



**FCTUC DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**  
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

# **Geopolímeros - Influência da adição de plastificante e da temperatura de cura nas propriedades resistentes**

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil na Especialidade de Estruturas

Autor

**João Manuel Rodrigues Fernandes**

Orientador

**Prof. Adelino Vasconcelos Lopes**

**Prof. Sérgio Manuel Rodrigues Lopes**

Esta dissertação é da exclusiva responsabilidade do seu autor, não tendo sofrido correcções após a defesa em provas públicas. O Departamento de Engenharia Civil da FCTUC declina qualquer responsabilidade pelo uso da informação apresentada

**Coimbra, Julho, 2015**

## AGRADECIMENTOS

Com o finalizar da presente dissertação muitas foram as pessoas que me apoiaram e incentivaram no meu percurso académico, às quais não poderia deixar de agradecer e estas palavras são para elas.

O maior agradecimento vai para os meus pais, Manuel Fernandes e Lurdes Oliveira, pela amizade, apoio emocional e monetário, paciência e conselhos nos momentos mais difíceis vividos nesta etapa importante na minha vida. Não posso deixar de referir o meu irmão, mesmo já não estando entre nós, uma vez que acredito que estará bastante orgulhoso pela importante etapa concluída.

Um reconhecimento especial aos meus orientadores, Professor Doutor Sérgio Lopes e Professor Doutor Adelino Lopes, por todo o apoio, disponibilidade e ensinamentos prestados, uma vez que sem eles não seria possível apresentar o trabalho hoje finalizado.

À minha namorada, Maria João Ferreira, pela amizade, incentivo, apoio e compreensão em todos os momentos vividos ao longo desta caminhada.

A todos as pessoas que me ajudaram no processo laboratorial, Eng. Edmundo, Eng. Ilídio, Eng. Carlos Martins, Eng. André Marques, Eng. José António, e ao Senhor Luís Gaspar, o meu muito obrigado por todo o auxílio e conselhos prestados durante toda a atividade experimental.

Uma última palavra, mas não menos importante, de apreço e amizade aos meus amigos Anthony Mendes, Eduardo Vieira, Fábio Pereira, Gonçalo Pereira, João Gonçalves, Jorge Silva, Luís Pereira, Renato Meio Tostão e Ruben Salgueiro, por toda a vivência e amizade conquistada ao longo de todos estes anos. Espero conviver com vocês por muitos e longos anos e com certeza que recordaremos todas as peripécias por nós vividas.

Despeço-me agora de Coimbra, com um sentimento de saudade e de recordação dos momentos mais belos da minha vida.

## RESUMO

A exagerada energia consumida atualmente na construção civil constitui um entrave à concretização dos objetivos inerentes aos pressupostos do desenvolvimento e da construção sustentável. Interessa portanto estudar alternativas aos materiais tradicionalmente utilizados, nomeadamente o betão. Neste sentido, é importante analisar as propriedades mecânicas de misturas em que o ligante usado tenha a função de substituir o cimento Portland Normal e que apresente resultados satisfatórios e um processo de obtenção mais eficiente, menos poluente e mais económico.

Na presente dