito longa”, apresentando assim alguns aspectos negativos em termos de durabilidade (Pacheco-Torgal, et al., 2005):

- Elevado grau de emissões de CO<sub>2</sub> (1 ton. por cada ton. de cimento produzido);
- Elevado consumo energético na fase de fabrico, com temperaturas de clínquerização da ordem dos 1450° C;
- Betões com vida útil que correntemente não ultrapassa os 60 anos;
- Betões sem qualquer resistência ao ataque de ácidos;
- Betões com resistência ao fogo quase nula;
- Betões com elevada condutibilidade térmica;
- Betões com considerável permeabilidade à penetração de agentes agressivos;
- Betões sensíveis à acção da carbonatação;
- Betões sensíveis ao ataque de cloretos;
- Betões sensíveis à ocorrência de reacções expansivas do tipo alcali-agregado;
- Necessidade de utilização de agregados com granulometrias bem graduadas;

A baixa durabilidade deste tipo de betão, deve-se não só à má colocação e cura, mas também, ao próprio material em si, que apresenta uma elevada quantidade de cal, sendo facilmente

susceptível a ataques químicos e uma permeabilidade relativamente elevada que permite a entrada de água, gases e substâncias agressivas, que podem provocar fenómenos de carbonatação e corrosão das armaduras (figura 2.4) (Pacheco-Torgal, et al., 2009).



Figura 2.4 - Estrutura de betão de cimento Portland normal em elevado estado de degradação (Pacheco-Torgal, et al., 2010).

Algumas décadas atrás, já eram visíveis estes problemas de durabilidade do cimento Portland, em que, bastantes estruturas já apresentavam sinais de deterioração precoce. São vários os casos de deterioração precoce de estruturas de betão armado que ocorreram no passado. Mehta (1991) descreve um caso de um túnel no Dubai que, concluído em 1975, teve de ser completamente reparado em 1986. Gjorv (1994) menciona um estudo sobre pontes construídas na Noruega, em que, pouco tempo depois, 25% das estruturas apresentavam deterioração por corrosão das armaduras. Ferreira (2009) cita um estudo onde indica que 40% das cerca de 600 mil pontes existentes nos Estados Unidos estariam afectadas pela corrosão, o que implicaria custos de reparação de aproximadamente 50 mil milhões de dólares (Pacheco-Torgal, et al., 2009).

Actualmente, a vida útil do betão é de 50 anos, embora em décadas anteriores ainda fosse de 100 anos. Com isto, pode-se afirmar que, de facto, as estruturas de betão armado construídas com cimento Portland têm na sua durabilidade o seu “calcanhar de Aquiles” (Flaga, 2000) (Pacheco-Torgal, et al., 2009).

### **2.3) Resistência ao Fogo**

“O fogo é uma acção, considerada normalmente como acidental, com grande influência nos materiais de construção, os quais apresentam comportamentos diferentes à sua acção” (Silva, 2010).

A resistência ao fogo de uma estrutura ou dos seus elementos, em termos regulamentares, define-se como o intervalo de tempo que a estrutura consegue assegurar, face à combinação de acções em que figura a acção do fogo, uma suficiente capacidade resistente e, se for o caso, também de compartimentação (LNEC, 1990).

A capacidade de resistência ao fogo por parte dos betões, varia dependendo de alguns factores, tais como (Vasconcelos, 2010):

- Quantidade de água combinada quimicamente que se perde;
- Alterações químicas que destroem a aderência entre a pasta de cimento e o agregado;
- A desagregação gradual da pasta de cimento endurecida;

Quando se projecta e dimensiona um edifício, em termos de resistência ao fogo, deve-se ter em conta tanto os comportamentos dos materiais atrás referidos, como as suas capacidades de isolamento.

Os principais materiais de construção, como são os casos da madeira, aço e betão, sofrem bastante quando submetidos a altas temperaturas. No caso da madeira, sob a acção do fogo, durante um incêndio, apresenta perdas na sua secção. O aço, por sua vez, perde rigidez e resistência, enquanto o betão despedaça-se (*spalling*), quando expostos a altas temperaturas (Silva, 2010).

Assim, e de forma a evitar um incêndio, são feitas recomendações aos cidadãos por organismos públicos competentes, para que tomem determinadas precauções, tais como: desligar o gás natural, retirar para o exterior da habitação materiais inflamáveis, não inspeccionar os estragos com uma vela, mas sim com uma lanterna (no caso de não haver luz), ter extintores sempre à mão, etc (Osório, 2006).

### **2.3.1) Resistência a altas temperaturas**

As características do betão, tais como o seu tipo de cimento, razão água/ligante, dosagem de cimento e espessura da camada de recobrimento, mas também a temperatura atingida e o período de exposição ao longo do incêndio, fazem variar o efeito do fogo no betão.

Como referido anteriormente, quando um elemento é submetido a altas temperaturas, como as que se atingem durante os incêndios, sofre modificações importantes.

Assim, os principais efeitos devido ao fogo são (Vasconcelos, 2010):

- Elevadas mudanças de volume em elementos atingidos, resultando em distorções, encurvamento e fendilhação;
- Escamação das superfícies de betão sujeitas a dilatações muito rápidas, devido ao calor intenso perto da fonte do incêndio. Alguns agregados rebentam da matriz de betão devido à rápida transformação da humidade do betão em vapor de água, provocando pequenos rebentamentos.
- O aço perde capacidade resistente à medida que a temperatura se eleva.
- Uma vez expostos, os varões de aço passam a dilatar-se ainda mais, provocando o seu encurvamento e perda de aderência ao betão adjacente, onde o aço estava totalmente embebido.

Em betões de boa qualidade, a sua resistência residual não é muito afectada quando expostos a temperaturas até 300°C, mas, a partir de 500°C é notório uma considerável redução da resistência residual do betão (Mailvaganam, 1991), (Neville, 2008), (Vasconcelos, 2010).

“Betões normais, constituídos por agregados siliciosos ou calcários sofrem alterações de cor, não permanentes, com a temperatura e reflecte a temperatura máxima atingida durante o incêndio” (Ferreira, 2000). Betões com misturas mais pobres, sofrem menor perda relativa de resistência do que betões de misturas ricas (Ferreira, 2000).

No caso do cimento Portland endurecido, e posteriormente do betão de cimento Portland normal devido ao aumento da temperatura, o seu comportamento caracteriza-se em temperaturas baixas (até aos 180 °C), pela saída da água livre e parte da água de ligação, resultante da decomposição do gesso e da etringite. Após atingir os 400-500 °C dá-se a desidroxilação da portlandite (hidróxido de cálcio), sendo esta a segunda fase mais importante do betão de cimento Portland normal hidratado (Alarcon-Ruiz, et al., 2005), (Sousa Coutinho, 1973), (Neville, 1995) (Osório, 2006).

Perante estas reacções, o comportamento físico e mecânico do betão de cimento Portland normal fica seriamente comprometido quando sujeito a elevadas temperaturas. No Quadro 2.1 são apresentados valores de resistência residual, ou seja, a percentagem de resistência à compressão do betão de cimento Portland normal relativamente à resistência inicial, para diferentes temperaturas:

Quadro 2.1 – Percentagem de resistência à compressão de betão cimento Portland normal relativamente à resistência aos 28 dias quando sujeito a várias temperaturas (Neville, 1995), (Osório, 2006).

Temp. Max °C	20	200	400	600	800
Gama de resistência residual %	100	50-92	45-83	38-69	20-36

No Quadro 2.1 verifica-se uma gama de valores bastante diferente. Estes resultados devem-se à falta de uniformização no que diz respeito ao ensaio de betões de cimento Portland normal submetidos a elevadas temperaturas. Contudo, é importante referir que, o tipo de agregados (figura 2.5), a composição da mistura, o teor de humidade, as condições de ensaio, e até o facto de a temperatura indicada nos resultados de alguns ensaios dizer respeito à temperatura

do material e de outros dizer respeito à temperatura do ar envolvente, têm influência nos resultados finais (Neville, 1995), (Osório, 2006).



Figura 2.5 – Efeito de vários tipos de agregados na resistência ao fogo de uma placa de 12,1cm de betão de cimento Portland normal (NFPA, 1986), (Osório, 2006).

Vários investigadores mostram na figura 2.6 como variam as propriedades mecânicas do betão CPN quando sujeitos a altas temperaturas (ENV, 1995), (Osório, 2006):

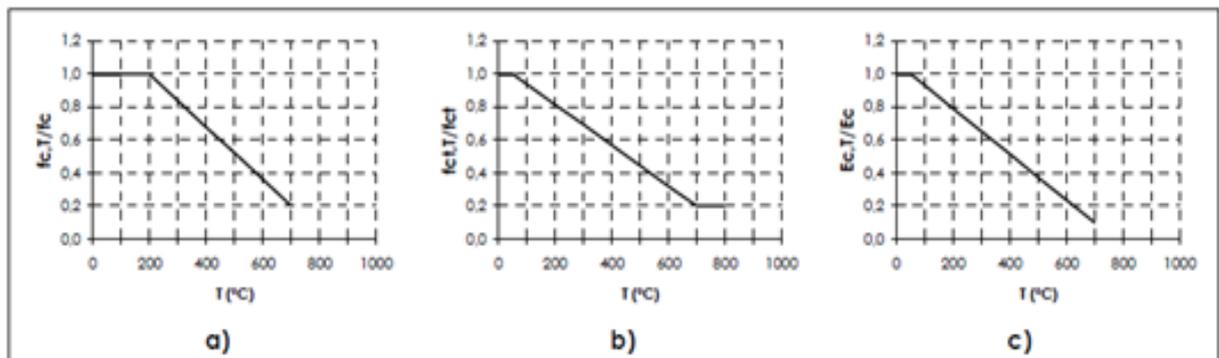


Figura 2.6 – Variação das propriedades mecânicas do betão com a temperatura (LNEC, 1990), (Osório, 2006): a) Resistência à compressão; b) Resistência à tracção; c) Módulo de Elasticidade.

Existem duas diferentes situações de ensaios quando falamos de altas temperaturas ou de resistência a altas temperaturas. Quando um material é exposto a elevadas temperaturas, o

ensaio poderá efectuar-se durante o aquecimento do material, ou após o aquecimento do material, avaliando assim as suas propriedades do material.

Na primeira situação, as condições de ensaio permitem estudar o comportamento de um determinado material ou elemento numa situação semelhante à de serviço numa situação de aquecimento, como é o caso da resistência mecânica de um material aplicado num elemento estrutural. Contudo, este tipo de ensaio exige equipamento bastante dispendioso (Osório, 2006).

É nesta primeira condição de ensaio, que se insere o estudo da resistência ao fogo, pois o carregamento é efectuado enquanto o elemento está a ser aquecido de acordo com a curva de aquecimento padrão (figura 2.7) (Osório, 2006).

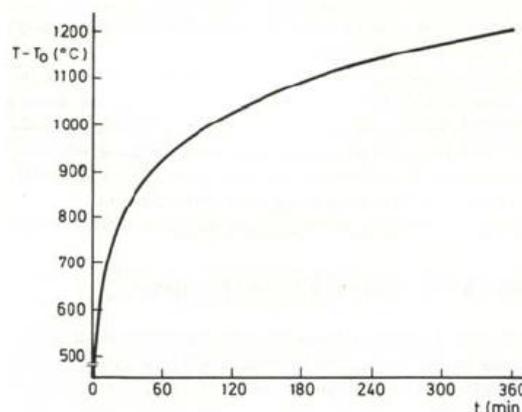


Figura 2.7 – Variação da temperatura,  $T - T_0$ , com o tempo  $t$ , no fogo normalizado ISO 834 (LNEC, 1990), (Osório, 2006).

A segunda condição de ensaio, é bastante mais simples, uma vez que os testes são realizados à temperatura ambiente num estado de após – aquecimento. Assim, neste tipo de ensaio é estudada a degradação que o aquecimento impôs ao material, sendo este ensaiado ainda quente ou já arrefecido (Osório, 2006).

As duas condições acima referidas, conduzem a resultados diferentes durante o estudo do comportamento de um betão. Por exemplo, no estudo da resistência à compressão de betões de cimento Portland normal, o betão consegue obter valores mais elevados de resistência quando se dá a aplicação da carga durante o aquecimento, enquanto a menor resistência é

obtida no caso de aquecimento do betão sem aplicação da carga, sendo depois ensaiado à compressão com o provete à temperatura ambiente. Entre estes dois extremos, encontra-se a situação de aquecimento sem aplicação de carga e posteriormente o betão é ensaiado à compressão com o provete ainda quente (Osório, 2006).

A figura 2.8 apresenta os resultados do estudo referido anteriormente, usando um betão com agregados calcários. No entanto, Neville (2008) afirma que se obteria o mesmo comportamento com qualquer outro tipo de agregado (Osório, 2006).

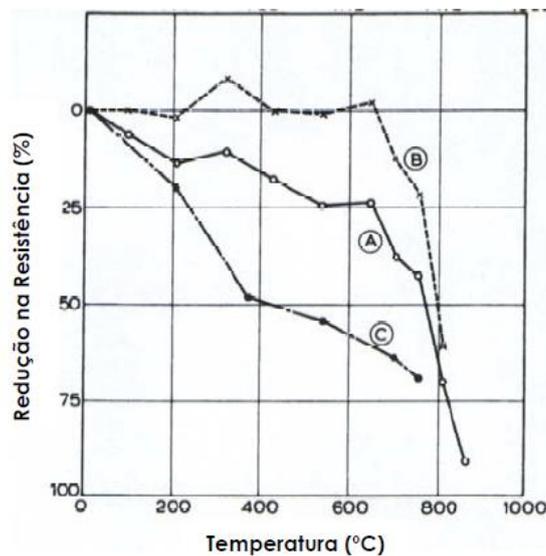


Figura 2.8 – Redução da resistência à compressão de betão com agregados calcários (Neville, 1995), (Osório, 2006):

- (A) Aquecido sem aplicação de carga e depois testado a quente
- (B) Aquecido com aplicação de carga e depois testado a quente
- (C) Aquecido sem aplicação de carga e testado após 7 dias à temperatura ambiente (21°C)

## Capítulo 3 – MISTURAS GEOPOLIMÉRICAS

### 3.1 Introdução aos Geopolímeros

O termo “geopolímero” surgiu em 1978, quando Joseph Davidovits desenvolveu e patenteou ligantes obtidos por activação alcalina de caulino e metacaulino (Pacheco-Torgal, et al., 2009). Mais tarde, decidiu criar uma organização científica, de nome “Geopolymer Institute”, destinada a estudar este tipo de materiais.

De acordo com este autor, os “geopolímeros” são “polímeros” pela razão de se transformarem e policondensarem, mas também por ganharem forma e endurecerem a baixas temperaturas. O incremento da palavra com o termo “Geo”, deve-se ao facto de este material ser inorgânico, duro e estável até temperaturas de 1250°C sem inflamar (Pacheco-Torgal, et al., 2009).

Um “geopolímero” é então “um polímero inorgânico, obtido através da activação alcalina de um alumino-silicato em determinadas condições de temperatura e de pressão” (Osório, 2006).

Os alumino-silicatos, resultantes da desagregação física e química das rochas, e contidos na maioria das rochas, representam 75% da parte sólida inorgânica da crosta terrestre (Osório, 2006).

Devido à elevada estabilidade de alguns alumino-silicatos, a sua activação pode levantar problemas a nível operacional, perdendo interesse a nível prático. Outros casos, mais abundantes, como as argilas, apresentam um elevado potencial de activação que justifica o seu emprego como matéria de base para a obtenção deste novo tipo de material (Osório, 2006).

Este novo material, designado de “geopolímero”, apresenta características similares a outros materiais sólidos naturais, mas evidencia em particular, semelhanças de composição e de estrutura com os zeólitos e os feldspatóides, tais como (Osório, 2006):

- Rigidez;
- Resistência Mecânica;
- Inércia química;
- Estabilidade;

Esta nova geração de materiais, procura aplicar estes novos materiais em áreas como a aeronáutica, o automobilismo e a engenharia civil, podendo adicionar materiais, como por exemplo, armaduras e novos agregados (Vasconcelos, 2010).

Apesar de considerada a “nova geração”, este tipo de material parece ter sido já utilizado pelo homem no seu passado, havendo indícios que Romanos, Egípcios, Gregos e outros povos do Médio Oriente, os terão largamente utilizado (figura 3.1), numa base puramente empírica, como materiais de múltipla utilização (Davidovits, 1988), (Osório, 2006).



Figura 3.1 – Perspectiva do Coliseu de Roma, onde terá sido usada argamassa geopolimérica no miolo das paredes exteriores, há perto de 2000 anos (Osório, 2006).

Devido à elevada durabilidade e resistência mecânica dos geopolímeros, o interesse em torno destes materiais tem vindo a aumentar progressivamente. São já muitas as empresas, universidades e centros de investigação em vários países que têm vindo a trabalhar no sentido de explorar ainda mais estes materiais.

Existem ainda muitos aspectos sobre os geopolímeros pouco conhecidos e caracterizados, como por exemplo, questões ligadas à trabalhabilidade, cura e composição do material e outras recentemente referidas por Pacheco-Torgal et al. (2012).

Outro entrave ao geopolímero é seu custo de fabrico, embora futuramente possa vir a ser atenuado logo que a sua produção se processe em escala mundial, tal como aconteceu com o cimento Portland (Pacheco-Torgal, et al., 2005).

Contudo, e uma vez que os geopolímeros aparentam ter melhor resistência aos ácidos e às altas temperaturas que os produtos fabricados com cimento Portland, permitindo também a utilização de um leque muito mais variado de matérias-primas, é possível que os ligantes geopoliméricos, sejam vistos como uma excelente alternativa aos cimentos convencionais (Osório, 2006).

### **3.1.1) História**

Recuando à década de 40, na Bélgica, um investigador chamado Purdon (1940), utilizou escórias activadas alcalinamente com hidróxido de sódio para o estudo das suas investigações (Pacheco-Torgal, et al., 2011).

Purdon (1940), após alguns estudos, concluiu que os hidróxidos de metais alcalinos podem actuar como catalizadores, tendo comprovado essa teoria através da lixiviação desse metal alcalino a partir do ligante endurecido em quantidades semelhantes às presentes na mistura (Pacheco-Torgal, et al., 2011).

Mas, foi Glukhovsky (1959) o primeiro investigador a estudar os ligantes utilizados em construções históricas, como foi o caso das pirâmides egípcias e os templos romanos, concluindo que, estes ligantes eram compostos por alumino-silicatos cálcicos hidratados à semelhança dos que ocorrem no cimento Portland e fases cristalinas do tipo analcite, uma rocha natural existente na crosta terrestre, o que explica a durabilidade daquele tipo de material (Pacheco-Torgal, et al., 2011).

Este mesmo autor baseia-se nessas investigações e desenvolve um novo tipo de ligante a que chama de “solo-cimento”. “Solo” por se assemelhar a uma rocha natural e “cimento” pela sua capacidade de ligante. Estes “Solo-cimentos” eram obtidos a partir de aluminossilicatos minerais moídos misturados com resíduos industriais ricos em álcalis (Glukhovsky, 1959), (Pacheco-Torgal, et al., 2011).

Shi & Day (1995) dizem que, a activação de escórias de alto-forno com  $Na_2O.nSiO_3$  conduziu à obtenção de uma resistência de 160MPa, após 90 dias de cura à temperatura ambiente, concluindo ainda que, as escórias apresentavam um certo grau de selectividade, ou seja, escórias de origens diversas podem reagir de forma diversa perante diferentes activadores (Pacheco-Torgal, et al., 2011).

Contudo, Glukhovsky (1980) já tinha realizado estudos acerca da activação das escórias de alto-forno. Em 1981, este autor classifica os activadores alcalinos em 6 grupos, onde M é um ião alcalino (Pacheco-Torgal, et al., 2011):

- 1) Álcalis cáusticos, MOH
- 2) Sais ácidos fracos,  $M_2CO_3$ ,  $M_2SO_3$ ,  $M_3PO_4$ , MF
- 3) Silicatos,  $M_2O.nSiO_3$
- 4) Aluminatos,  $M_2O.nAl_2O_3$
- 5) Aluminossilicatos,  $M_2O.Al_2O_3.(2-6) SiO_2$
- 6) Sais ácidos fortes,  $M_2SO_4$

Com os avanços das investigações, Davidovits (1979) desenvolveu e patenteou ligantes obtidos por activação alcalina de caulino e metacaulino, tendo criado em 1978 o termo “geopolímero”, surgindo desde aí uma nova “era” no mundo dos materiais (Pacheco-Torgal, et al., 2011).

Davidovits sugeriu ainda para a designação química de “geopolímeros” o termo “poli(sialato)”, em que sialato é uma abreviação para óxido aluminossilicato (Pacheco-Torgal, et al., 2011).

O quadro 3.1 mostra um breve resumo da evolução do conhecimento relativamente a cimentos alcalinos ou activados alcalinamente:

Quadro 3.1 – Resenha histórica sobre alguns acontecimentos importantes acerca de cimentos obtidos por activação alcalina e cimentos alcalinos (Li, et al., 2010).

<b>Autor</b>	<b>Ano</b>	<b>Descrição</b>
Civilização Romana	Séc. I	Argamassas e betões pozolânicas
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 (escórias-alcais-superplastificante)
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	Activação 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	Activação de escórias - $C_{12}A_7$
Talling e Brandstetr	1989	Activação alcalina de escórias
Wu et al.	1990	Activação de cimentos activados alcalinamente
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	Resistência, porosidade e permeabilidade de escórias activadas alcalinamente
Fernández-Jiménez e Puertas	1997	Cinética dos cimentos à base de escórias activadas alcalinamente
Katz	1998	Microestrutura de cinzas volantes activadas alcalinamente
Davidovits	1999	Química dos sistemas geopoliméricos
roy	1999	Oportunidades e desafios dos cimentos activados alcalinamente
Palomo	1999	Cinzas volantes activadas alcalinamente- um cimento para o futuro
Gong e Yang	2000	Cimento à base de lamas de alumínio/escórias activadas alcalinamente
Puertas	2000	Cimento à base de cinzas volantes/escórias activadas alcalinamente
Bakharev	2001-2002	Betão à base de escórias activadas alcalinamente
Palomo e Palacios	2003	Imobilização de resíduos tóxicos
Grutzeck	2004	Formação de zeolites
Sun	2006	Tecnologia dos sialatos
Duxson	2007	Tecnologia dos geopolímeros: Estado da arte
Hajimohammadi, Provis e Van Deventer	2008	Geopolímeros monofásicos
Provis e Van Deventer	2009	Geopolímeros: Estrutura, processamento e aplicações

### 3.1.2) Química

Davidovits ao criar o termo “Geopólimero”, pretendia traduzir a natureza deste material e mostrar que se trata claramente de um polímero inorgânico (Osório, 2006).

Este autor propõe, para a síntese destes materiais, uma explicação baseada na obtenção de 3 tipos de monómeros, de acordo com as razões moleculares entre a sílica e a alumina (Pinto, 2004):

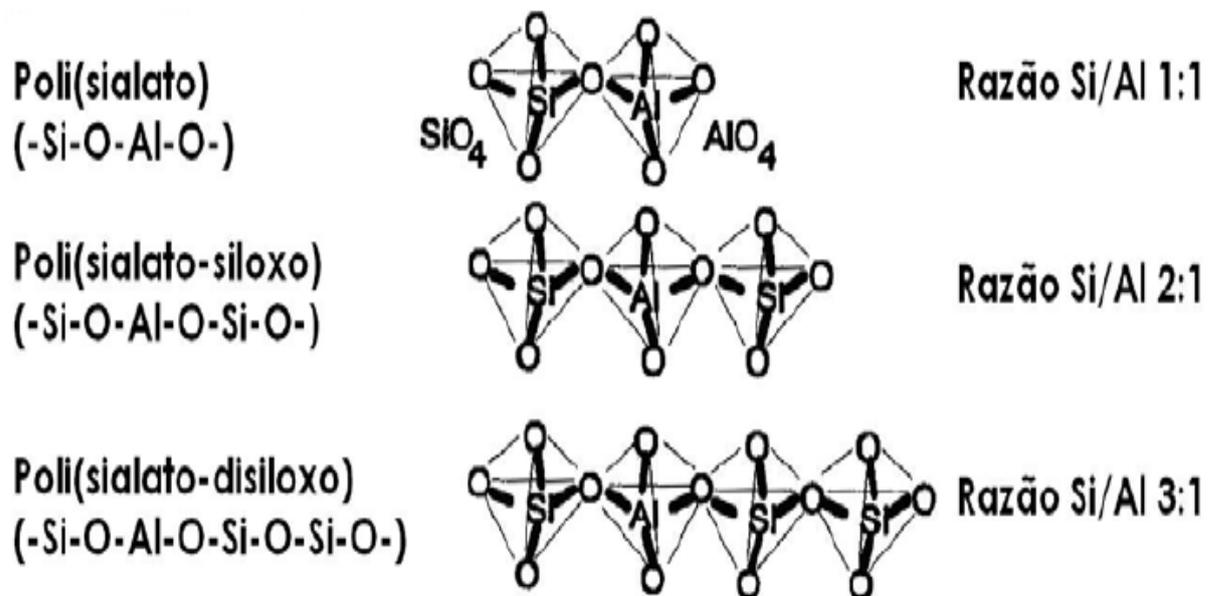


Figura 3.2 – Sialatos base para a formação dos geopolímeros (Pinto, 2004).

Pode dizer-se que a geopolimerização é basicamente uma reacção de hidratação que se verifica entre alguns dos óxidos que constituem os alumino-silicatos, em condições de elevada alcalinidade (Pinto, 2004). Esta reacção processa-se segundo uma determinada cronologia que está mais ou menos identificada (Palomo, et al., 2001), (Osório, 2006):

Fases de destruição – no início do processo, os iões hidróxido  $\text{OH}^-$ , provenientes do activador alcalino dão lugar à destruição das ligações covalentes das espécies em presença.

Fase de orientação e transporte - onde acontece a orientação dos precursores móveis e reestruturação interna de polisilicatos alcalinos.

Fase de coagulação/precipitação – começam a formar-se pequenos núcleos de coagulação que rapidamente evoluem para processos de precipitação massiva de gel, endurecendo rapidamente. É nesta última fase que se registam os fenómenos de policondensação, ainda que limitados em extensão e espacialmente desorganizados. Por este motivo, a estrutura final é essencialmente amorfa.

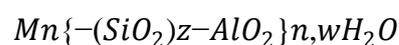
Este processo ocorre a baixas temperaturas (tal como acontece com os polímeros orgânicos) com a formação de orto-sialatos, que evoluem depois para poli-sialatos. “Sialato” é a abreviatura de silico-oxoaluminato (Pinto, 2004).

No entanto, esta rede inorgânica é essencialmente formada por cadeias de tetraedros de  $SiO_4$  e  $AlO_4$ , ligados alternadamente entre si e compartilhando todos os oxigénios (Osório 2006). Pode também formar-se cadeias de repetição mais ou menos longas constituídas pelos monómeros indicados na figura 3.3.

Assim, e considerando a generalidade dos elementos alcalinos (grupo I da Tabela Periódica) e as razões Si/Al de composição, pode considerar-se várias possibilidades de obtenção de produtos.

Actualmente, apenas o sódio-polisialato (Na-PS), o potássio-polisialato (K-PS), o (sódio, potássio) – polisialato-siloxo [(Na-K)-PSS] e o potássipolisialato - siloxo (K-PSS) são usados no fabrico dos materiais geopoliméricos (Pinto, 2004).

A fórmula geral pode escrever-se assim (Pinto, 2004):



Onde,

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

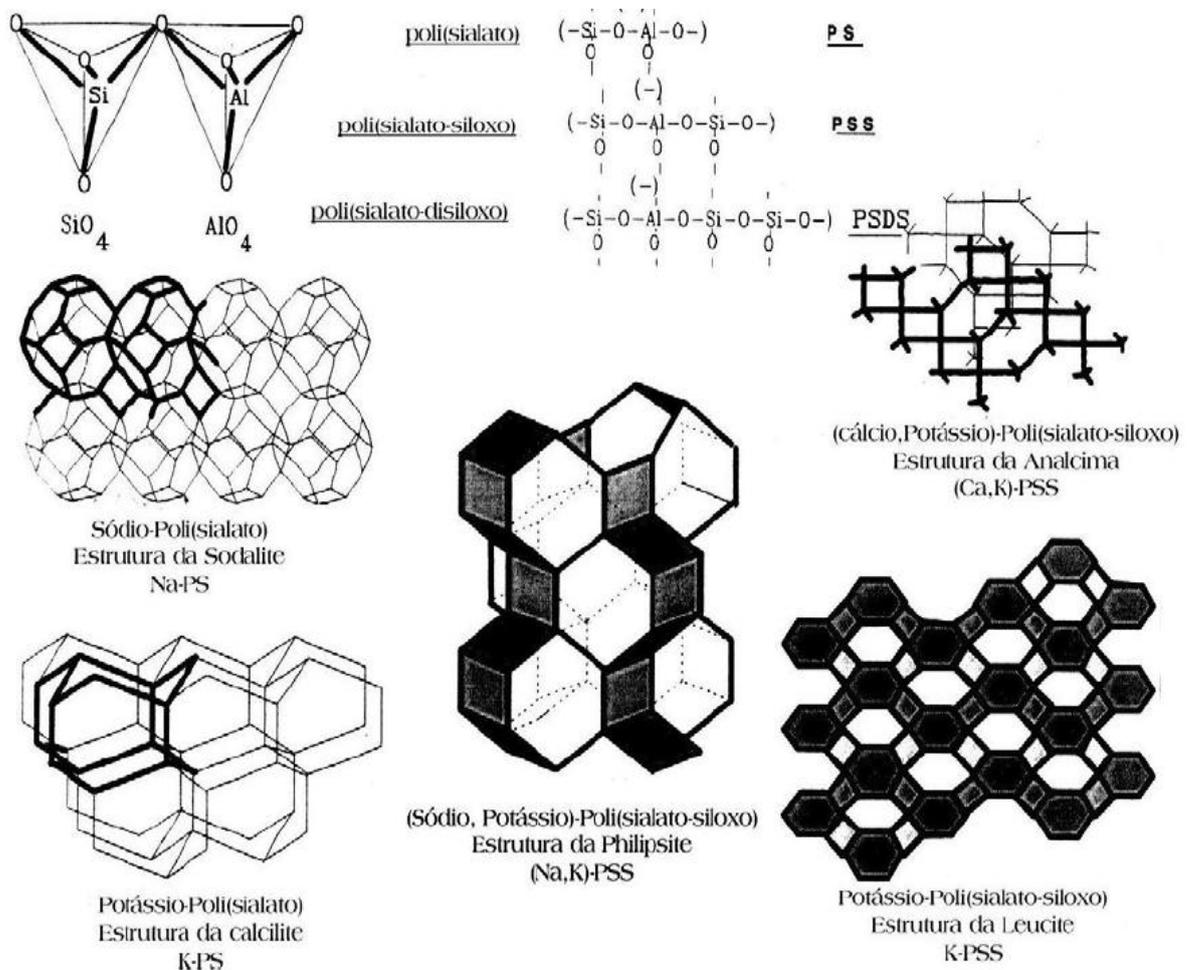


Figura 3.3 - Aspectos Estruturais e Nomenclatura (Pinto, 2004).

O resultado deste processo, traduz-se na formação de estruturas zeolíticas, como se pode ver na fig.3.4. Os zeólitos são extremamente estáveis a nível químico e é esse aspecto que torna os geopolímeros particularmente interessantes em comparação com o cimento Portland (Pinto, 2004).

Contudo, enquanto os zeólitos se formam na Natureza com uma fase líquida abundante e sem restrições, os geopolímeros são fabricados com a quantidade de activador mínima necessária para assegurar a trabalhabilidade das pastas. Além disso, o tempo de duração deste processo é

muito curto, o que conduz a materiais de natureza amorfa. Enquanto os primeiros apresentam uma estrutura aberta (figura 3.4) e com elevado volume de vazios, os “zeólitos” geopoliméricos, devido à sua estrutura amorfa, possuem vazios de menor dimensão (Pinto, 2004), o que permite obter uma maior capacidade em termos de permeabilidade e comportamento mecânico.

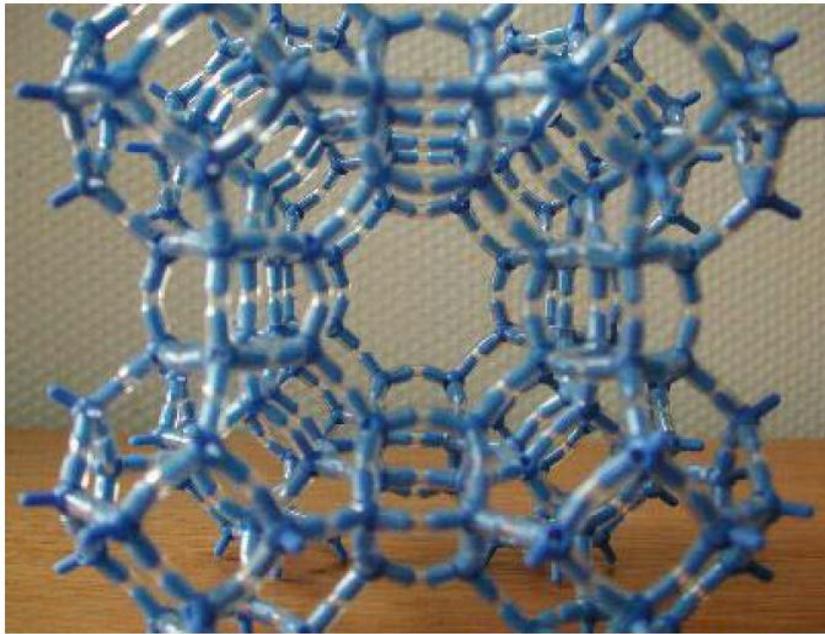


Figura 3.4 – Canais e estrutura aberta dos zeólitos (Zeólito A<sup>1</sup>) (Osório, 2006)

Teoricamente, todos os alumino-silicatos poderiam ser activados e formar um geopolímero, mas, existem estudos que indicam que nem sempre é assim (Xu, 2000). Na realidade, a interacção entre os minerais e o meio alcalino é algo complexa, e sobretudo determinadas espécies são quimicamente muito estáveis não podendo facilmente destruir a sua estrutura. Assim, não é fácil prever à partida se um determinado alumino-silicato é ou não susceptível de formar uma matriz geopolimérica (Osório, 2006).

Então, para que o processo de activação seja mais simples e directo, e se obtenham os melhores resultados possíveis, os alumino-silicatos devem ter uma história térmica adequada, que tenha propiciado a perda de água de constituição e a alteração da coordenação do alumínio com o oxigénio.

<sup>1</sup> Um zeólito A é o mais simples de todos, com uma razão de 1 sílica: 1 alumina: 1 catião de sódio (Pinto, 2004).

Na Natureza o alumínio encontra-se normalmente hidratado, o que significa que a nível molecular ele se apresenta organizado com o oxigénio numa forma octaédrica. O tratamento térmico, desde que efectuado a temperatura adequada, vai dar lugar à desidratação, ou seja à junção de dois hidroxilos  $OH^-$ , formando uma molécula de água, que sai deixando no seu lugar um átomo de oxigénio. O alumínio coordena-se assim de forma tetraédrica com o oxigénio, condição que é muito instável e em que se propicia um elevado potencial de combinação (Pinto, 2004).

Contudo, quando o material não possui uma história térmica natural ou provocada, por exemplo no caso das cinzas volantes ou da sílica de fumo, terá que ser submetido a um tratamento térmico de desidratação controlada<sup>2</sup>, transformando-se num produto amorfo com capacidade de se combinar quimicamente. O caulino, por exemplo, que é um aluminosilicato resultante da meteorização das rochas feldspáticas, deve ser submetido a uma temperatura à volta de 750 °C, para que o alumínio passe de octaédrico a tetraédrico, formando assim o chamado metacaulino (Pinto, 2004). Alguns exemplos de alumino-silicatos que se enquadram na primeira situação e que por isso podem ser usados directamente no fabrico de um geopolímero são as cinzas volantes, cinzas vulcânicas, escórias de alto-forno, entre outros (Osório, 2006).

Glukhovskiy conclui que, a activação alcalina não se limita apenas aos aluminosilicatos, sendo também possível obter sistemas ligantes através deste processo com materiais com um significativo teor de cálcio, usando por exemplo cal, escórias de alto-forno, etc (Pinto, 2004).

Estes sistemas onde o cálcio está presente, são susceptíveis também de activação alcalina, sendo assim distintas as estruturas que se formam nestes materiais (Osório, 2006).

De acordo com a presença relativa de sílica, alumina e óxido de cálcio, poderão obter-se silicatos ou C-S-H (silicatos cálcicos hidratados) do mesmo tipo que se verifica no cimento Portland. Assim, poderá dizer-se que a activação alcalina é portanto uma designação mais abrangente do que a geopolimerização, sendo esta portanto uma parte daquela (Osório, 2006).

2 – Se a temperatura for excessiva podem verificar-se processos secundários de recristalização.

### 3.1.3) Aplicações

A aplicação dos geopolímeros começa a surgir e a dar que falar em todo o mundo no ramo da Indústria. As suas propriedades têm vindo a revelar-se, em algumas situações, bastante vantajosas relativamente a outros materiais existentes no mercado.

A sua aplicação insere-se principalmente na área de engenharia civil, mas também se aplica em áreas como a aeronáutica, automobilismo, a indústria dos plásticos, a balística e mesmo a arte (figura 3.5) (Osório, 2006).

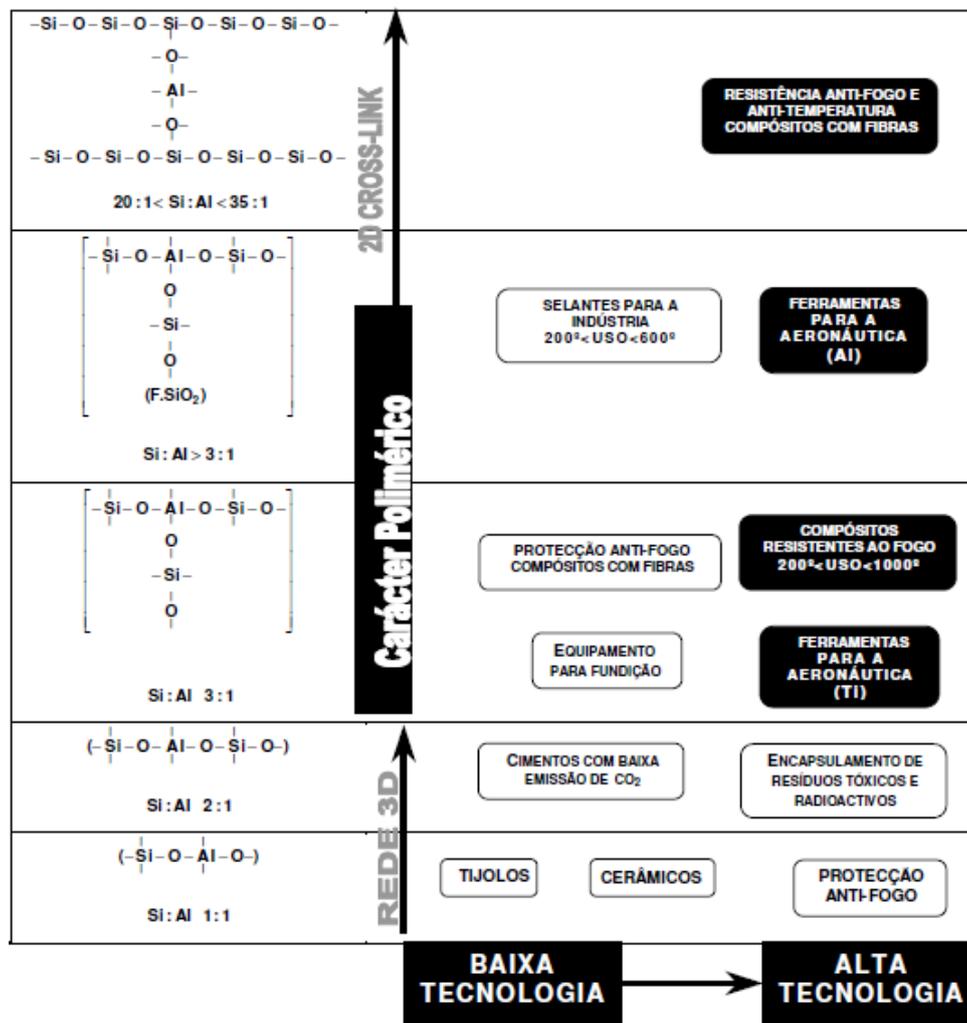


Figura 3.5 - Aplicações bem sucedidas de geopolímeros pelo Instituto Géopolymère (Pinto, 2004).

Como já foi referido, os ligantes geopoliméricos apresentam altas resistências mecânicas em poucas horas, assim como elevada resistência ao fogo, ao gelo-degelo e a ataques químicos, podendo ser considerados materiais refractários, deixando antever um vasto campo de aplicações.

A figura 3.5 mostra uma variedade de aplicações em função da razão Si/Al, que varia desde 1 até 35, permitindo a obtenção de materiais com maior carácter polimérico, de modo a formar cadeias mais largas e portanto mais indicadas para outro tipo de aplicações (Vasconcelos, 2010).

Este tipo de material está constantemente em testes e investigações, de modo a encontrar um betão com capacidades que o cimento Portland não tem ou melhores que este.

Assim, o conjunto de aplicações do betão geopolimérico é ainda alargado, funcionando como material estrutural, material para fabricação de elementos pré-fabricados, protecção ao fogo de elementos metálicos, reabilitação de alvenaria de granito, melhoramento de solos brandos, imobilização de material tóxico ou radioactivo (Osório, 2006).

Podia-se pensar em uma substituição do cimento Portland por um ligante geopolimérico, mas, a curto e médio prazo, parece irrealista. No entanto, à medida que as investigações vão avançando e progressos são feitos, tudo indica que num futuro próximo este tipo de material terá o seu lugar reservado no mercado.

### **3.2) Resistência Mecânica**

Os vários estudos realizados acerca dos ligantes geopoliméricos, revela que a resistência mecânica dos betões obtidos pode ser considerada como elevada, quando comparada com betões que utilizam cimento Portland (Pacheco-Torgal, et al., 2009).

Deste modo, a resistência mecânica dos ligantes geopoliméricos varia de acordo com (Vasconcelos, 2010):

- A natureza dos constituintes utilizados, tais como:
  - Precursor;
  - Agregados;
  - Activador;
- Aumenta com a redução da quantidade da fase líquida usada na mistura;
- A razão silicato de sódio/hidróxido de sódio também tem influência no resultado final, quanto maior a razão mais elevada a resistência;
- Varia com a temperatura de cura. Investigações já realizadas apontam para que uma temperatura de cura de 60-65°C proporciona bons resultados.

A resistência mecânica varia com o tempo de cura. Este processo de endurecimento é muito rápido, que normalmente estabiliza entre os 7 e os 10 dias, em condições de temperatura ambiente. Contudo, se a cura for feita a uma temperatura adequada, a reacção geopolimérica poderá ficar praticamente completa em poucas horas (Pacheco-Torgal, et al., 2009).

A dimensão e a forma dos provetes também influenciam o valor da resistência, assim como a velocidade de aplicação das cargas.

A resistência mecânica de um betão geopolimérico pode atingir valores superiores a 50 MPa, podendo alcançar mesmo valores acima dos 100 MPa no caso de composições cuidadas e bem curadas (Torgal, et al., 2009). Estes betões também resistem bem a temperaturas até 1000°C (Osório, 2006).

### **3.3) Durabilidade**

Tal como a resistência mecânica e a trabalhabilidade, a durabilidade é também fundamental no que diz respeito à avaliação do desempenho de um material, sendo um dos aspectos mais importantes quando se caracteriza um material de construção.

A durabilidade é um tema de extrema importância por parte dos investigadores, uma vez que é nesta propriedade que o betão geopolimérico pode apresentar maiores vantagens em relação ao cimento Portland.

Esta importância na durabilidade de um material, pode perder todo o seu interesse quando um material apresenta um tempo de vida útil reduzido, apresentando custos de reparação ou substituição, sobrepondo-se às vantagens do material (Vasconcelos, 2010).

Quando se aborda o tema da “durabilidade” dos betões geopoliméricos, aborda-se essencialmente determinados aspectos, tais como (Vasconcelos, 2010):

- Elevada resistência ao ataque de ácidos;
- Elevada resistência ao ataque de sulfatos;
- Inexistência de reacção alcalis-agregado;
- Excelente resistência ao fogo, podendo ser considerados materiais refractários;
- Boa resistência ao gelo-degelo;
- Elevada resistência à abrasão.

Pinto (2004) refere que, a boa durabilidade dos ligantes geopoliméricos deve-se à elevada inércia e estabilidade química destes materiais. A sua estrutura zeolítica (ainda que amorfa), confere-lhe a resistência a factores de degradação, ao contrário do cimento Portland Normal. Vários investigadores referem ainda que, a resistência ao ataque por ácidos é uma das grandes vantagens dos ligantes geopoliméricos obtidos por activação alcalina em comparação com o cimento Portland (Pacheco-Torgal, et al., 2010).

Davidovits et al. (1990) refere durante um estudo que, ligantes activados alcalinamente quando imersos durante 4 semanas em soluções de 5% de ácido clorídrico e sulfúrico perderam massa entre 6 e 7%. Os mesmos investigadores referem ainda que, a perda para betões à base de cimento Portland é de 78% a 95% (figura 3.6) (Pacheco-Torgal, et al., 2010).

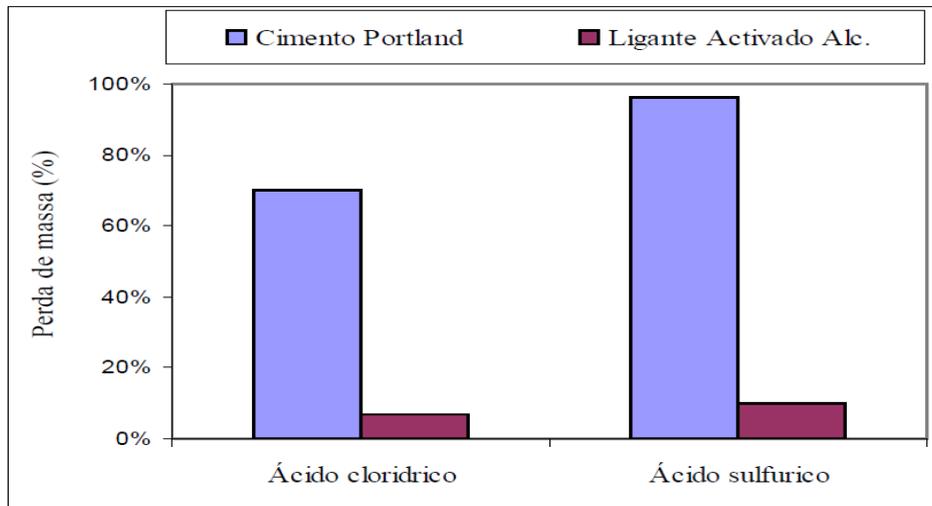


Figura 3.6 – Resistência aos ácidos de cimento Portland e ligantes geopoliméricos (Pacheco-Torgal, et al., 2011).

### 3.4) Resistência ao fogo

Alguns investigadores (Krivenko & Guziy, 2007) estudaram o comportamento ao fogo dos ligantes activados alcalinamente e verificaram um bom desempenho (figura 3.7) por parte destes materiais. Assim, este material é indicado para utilização em obras na qual o risco de incêndio é elevado, como em túneis e em edifícios altos (Pacheco-Torgal, et al., 2011).



Figura 3.7 – Resistência ao fogo de placas de betão activado alcalinamente (Pacheco-Torgal, et al., 2011)

Também Perná et al. (2007) analisaram a possibilidade da utilização de ligantes activados alcalinamente como materiais anti-fogo. De acordo com as normas da República Checa, um material apresenta um bom comportamento anti-fogo se na face oposta à acção do fogo a temperatura não ultrapassar a temperatura de 120°C. Durante os ensaios realizados essa temperatura apenas foi atingida ao fim de aproximadamente duas horas, o que reflecte para o bom desempenho deste material (figura 3.8) (Pacheco-Torgal, et al., 2011).

h



Figura 3.8 – Placas obtidas por activação alcalina sujeitas a fase térmica. São visíveis dois termopares aplicados na face posterior da placa (Pacheco-Torgal, et al., 2011).

Quando comparados com o cimento Portland, os estudos já desenvolvidos na área, referem que os betões geopoliméricos apresentam uma melhor resistência ao fogo. Tal referência deve-se à natureza química do ligante geopolimérico. Davidovits menciona que a estrutura tridimensional zeolítica com nano-porosidade dos geopolímeros permite que a água livre e a água de ligação evaporem sem danificação do ligante quando sujeito a elevadas temperaturas (Osório, 2006).

Assim, a boa resistência ao fogo por parte do ligante, atrás referida, fica condicionada pelos agregados utilizados. Pinto (2004) refere que devem ser usados agregados com comportamento estável a elevadas temperaturas. Os melhores resultados obtidos por este autor foram de 60% de resistência residual no caso de agregados porcelânicos moídos, sob a influência de uma temperatura de 900°C (Osório, 2006).

### 3.4.1) Resistência a altas temperaturas

Os betões à base de cimento Portland apresentam um fraco desempenho quando sujeitos a uma fase térmica, iniciando a sua desintegração para temperaturas acima dos 300°C. Por sua vez, os ligantes activados alcalinamente são termicamente mais estáveis.

Alguns investigadores referem que, se consegue obter uma estabilidade térmica de ligantes obtidos pela activação de cinzas volantes mesmo para temperaturas próximas de 1000°C (Pacheco-Torgal, et al., 2011).

Bortnovky et al. (2007) analisaram uma activação de ligantes à base de metacaulino e resíduos de xisto, observando um bom desempenho mecânico destes materiais quando sujeitos a uma fase térmica (Quadro 3.2) (Pacheco-Torgal, et al., 2011).

Quadro 3.2 – Percentagem de resistência residual de amostras submetidas a um aumento de temperatura (Pacheco-Torgal, et al., 2011).

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

No quadro 3.2, é de notar que os provetes sofreram ligeiras perdas de resistência entre as temperaturas de 600° e 1000°C, apresentando no entanto em alguns casos ganhos de resistência para 1200°C.

Outros estudos acerca desta matéria, nomeadamente Kong et al. (2008), analisaram o desempenho térmico de provetes obtidos pela activação de metacaulino concluindo que a resistência residual após a fase térmica até aos 800°C é influenciada pela razão Si/Al do ligante, sendo que, os provetes em que a razão Si/Al se situava no intervalo 1,5-1,7 apresentavam maior resistência residual (Pacheco-Torgal, et al., 2011).

## **Capítulo 4 – MATERIAIS UTILIZADOS E MÉTODOS DE ENSAIO**

### **4.1) Breve Introdução**

Este capítulo será apresentado em duas fases complementares. A primeira fase onde serão apresentados os vários materiais utilizados ao longo deste trabalho laboratorial, visando as suas principais características e propriedades. A segunda fase aborda as diferentes composições geopoliméricas utilizadas ao longo deste trabalho laboratorial e os respectivos ensaios laboratoriais a que estas várias composições geopoliméricas foram submetidas.

Em relação aos ensaios realizados, serão referidas as técnicas de ensaio que são recomendadas pelas normas, como também serão referidos os vários tipos de equipamentos utilizados para os diferentes ensaios.

Todos os ensaios foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção do Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho, situado no Campus de Azurém, Guimarães.

Importa, também, salientar que todas as fases da parte laboral do presente trabalho foram importantes para a obtenção dos melhores resultados possíveis, desde a escolha adequada dos materiais a utilizar até ao processo de execução dos ensaios.

### **4.2) Materiais**

#### **4.2.1) Cinzas volantes**

As cinzas volantes têm grande disponibilidade no mercado em geral, são mais baratas que o cimento Portland, o metacaulino e a sílica de fumo, embora não apresentem características mecânicas tão elevadas e tão rápidas no tempo como estes constituintes referidos. Para além disso, as cinzas possibilitam bons níveis de durabilidade, baixa necessidade de água de amassadura e, eventualmente, maiores resistências mecânicas a longo prazo.

A nível químico, as cinzas são maioritariamente constituídas por dióxido de silício ( $SiO_2$ ), óxido de alumínio ( $Al_2O_3$ ) e óxido de ferro ( $Fe_2O_3$ ), sendo por isso uma interessante fonte de alumínio e sílica para os geopolímeros.

As cinzas volantes utilizadas neste estudo são da categoria N, valor declarado de finura 16%, categoria de perda ao fogo B, massa volúmica de  $2300 \text{ Kg/m}^3$  e são produzidas no centro de produção de Sines da EDP – Gestão da Produção de Energia, S.A.

A respectiva ficha técnica é apresentada no Anexo A, apresentando os valores característicos da cinza e os valores alvo ou de alerta para os ensaios de controlo interno e de auto-controlo.

#### 4.2.2) Areia

A areia utilizada na realização deste trabalho é proveniente de uma empresa de materiais de construção civil em Nogueira, Braga. Esta areia é considerada uma “meia areia” proveniente do rio, apresentando mesmo assim algumas partículas de dimensões um pouco elevadas.

Depois da selecção da areia, fez-se então a respectiva granulometria (Quadro 4.1) (figura 4.2). O método adoptado foi o da peneiração a seco, seguindo a Norma NP EN 933-1, com peneiros especificados na NP EN 933-2, e de acordo com a ISSO 33310-2 e a NP 933-5 (figura 4.1).



Figura 4.1 – Série de peneiros e máquina de agitar para análise granulométrica.

#### 4.2.2.1) Análise granulométrica da Areia

A análise granulométrica da areia apresentou os resultados que se mostram no quadro 4.1 e na figura 4.2.

Quadro 4.1 – Análise granulométrica da areia

Dimensões (mm)	Massa (g)	% Retido	% Cumulativo passado
16	0	0	100
8	0	0	100
4	18,425	4	96
2	99,475	21	75
1	126,4	26	49
0,5	95,975	20	29
0,2	79,950	16	12
0,125	45,825	10	2,5
0,063	0,161	0	2,5
Resto	11,808	3	
Total	478,019	100	
$\frac{M_{total} - (\sum R_i + Resto)}{M_{total}}$		0,1 %	Obs: ensaio válido ( $\leq 1\%$ )

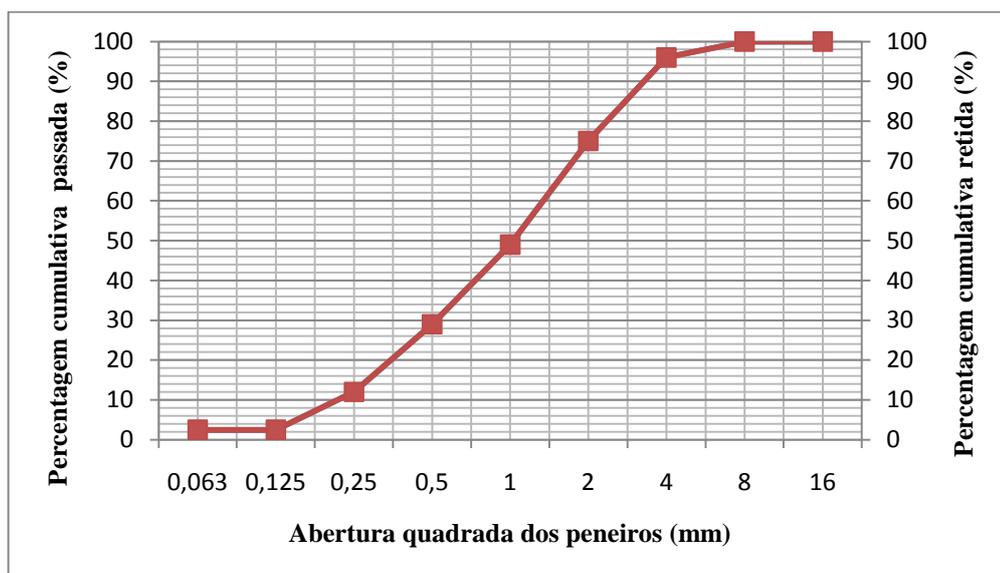


Figura 4.2 – Curva granulométrica do agregado

De salientar que, a areia utilizada foi a mesma em todas as composições, sendo previamente seca em uma estufa à temperatura de 100°C durante cerca de 48 horas antes da realização das amassaduras, para eliminar quaisquer vestígios de humidade e, posteriormente, ser colocada em repouso até atingir a temperatura ambiente.

### 4.2.3) Silicato de Sódio

O silicato de sódio ou vidro solúvel ( $Na_2SiO_3$ ) é comercializado em pedra ou em solução aquosa e caracterizado pelas suas propriedades alcalinas e adesivas. A sua maior aplicação incide na utilização em betões, protecção passiva ao fogo, na indústria têxtil, metalúrgica e cerâmica.

O silicato de sódio utilizado é proveniente da empresa Marcande, em Guimarães (figura 4.3).



Figura 4.3 – Silicato de sódio

### 4.2.4) Hidróxido de Sódio

O hidróxido de sódio (figura 4.4) desempenha duas funções na sua actividade, actuando como activador simples, promovendo num primeiro passo a dissolução do alumino-silicato e depois funciona como um ligante, reorganizando a estrutura.

Tal como Davidovits (1999) sugeriu, misturou-se o hidróxido de sódio com o silicato de sódio. Actuando como activador composto, este é ligeiramente menos viscoso e obtém uma melhoria nas condições operativas.

Mas, devido a questões de reacções térmicas, tendo o hidróxido de sódio uma elevada reacção exotérmica, este foi previamente diluído em água destilada. Seguidamente repousou cerca de 24 horas. Com isto, evita-se o risco de o tempo de presa ser influenciado pela reacção exotérmica provocada pelo hidróxido de sódio.



Figura 4.4 – Hidróxido de sódio

#### 4.2.4) Cal

A cal utilizada durante este trabalho (figura 4.5) foi adquirida à empresa Calcidrata, Indústrias de Cal, S.A., localizada na Estrada 5 de Outubro, Pé da Pedreira, em Alcanede. Esta cal caracteriza-se como uma cal hidratada ou hidróxido de cálcio e que pode ser utilizada em várias vertentes no contexto da Engenharia Civil, tais como: Assentamentos resistentes, acabamentos rugosos, revestimentos exteriores, reboco de parede exposto à chuva, Alicerces, rebocos interiores, argamassas de enchimento, estuques e assentamentos interiores.



Figura 4.5 – Cal hidratada

A cal hidratada, também denominada de cal apagada resulta da reacção entre a cal viva e a água. Assim, obtemos a reacção química que se apresenta na figura 4.6.



Figura 4.6 – Reacção da cal hidratada.

Após a reacção consegue-se obter um pó seco, fino e com elevado grau de brancura.

A respectiva ficha técnica encontra-se no Anexo B.

### 4.3) Composição, mistura e cura dos ligantes

Para alcançar o objectivo deste trabalho e encontrar uma composição de argamassa geopolimérica com as características desejadas foram realizadas 6 misturas geopoliméricas diferentes variando os constituintes do ligante (cinza volante e cal hidratada), mantendo constante os activadores, sendo eles o silicato de sódio e o hidróxido de sódio (12M) (Quadro

4.2). Por último foi produzida uma argamassa de cimento Portland para poder comparar com as várias composições geopoliméricas (Quadro 4.3).

Nas composições das misturas geopoliméricas foi utilizada a razão mássica de 2:1:0.65 sendo areia, ligante (cinza, cal) e activadores (hidróxido e silicato de sódio) respectivamente. Para a composição do cimento Portland utilizou-se a razão mássica de 3:2:1, sendo areia, cimento e água respectivamente.

Assim obteve-se as composições da mistura geopolimérica e do cimento Portland que constam dos quadros 4.2 e 4.3.

Quadro 4.2 – Composições das misturas geopoliméricas:

	Areia (g)	Ligante (g)		Activador (g)	
		Cinzas Volantes	Cal Hidratada	Silicato	Hidróxido 12M
<b>Mistura 1</b>	4550	2275	0 (0%)	1049	429
<b>Mistura 2</b>	4550	2161	114 (5%)	1049	429
<b>Mistura 3</b>	4550	2047	227 (10%)	1049	429
<b>Mistura 4</b>	4550	1934	341 (15%)	1049	429
<b>Mistura 5</b>	4550	1819	455 (20%)	1049	429
<b>Mistura 6</b>	4550	1706	569 (25%)	1049	429

Quadro 4.3 – Composições do cimento Portland:

	Areia (g)	Ligante (g)	Água (g)
<b>Cimento Portland</b>	2700	900	450

As misturas foram efectuadas com a utilização de um equipamento de mistura mecânico de uma pá e um recipiente referido na Norma NP EN 196-1 (figura 4.7).



Figura 4.7 – Equipamento de mistura mecânico e recipiente normalizado.

Os tempos para cada acção a efectuar ao longo da mistura foi fixado na realização da primeira mistura e repetido nas restantes misturas.

Quanto à compactação de cada mistura, esta foi efectuada utilizando a mesa vibratória (figura 4.8).



Figura 4.8 – Mesa vibratória para efectuar a compactação.

Depois de realizada uma mistura e a determinação da respectiva trabalhabilidade procedeu-se à preparação dos provetes para serem moldados posteriormente. Os provetes permaneceram 24 horas no Laboratório de Materiais de Construção, passando depois à sua desmoldagem. A cura foi efectuada à temperatura ambiente.

## 4.4) Métodos de Ensaio

Nesta fase serão apresentados os vários ensaios realizados ao longo do trabalho prático. Os ensaios seguintes terão como objectivo determinar a trabalhabilidade de cada mistura e avaliar a resistência à compressão, à flexão e a altas temperaturas.

### 4.4.1) Trabalhabilidade

O ensaio para avaliar a trabalhabilidade de uma determinada mistura foi realizado segundo a norma EN 1015-3, 1999. Neste ensaio pretende-se avaliar a consistência das várias argamassas ainda no estado fresco, através da medição da sua deformação devido a uma acção mecânica exterior. Para efectuar essa avaliação recorreu-se a uma mesa de espalhamento (figura 4.9), sendo esta também normalizada.



Figura 4.9 – Mesa de espalhamento

A realização deste ensaio procede-se em várias etapas (figura 4.10). Primeiramente é necessário limpar a superfície da mesa de espalhamento e as paredes do molde. Seguidamente de forma cuidada, deve-se passar com óleo as paredes do molde e a superfície da mesa com o auxílio de uma trincha, não colocando óleo em excesso. Depois, começa-se por centrar o molde na mesa de espalhamento, segurando o molde para manter a posição, e preenche-se

com duas camadas de modo a que cada camada ocupe cerca de metade do volume do cone. Cada camada é compactada com 10 apiloamentos pela barra normalizada.

Após o preenchimento do molde e sua compactação, retira-se o molde lentamente e com cuidado e, no instante imediatamente a seguir, roda-se a manivela 15 vezes para se obter o espalhamento, sendo o valor do espalhamento definido pela média aritmética do diâmetro da mistura em três direcções.



Figura 4.10 – Fases de execução do ensaio para determinação da trabalhabilidade

Para uma melhor compreensão dos resultados, pode-se converter o valor do espalhamento em termos de consistência, como apresenta a expressão 4.1.

$$\text{Consistência} = \frac{D_{med} - 100}{100} \times 100 [\%] \quad (4.1)$$

Sendo,

$$D_{med} = \frac{\sum d_i}{3} \quad (4.2)$$

Para  $i = 1, 2$  e  $3$ , com  $d_i$  – diâmetros de espalhamento [mm].

#### 4.4.2) Resistência à Flexão

O ensaio para avaliar a resistência à flexão foi realizado segundo a norma EN 1015-11, 1999. Para a sua realização utilizaram-se moldes de 3 provetes com dimensões de  $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$  (figura 4.11). Estes foram submetidos ao ensaio de flexão através da máquina universal LLOYD LR30K (figura 4.12) (EN ISO 7500-1, 2004) com as características referidas no quadro 4.4. Realizaram-se ensaios a cada mistura geopolimérica e ao cimento Portland. Cada mistura foi submetida a altas temperaturas, sendo efectuado, posteriormente, o ensaio à flexão para cada uma das várias temperaturas, variando desde a temperatura ambiente até aos  $800^\circ\text{C}$ , e por cada idade de 7 e 14 dias.



Figura 4.11 – Molde de 3 provetes

Quadro 4.4 – Características da LLOYD LR30K:

Gama Nominal	0 a 3000 kN
Resolução	0,1 kN (0 a 1000 kN); 1 kN (1000 a 3000 kN)
Sentido	Compressão



Figura 4.12 – Máquina universal de ensaios LLOYD.

Para efectuar o cálculo da resistência à flexão das várias misturas, colocou-se o provete sobre os dois apoios cilíndricos do equipamento de ensaio, de maneira a que o centro do provete coincida exactamente com o ponto de aplicação da força. Depois de o provete estar apoiado e centrado, aproximou-se com cuidado o cutelo à face superior do provete. Seguidamente, a máquina começou por aplicar uma força gradual crescente, de modo contínuo e sem choques, ao ritmo  $50 \pm 10\text{N/s}$ , até se verificar a rotura do provete. Posteriormente foi retirada a força de rotura através do gráfico obtido pelo programa NEXYGEN plus (figura 4.13), da máquina de ensaio LLOYD.

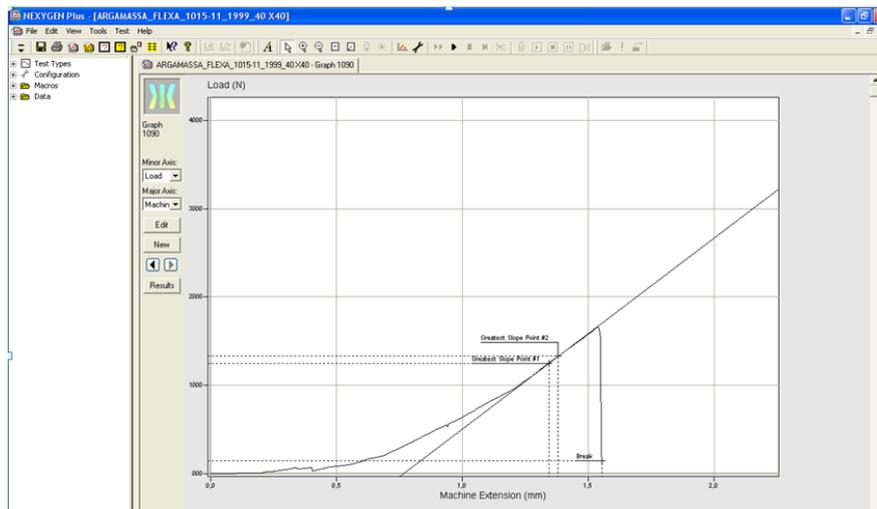


Figura 4.13 – Exemplo de cálculo do valor máximo de resistência à flexão obtido pelo gráfico no programa NEXYGEN plus, da máquina de ensaio LLOYD.

O valor de resistência à flexão de cada argamassa de determinada temperatura e idade é obtido com a média aritmética dos valores individuais de cada provete.

Assim, o valor da resistência à flexão ( $R_f$ ) é dado pela expressão 4.3:

$$R_f = \frac{1,5 \times F_f \times l}{b d^2} \quad (4.3)$$

Sendo,

$R_f$  – resistência à flexão [MPa];

$F_f$  – força de rotura à flexão [N];

$l$  – distancia entre os apoios [mm];

$B$  – largura do provete [mm];

$D$  – espessura do provete [mm];

#### 4.4.3) Resistência à Compressão

O ensaio para avaliar a resistência à compressão foi realizado segundo a norma EN 1015-11, 1999. Para efectuar este ensaio recorreu-se às metades dos provetes originadas do ensaio à flexão, utilizando assim provetes com dimensões de  $40 \times 40 \times (\pm 80) \text{ mm}^3$ , para cada mistura e para as idades de 7 e 14 dias. Estes provetes foram submetidos a uma máquina universal de ensaio (figura 4.14), da marca ELE, com uma unidade de medida digital DK38 e um transdutor de força C18/3MN I. Esta máquina ELE apresenta as características mencionadas no quadro 4.5.

Quadro 4.5 – Características da máquina de ensaio ELE

Capacidade	100 KN
Banda de velocidades	0,001 to 508 mm/min
precisão da velocidade	$\leq 0,2 \%$ no estado estacionário
Máximo deslocamento	870 mm
Largura entre colinas	404 mm
Resolução mínima	0,001
Precisão de carga	0,50%
Extensão da resolução	0,05 $\mu\text{m}$
Extensómetro	Analógico ou digital
Sistema de medida de carga	EN ISO 7500: 2004 Class 0,5 ASTM E4
Temperatura de operação	5°C a 35°C



Figura 4.14 – Equipamento de ensaio à compressão

Cada provete submetido à compressão foi colocado na cavidade de ensaio da máquina de compressão. Seguidamente aplicou-se uma força gradualmente crescente, de modo contínuo e sem choques, até surgir a rotura do provete. A força de rotura é automaticamente fornecida pela máquina de ensaio (figura 4.15).



Figura 4.15 – Visor da máquina universal de ensaios ELE.

Assim, o valor da resistência à compressão ( $R_c$ ) é dado pela expressão 4.4.

$$R_c = \frac{F}{A} \quad (4.4)$$

Sendo,

$R_c$  – resistência à compressão [MPa];

$F$  – força de rotura à compressão [N];

$A$  – área de aplicação de carga [ $40 \times 40 \text{ mm}^2$ ].

O valor da resistência à compressão de cada mistura numa determinada idade e submetida a determinada temperatura é obtido com a média aritmética dos valores individuais de cada provete.

#### **4.4.4) Resistência ao Fogo**

Para a determinação da resistência ao fogo optou-se por realizar o respectivo ensaio de acordo com o referido em 2.3.2, mais especificamente o caso A da (figura 2.8), onde o provete ensaiado foi submetido a altas temperaturas e depois testado a quente, mesmo depois de ser arrefecido por um jacto de água imediatamente a seguir à retirada do provete do forno. Com isto pretende-se simular a situação de um incêndio, com os provetes ensaiados a atingirem os 800°C no processo de aquecimento.

##### **4.4.4.1) Resistência a altas temperaturas**

Como foi referido anteriormente, durante a realização do ensaio para testar a resistência a altas temperaturas o provete foi aquecido num forno (figura 4.16) situado no Laboratório de Estruturas de Engenharia Civil da Universidade do Minho, onde foi submetido a altas temperaturas, atingindo temperaturas próximas de 800°C.



Figura 4.16 – Equipamento para realizar o ensaio de altas temperaturas.

Para efectuar este ensaio colocaram-se 4 provetes de uma determinada mistura no forno, sendo cada provete referente às temperaturas de 200, 400, 600 e 800°C. Colocados os provetes no interior do forno (figura 4.16), liga-se e este vai aquecer atingindo os 200°C ao fim de 15 minutos, os 400°C ao fim de 30 minutos e assim sucessivamente até atingir os 800°C ao fim de 1 hora. À medida que os provetes atingem as temperaturas desejadas retira-se o provete do forno e arrefece-se com um jacto de água (figura 4.17). O provete após o jacto de água ainda se mantém quente e imediatamente a seguir é ensaiado à flexão e à compressão testando as suas capacidades após estar submetido a altas temperaturas.



Figura 4.17 – Arrefecimento do provete após submissão a altas temperaturas.



## Capítulo 5 – ANÁLISE DE RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados dos vários ensaios realizados ao longo do trabalho laboratorial. Os resultados obtidos permitem analisar e reflectir como varia a resistência à flexão e à compressão quando um betão geopolimérico e o cimento Portland são submetidos a altas temperaturas, avaliando também a consistência de cada mistura geopolimérica utilizada.

### 5.1) Análise da consistência das misturas geopoliméricas

O gráfico da figura 5.1 apresenta a consistência das várias misturas geopoliméricas realizadas ao longo do trabalho laboratorial.

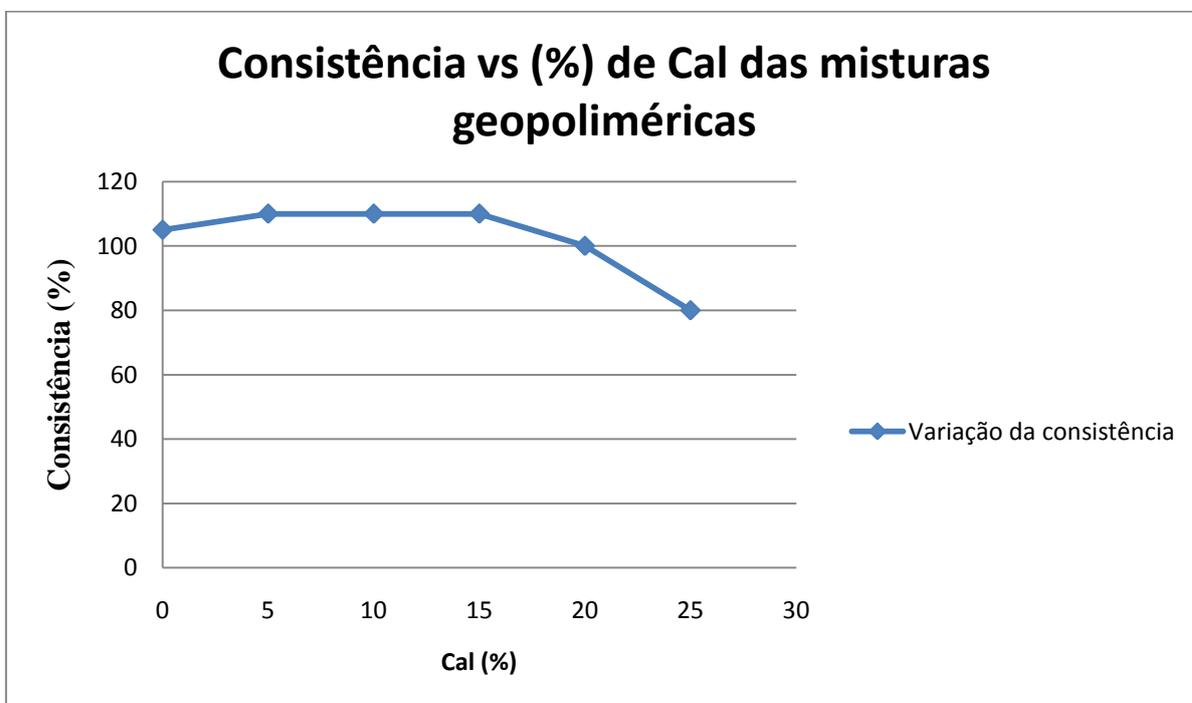


Figura 5.1 – Consistência vs percentagem de cal das misturas geopoliméricas.

Com os resultados obtidos na figura 5.1 verifica-se que a consistência nos ligantes geopoliméricos tende a diminuir com o aumento da percentagem de cal.

Observa-se também que a consistência máxima para este tipo de ligantes é de 110% para as percentagens de cal de 5, 10 e 15%. Com o aumento da percentagem de cal para 20 e 25% a curva sofre uma ligeira inclinação, diminuindo a consistência de 100% para 80%.

Com isto, é de salientar o papel da cal neste tipo de ligantes geopoliméricos, sendo esta uma das principais causas da variação da consistência. Esta diminuição da consistência é, também, devido ao facto de as cinzas volantes apresentarem uma forma mais arredondada nas suas partículas quando comparadas com a cal.

Moura (2010) mostra que, com a utilização de metacaulino e utilizando o mesmo valor de hidróxido de sódio (12M) e percentagem de cal hidratada, obtêm-se valores de consistência bastante inferiores, em comparação com a consistência utilizando cinzas volantes. De salientar que a consistência também aumenta ligeiramente entre os 0% e 10% de cal como acontece no caso da utilização de cinzas volantes (figura 5.1). Assim, conclui-se que os materiais utilizados como ligantes de uma mistura geopolimérica têm um papel fundamental na variação dos resultados em termos de consistência.

## **5.2) Análise da resistência à flexão das misturas geopoliméricas vs cimento Portland para altas temperaturas**

Os gráficos das figuras 5.2 e 5.3 apresentam os valores da resistência à flexão das várias misturas geopoliméricas e do cimento Portland apenas à temperatura ambiente, aos 7 e aos 14 dias, enquanto os gráficos das figuras 5.4 e 5.5 apresentam valores da resistência à flexão das várias misturas geopoliméricas e do cimento Portland quando submetidas a temperaturas desde a temperatura ambiente até aos 800°C, aos 7 dias.

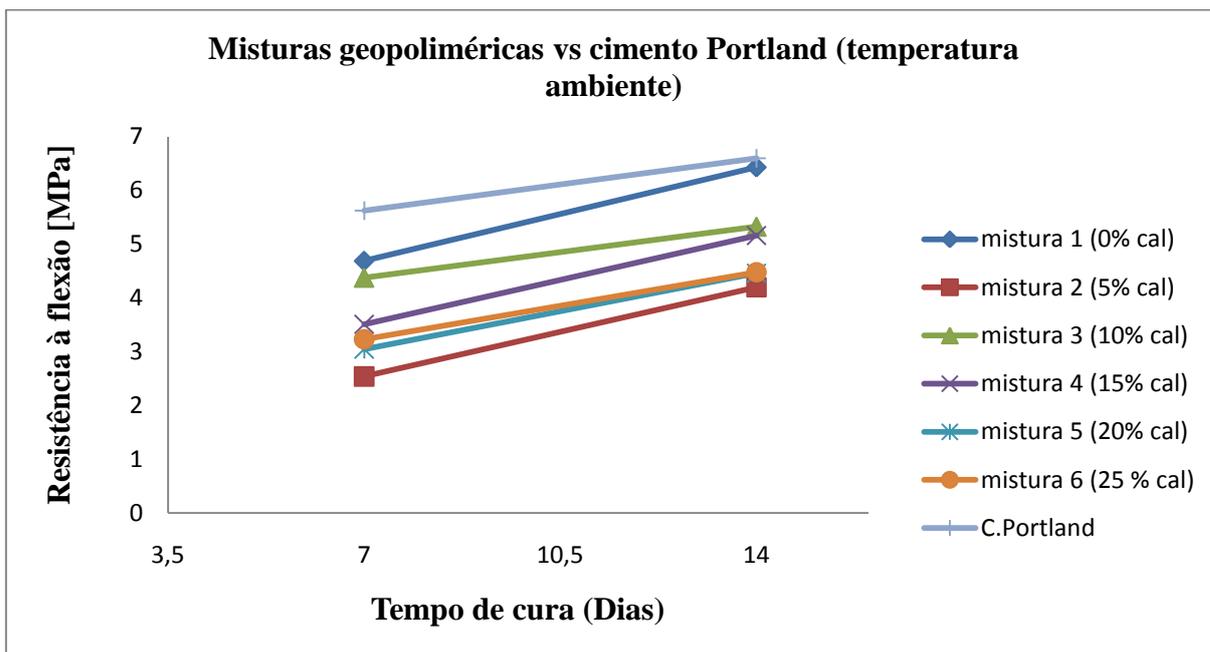


Figura 5.2 – Resistência à flexão das misturas geopoliméricas vs cimento Portland à temperatura ambiente, aos 7 e 14 dias.

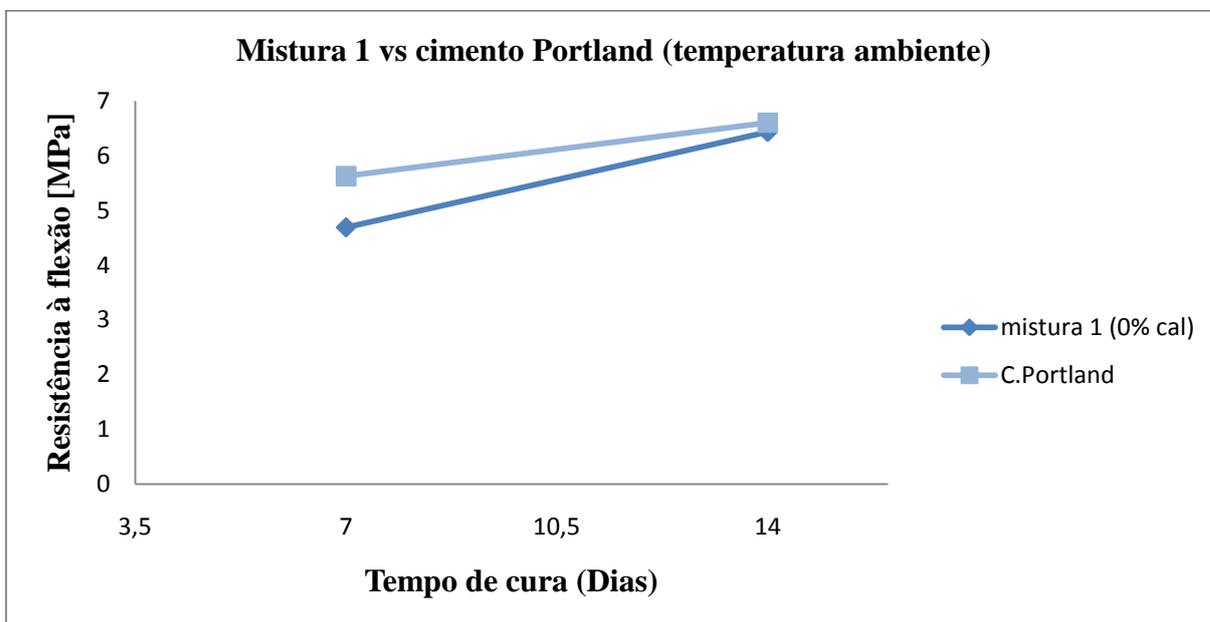


Figura 5.3 – Resistência à flexão da mistura 1 vs cimento Portland à temperatura ambiente, aos 7 e 14 dias.

Fazendo uma análise geral ao gráfico da figura 5.2 verifica-se que a resistência à flexão das misturas geopoliméricas e do cimento Portland à temperatura ambiente aumenta de modo contínuo, à medida que aumenta o tempo de cura. Verifica-se também que o valor máximo de resistência à flexão aos 7 e aos 14 dias pertence à composição com cimento Portland, sendo aproximadamente 6 MPa e 7 MPa respectivamente. No entanto, observa-se que, mesmo sendo o cimento Portland com os valores mais elevados de resistência, a mistura 1 (0% de cal) apresenta valores muito idênticos (figura 5.3), o que leva a concluir que, quanto maior for a percentagem de cal menor será a resistência à flexão neste tipo de ligante geopolimérico.

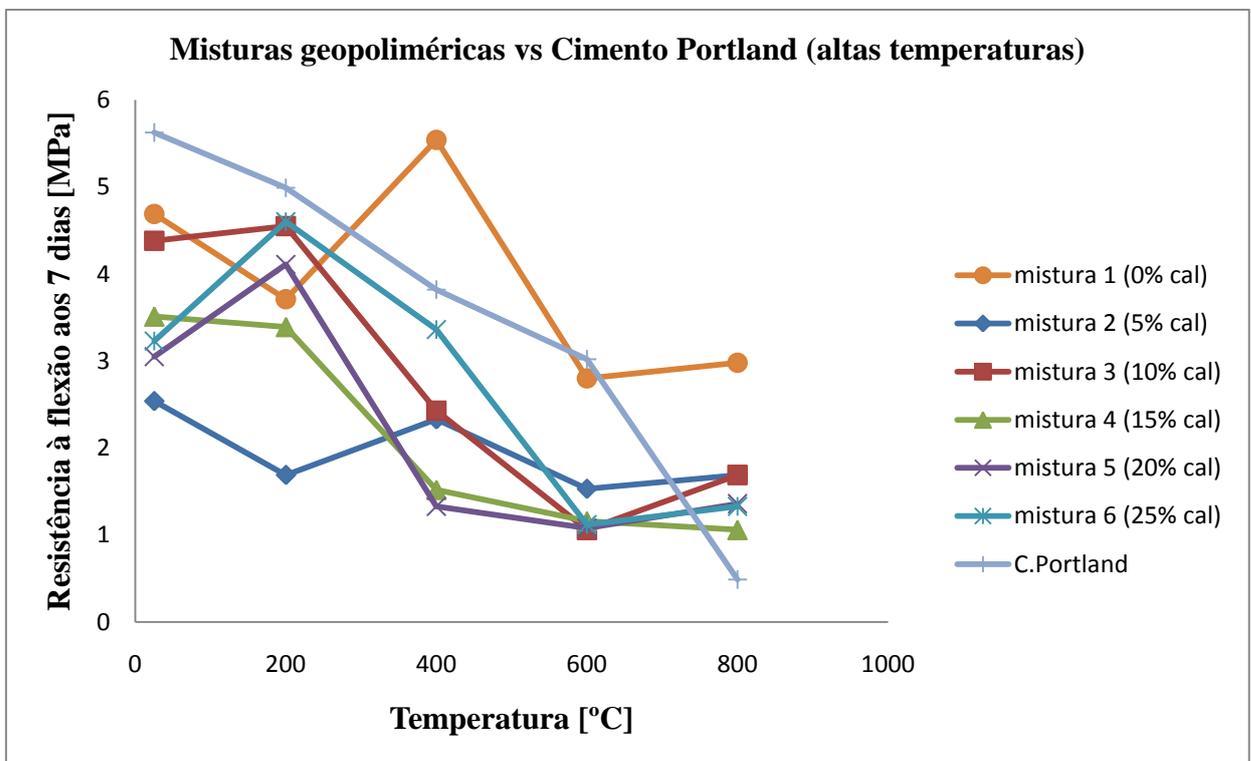


Figura 5.4 – Resistência à flexão vs temperaturas elevadas das misturas geopoliméricas vs cimento Portland, aos 7 dias.

De um modo geral e olhando para o gráfico da figura 5.4 verifica-se que o valor da resistência à flexão de uma determinada mistura diminui com o aumento da temperatura.

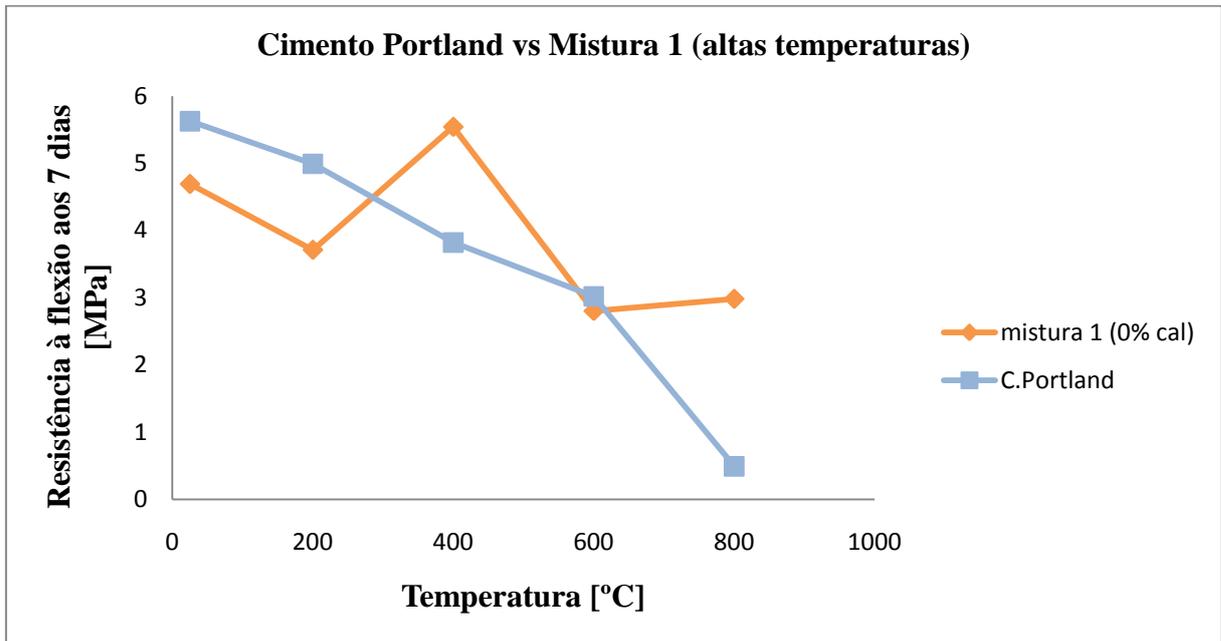


Figura 5.5 – Resistência à flexão vs temperaturas elevadas da mistura 1 vs cimento Portland, aos 7 dias.

Com as misturas a serem submetidas a temperaturas elevadas, a resistência à flexão diminui não de forma constante mas de forma variada à medida que a temperatura aumenta.

Observa-se, também, que o valor máximo obtido da resistência à flexão das misturas geopoliméricas quando submetidas a altas temperaturas é inferior a 6 MPa e o mínimo inferior a 1 MPa.

Em relação à comparação das misturas geopoliméricas com o cimento Portland é de notar que apenas a mistura 1 (0% cal) (figura 5.5) consegue obter valores de resistência à flexão superiores ao cimento Portland até aproximadamente aos 700°C. Com isto, pode-se concluir que, também para elevadas temperaturas, quanto menor a percentagem de cal neste tipo de ligante geopolimérico maior será a resistência à flexão.

### 5.3) Análise da resistência à compressão das misturas geopoliméricas vs cimento Portland para altas temperaturas

Os gráficos das figuras 5.6 e 5.7 apresentam os valores da resistência à compressão das várias misturas geopoliméricas e do cimento Portland apenas à temperatura ambiente, aos 7 e aos 14

dias, enquanto os gráficos das figuras 5.8 e 5.9 apresentam valores da resistência à compressão das várias misturas geopoliméricas e do cimento Portland quando submetidas a temperaturas desde a temperatura ambiente até aos 800°C, aos 7 dias.

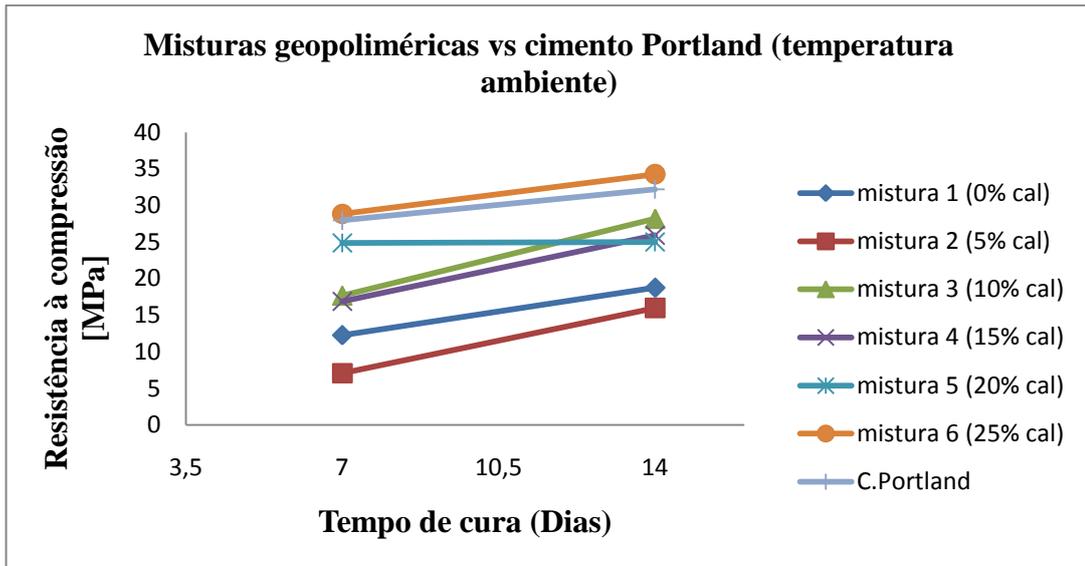


Figura 5.6 – Resistência à compressão das misturas geopoliméricas vs cimento Portland à temperatura ambiente, aos 7 e 14 dias.

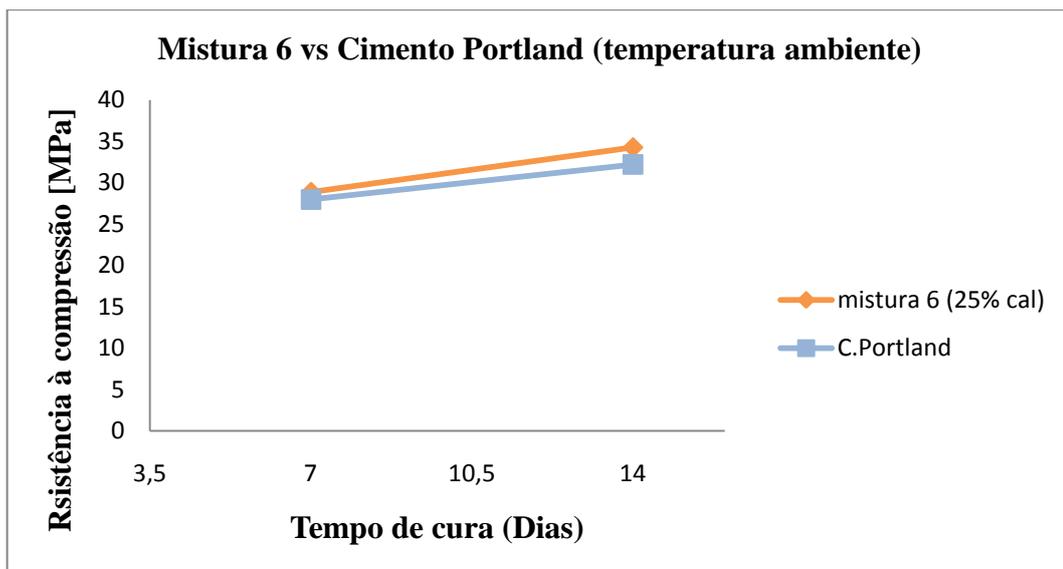


Figura 5.7 – Resistência à compressão da mistura 1 vs cimento Portland à temperatura ambiente, aos 7 e 14 dias.

Em relação ao gráfico da figura 5.6 e de um modo geral, verifica-se que a resistência à compressão das misturas geopoliméricas e do cimento Portland à temperatura normal aumenta de modo contínuo à medida que aumenta o tempo de cura. Observa-se, também, no mesmo gráfico, que o valor máximo da resistência à compressão aos 7 e 14 dias é de 30 MPa e 35 MPa respectivamente, pertencendo ambos à mistura 6 (25% de cal). Assim, conclui-se que a mistura 6, com 25% de cal apresenta valores de resistência à compressão mais elevados que o cimento Portland (figura 5.7). Ou seja, para este tipo de ligante geopolimérico quanto maior for a percentagem de cal maior será a resistência à compressão.

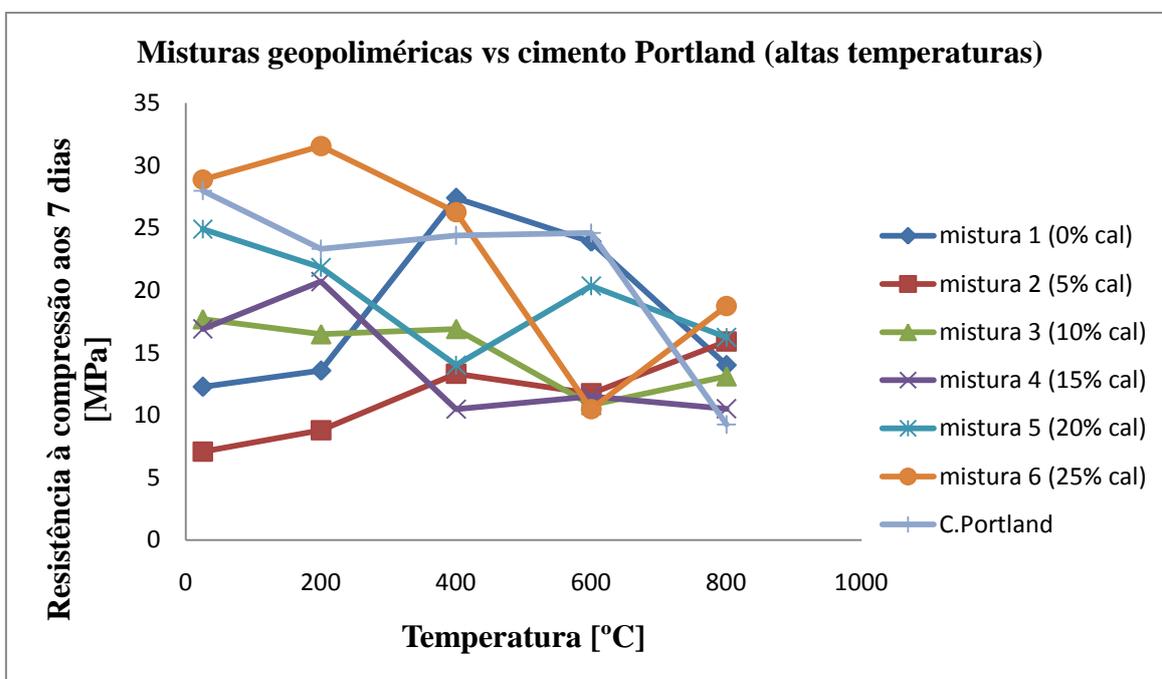


Figura 5.8 – Resistência à compressão vs temperaturas elevadas das misturas geopoliméricas vs cimento Portland, aos 7 dias.

Observando o gráfico da figura 5.8 verifica-se de um modo geral, que o valor da resistência à compressão de uma determinada mistura diminui com o aumento da temperatura. Tal como no gráfico 5.4 referente à resistência à flexão das misturas submetidas a elevadas temperaturas, a resistência à compressão também diminui de forma inconstante à medida que a temperatura aumenta.

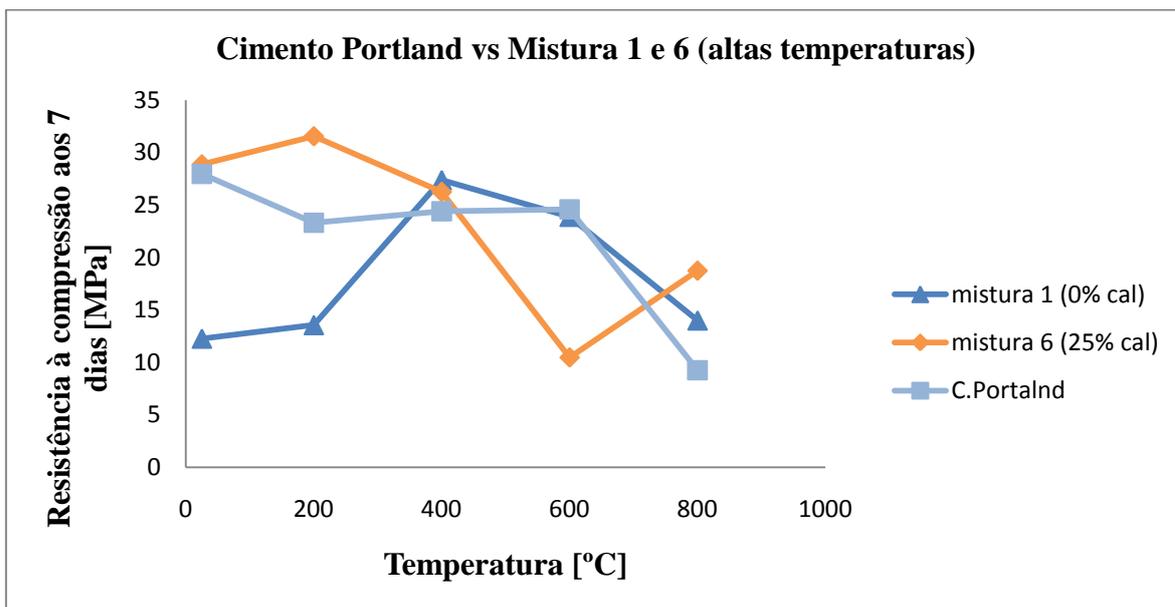


Figura 5.9 – Resistência à compressão vs temperaturas elevadas da mistura 1 e 6 vs cimento Portland, aos 7 dias.

Observa-se, também, no gráfico que o valor máximo obtido da resistência à compressão das misturas geopoliméricas quando submetidas a altas temperaturas é de aproximadamente 32 MPa.

Em relação às misturas geopoliméricas referentes no gráfico 5.8, quando comparadas com o cimento Portland, nota-se que apenas a mistura 6 (25% de cal) (figura 5.9) apresenta valores de resistência à compressão superiores ao cimento Portland ao longo de todo o aquecimento desde a temperatura ambiente até chegar aos 800°C, à excepção da temperatura de 600°C. Contudo, a mistura 1 (0% de cal) também apresenta valores de resistência superiores ao cimento Portland para as temperaturas de 400°C e 800°C e ligeiramente inferior aos 600°C.

Com isto, pode-se concluir que para elevadas temperaturas, a percentagem de cal neste tipo de ligante geopolimérico não é muito relevante no que diz respeito à resistência de compressão, uma vez que, como mostra a figura 5.9, obteve-se valores muito idênticos para percentagens variadas de cal hidratada.

## Capítulo 6 – CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

### 6.1) Conclusões Finais

Esta dissertação teve como objectivo principal produzir um geopolímero alternativo ao cimento Portland que, para além de ser durável e resistir à flexão e compressão, também resistisse a temperaturas elevadas.

De modo a cumprir os objectivos estabelecidos, os ensaios foram realizados segundo normas nacionais e europeias, permitindo retirar as conclusões que se apresentam a seguir:

A consistência neste tipo de ligantes geopoliméricos tende a diminuir com o aumento da percentagem de cal para valores superiores a 15% de cal hidratada.

Misturas geopoliméricas com a utilização de metacaulino apresenta valores de consistência inferiores em relação à utilização de cinzas volantes, o que mostra a importância da escolha do tipo de ligante a utilizar em termos de consistência de misturas geopoliméricas.

Em termos de resistência à flexão à temperatura ambiente conclui-se que quanto maior a percentagem de cal utilizada menor será a resistência à flexão. O mesmo acontece quando a mistura geopolimérica é submetida a elevadas temperaturas. De referir também que a resistência à flexão diminui com o aumento da temperatura.

Relativamente à resistência à compressão quando a mistura geopolimérica é submetida a elevadas temperaturas importa dizer que a presença da cal não é tão relevante como acontece no caso da resistência à flexão, uma vez que obtemos valores muito idênticos de resistência para percentagens diferentes de cal hidratada. De salientar que a resistência à compressão também diminui à medida que a temperatura aumenta.

## **6.2) Trabalhos Futuros**

Seria importante, em trabalhos futuros, investigar como se comportaria uma mistura geopolimérica, utilizando cinzas volantes como ligante, quando exposta à acção do fogo. Para tal seriam necessárias condições e meios disponíveis para efectuar essa investigação, uma vez que se trata de um trabalho bastante mais complexo.

## Capítulo 7 – **BIBLIOGRAFIA**

Coutinho, A Sousa. (1988). Fabrico e propriedades do betão. 2ª Edição. Vol. 1. LNEC, Lisboa.

Davidovits, J. (1988). Geopolymeric Reactions in Archaeological Cements and in Modern Blended Cements. Geopolymer International Conference: GÉOPOLYMÈRE '88, Compiègne, France.

Davidovits, J. (1999). Chemistry of Geopolymeric Systems, Terminology. Proceedings of the Second International Conference Geopolymère '99, pp. 9-40.

Davidovits, J.(2002). Environmentally Driven Geopolymer Cement Applications. Conferência Internacional Geopolímeros. Melbourne, Australia.

European Committee for Standardization. (1999). EN 1015-11 Methods of test for mortar masonry- Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar. Brussels.

EN 1015-3. (2004). Methods of test for mortar for masonry - Part 3: Determination of consistence of fresh mortar (by flow table). Brussels : CEN. European Standard.

EN ISO 7500-1. (2004). CEN EN ISO 75500-1 Metallic materials. Verification of static uniaxial testing machines. Part1: tension/compression testing machines. Verification and calibration of the force-measuring system. European Committee for Standardization.

ENV. (1995). Eurocode 2: Design of Concrete Structures – Part 1-2: General Rules – Structural Fire Design. Comité Européen de Normalisation, Brussels.

Flaga, K. (2000). Advances in materials applied in civil engineering. Journal of Materials Processing Technology Vol.106, pp.173-183.

Ferreira, R. M. (2009). Service-life Design of Concrete Structures in Marine Environments: A probabilistic based approach. ISBN-13: 978-3639167108, VDM Verlag Dr. Muller Aktiengesellschaft & Co. KG.

Ferreira, R. M. (2000). Avaliação de Ensaio de Durabilidade do Betão. Universidade do Minho. Guimarães.

Gjorv, O.E. (1994). Steel corrosion in concrete structures exposed to Norwegian marine environment. ACI Concrete International Vol.16, pp.35-39.

ISO 3310-2. Test sieves - Technical requirements and testing. Part 1: Test sieves of perforate metal plate. s.l. : International Organization for Standardization, 1990.

Krivenko, P., Guziy, S. (2007). Fire resistant alkaline portland cements. Alkali Activated Materials. Research, Production and Utilization 3rd Conference, pp.333-347. Praga, República Checa.

Laboratório Nacional de Engenharia Civil (1990). Verificação da Segurança de Estruturas de Betão Armado e Pré-Esforçado em Relação à Acção do Fogo. Recomendações LNEC, Lisboa.

Li, C., Sun, H., Li, L. (2010). A review: The comparison between alkali-activated slag (Si+Ca) and metakaolin (Si+Al) cements. Cement and Concrete Research. Vol.40, pp.1341-1349.

Mailvaganam, N. (1991.) Repair and protection of concrete structures. CRC Press. Ottawa.

Mehta, P.K. (1991). Concrete in marine environment. Elsevier Science Publishers, New York USA.

Moura, D. (2010). Influência da composição de argamassas obtidas por activação alcalina do metacaulino na sua trabalhabilidade e resistência mecânica. Dissertação de Mestrado. Universidade Do Minho. Guimarães, Portugal.

National Fire Protection Association. (1986). Fire Protection Handbook, Fire Safety in Building Design and Construction. 16th Edition, Coté, A E. and J.L. Linville (eds.).

Neville, Adam M. (1995). Properties of Concrete. 4ª Edição, Pearson, Inglaterra.

Neville, A. M. (2008). Properties of Concrete. Prentice Hall. Essex, Inglaterra.

NP EN 196-1. (2006). Métodos de ensaios de cimentos - parte 1: Determinação das resistências mecânicas. IPQ. Lisboa.

NP EN 933-1. Ensaio das propriedades geométricas dos agregados - Parte 1: Análise granulométrica. Método de peneiração. Lisboa : Instituto Português da Qualidade, Novembro de 2000.

NP EN 933-2. (1999). Ensaio para determinação das características geométricas dos agregados. Parte 2: Determinação da distribuição granulométrica. Peneiros de ensaio, dimensão nominal das aberturas. Lisboa : Instituto Português da Qualidade.

NP EN 933-5. (2004). Ensaio das propriedades gerais dos agregados. Parte 5: Equipamento comum e calibração. IPQ. Lisboa.

Osório, P. (2006). Concepção de um Saferoom Anti-Tornado em Betão Geopolimérico. Dissertação de Mestrado. Universidade Do Minho. Guimarães, Portugal.

Pacheco-Torgal, F., Castro-Gomes, J.P., Jalali, S. (2005). Ligantes Geopoliméricos: Uma Alternativa ambiental ao Cimento Portland No Contexto da Economia do Carbono. Revista da APEB, nº 14.

Pacheco-Torgal, F., Castro Gomes, J. P., Jalali, S. (2005). Tendências no Desenvolvimento Sustentável: Investigação sobre o desenvolvimento de ligantes de baixas emissões a partir de resíduos de minas. Engenharia. pp. 281-285. Universidade da Beira Interior. Covilhã, Portugal.

Pacheco-Torgal, F., Jalali, S. (2009). Ligantes geopoliméricos: uma alternativa ambiental ao cimento Portland. INGENIUM: revista da ordem dos engenheiros. ISSN 0870-5968. 116. pp. 66-68.

Pacheco-Torgal, F., Jalali, S. (2010). Cimento Portland versus ligantes geopoliméricos: Durabilidade e desempenho ambiental. Revista Teoria e Prática da Engenharia Civil, Editora Dunas, Brasil, Vol.10, nº 15, pp.1-9.

Pacheco-Torgal, F., Jalali, S. (2011). A sustentabilidade dos materiais de construção. Edição TecMinho, 460 pág., Guimarães, Portugal.

Pacheco-Torgal, F., Abdollahnejad, Z., Camões, A.F., Jamshidi, M., Ding, Y. (2012). Durability of alkali-activated binders. A clear advantage over Portland cement or an unproven issue. Construction and Building Materials. Vol.30, 400-405.

Palomo, A., Alonso, A. (2001). Calorimetric Study of Alkaline Activation of Calcium Hydroxide – Metakaolin Solid Mixtures. Cement and Concrete Research.

Pinto, A. T. (2004). Sistemas ligantes obtidos por activação alcalina do metacaulino. Universidade do Minho. Guimarães.

Purdon, A. O. (1940). The action of alkalis on blast furnace slag. Journal of the Society of Chemical Industry Vol.59, pp.191-202.

Silva, C. (2010). Avaliação da Resistência ao Fogo de Produtos de Construção. Dissertação de Mestrado. Universidade de Aveiro, Portugal.

Taylor, M., Gielen, D. (2006). Energy efficiency and CO2 emissions from the global cement industry. International Energy Agency.

UNFCCC - Kyoto Protocol to the United Nations Framework convention on climate change. United Nations convention on climate change. FCC/CP/L.7/Add1. Kyoto.

Vasconcelos, E. (2010). Reabilitação de estruturas de betão com recurso a geopolímeros e fibras de carbono. Dissertação de Mestrado. Universidade Do Minho. Guimarães, Portugal.



## ANEXOS

## Anexo A



**CENTRO DE PRODUÇÃO SINES**  
**SISTEMA DE CONTROLO DA PRODUÇÃO DE CINZAS VOLANTES**  
**ESPECIFICAÇÃO TÉCNICA DE CINZAS VOLANTES**

Pág. 1/3

**1. Objectivo**

O objectivo desta especificação é enunciar os valores característicos de cinza e os valores alvo ou de alerta para os ensaios de controlo interno e de auto-controlo.

**2. Valores Característicos e Critérios Aplicáveis**

Características	Valor Característico	Limites para Valores Individuais	Valor Declarado	Critérios de Conformidade Aplicáveis	Obs.
<b>Perda ao Fogo</b>	2% - 7%	< 9%	-	<b>1)</b>	<b>Nota 1,2</b>
<b>Finura</b>	≤ 40% e VD ± 10%	< 45% e VD ± 15%	N, 20%	<b>2)</b>	
<b>Óxido Cálcio Livre</b>	≤ 2,5%	< 2,6%	-	<b>3)</b>	<b>Nota 1</b>
<b>Óxido Cálcio Total</b>	< 10%	-	-	<b>4)</b>	<b>Nota 1,2</b>
<b>Cloretos</b>	≤ 0,10%	< 0,10%	-	<b>3)</b>	<b>Nota 1</b>
<b>Sulfatos</b>	≤ 3%	< 3,5%	-	<b>3)</b>	<b>Nota 1</b>
<b>Massa Volúmica</b>	± 200Kg/m <sup>3</sup> do VD	± 225Kg/m <sup>3</sup> do VD	2300Kg/m <sup>3</sup>	<b>4)</b>	<b>Nota 2</b>
<b>Índice de Actividade:</b>					
<b>28 dias</b>	> 75%	< 70%	-	<b>5)</b>	
<b>90 dias</b>	> 85%	< 80%	-		
<b>Expansibilidade</b> (se CaO livre > 1,0%)	< 10 mm	< 10 mm	-	<b>3)</b>	

Nota 1: A composição química em proporção da massa de cinza seca.

Nota 2: Os métodos de ensaio são os referidos no plano de auto-controlo – cinzas volantes.

**Critérios de Conformidade Aplicáveis**

- 1) O valor característico é obtido por aplicação do critério estatístico de inspecção por variáveis, durante o período de referência. Por aplicação  $X - K\alpha s \geq L$  e  $X + K\alpha s \leq U$ ,  $U = 7\%$  e  $L = 2\%$  (ponto 8.2.2 da EN 450-1).
- 2) O valor característico é obtido por aplicação do critério estatístico de inspecção por variáveis, durante o período de referência. Por aplicação  $X - K\alpha s \leq U$  ( $U = 40\%$  e  $\pm 10\%$  VD).
- 3) O valor característico é obtido por aplicação do critério estatístico de inspecção por atributos, durante o período de referência. Por aplicação  $CD \leq CA$ :  $CD = N.$  de resultados de ensaio com valores superiores ao característico;  $CA = N.$  aceitável de resultados acima do valor característico num determinado período de referência para um determinado número de resultados (ponto 8.2.3 da EN 450-1).
- 4) O valor característico é obtido por aplicação do critério estatístico de inspecção por atributos, durante o período de referência. Por aplicação  $CD \leq CA$  ( $CD = N.$  de resultados de ensaio com valores superiores ou inferiores a  $\pm 200 \text{ Kg/m}^3$  do valor declarado;  $CA = N.$  aceitável de resultados abaixo do limite inferior ou acima o limite superior num determinado período de referência para um determinado número de resultados (ponto 8.2.3 da EN 450-1).
- 5) O valor característico é obtido por aplicação do critério estatístico de inspecção por atributos, durante o período de referência. Por aplicação  $CD \leq CA$ :  $CD = N.$  de resultados de ensaio com valores superiores ao característico (28 dias e 90 dias);  $CA = N.$  aceitável de resultados com valor superior ao característico num determinado período de referência para um determinado número de resultados).

	Revisão	Data	Elaborado	Aprovado
Esp_Cinza.doc	A	2006-07-27	Maria José Vales	Jorge do Carmo (em documento SGD)



**CENTRO DE PRODUÇÃO SINES**  
**SISTEMA DE CONTROLO DA PRODUÇÃO DE CINZAS VOLANTES**  
**ESPECIFICAÇÃO TÉCNICA DE CINZAS VOLANTES**

Pág. 2/3

**3. Valores Alvo e Acções a Desenvolver**

Características	Valores Alvo Individuais (auto-controlo)	Acção	Valores Alvo Individuais (controlo interno)	Acção
<b>Perda ao Fogo</b>	0 % - 2 %	2)	Linha ou média das linhas < 6,5% Linha ou média das linhas > 6,5%	1) 4)
	2,5% - 6,5%	1)		
	6,5% - 8,5%	2)		
	> 9% *	3)		
<b>Finura</b>	10% - 40%	1)		
	35% - 40%	2)		
	> 45 % e VD ± 15% *	3)		
<b>Óxido Cálcio Livre</b>	< 2 %	1)		
	2 % - 2,5%	2)		
	> 2,6% *	3)		
<b>Óxido Cálcio Total</b>	< 9,5 %	1)		
	9,5% - 10%	2)		
	> 10%	3)		
<b>Cloretos</b>	< 0,9 %	1)		
	0,9% - 0,10%	2)		
	> 0,10% *	3)		
<b>Sulfatos</b>	< 2,5 %	1)		
	2,5% - 3%	2)		
	> 3,5% *	3)		
<b>Massa Volúmica</b>	2100 - 2525 Kg/m <sup>3</sup>	1)		
	2450 - 2500 Kg/m <sup>3</sup>	2)		
	VD ± 225 Kg/m <sup>3</sup> *	3)		
<b>Índice de Actividade:</b>	<b>28 dias</b>	> 75%	1)	
		70% - 75%	2)	
		< 70% *	3)	
	<b>90 dias</b>	> 85%	1)	
		80% - 85%	2)	
		< 80% *	3)	
<b>Expansibilidade</b> (se CaO livre > 1,0%)	< 9,5 mm	1)		
	9,5 - mm	2)		
	> 10 mm *	3)		

\* - limite imposto pela EN 450-1

Revisão

Data

A

2006-07-27

Esp\_Cinza.doc

## Anexo B



### FICHA DE DADOS DE SEGURANÇA da CAL HIDRATADA [Hidróxido de Cálcio - Ca(OH)<sub>2</sub>]

De acordo com o Anexo II do Regulamento REACH CE 1907/2006,  
Regulamento (CE) 1272/2008 e Regulamento (CE) 453/2010

Versão: 1.0

Data Revisão: 11/2010

Data Impressão: 01/02/2011

## 1 IDENTIFICAÇÃO DA SUBSTÂNCIA E DA EMPRESA

### 1.1 Identificação do Produto

Nome da substância:	Cal hidratada, hidróxido de cálcio, dihidróxido de cálcio
Sinónimos:	Cal morta, cal apagada, cal extinta, cal para construção, hidróxido de cálcio, dihidróxido de cálcio
Nome químico e fórmula:	Hidróxido de Cálcio – Ca(OH) <sub>2</sub>
Designação comercial:	<b>Cal Hidratada</b>
CAS:	1305-62-0
EINECS:	215-137-3
Peso molecular:	74.09 g/mol
Número de registo REACH:	01-2119475151-45-0115

## 9 PROPRIEDADES FÍSICAS E QUÍMICAS

### 9.1 Informação geral

Aspecto:	Pó fino de cor branca a bege
Odor:	Inodoro
Limiar olfactivo:	Não aplicável
pH:	12.4 (solução saturada a 20 °C)
Ponto de fusão:	> 450 °C (resultado de estudo, método EU A.1)
Ponto de ebulição:	Não aplicável (sólido com ponto de fusão > 450 °C)
Ponto de inflamação:	Não aplicável (sólido com ponto de fusão > 450 °C)
Taxa de evaporação:	Não aplicável (sólido com ponto de fusão > 450 °C)
Inflamabilidade:	Não inflamável (resultado de estudo, método EU A.10)
Propriedades explosivas:	Não explosivo (livre de estruturas químicas normalmente associadas a propriedades explosivas)
Pressão de vapor:	Não aplicável (sólido com ponto de fusão > 450 °C)
Densidade de vapor:	Não aplicável
Densidade relativa:	2.24 (resultado de estudo, método EU A.3)
Solubilidade em água:	1844.9 mg/l (resultado de estudo, método EU A.6)
Coeficiente de partição:	<u>Não aplicável (substância inorgânica)</u>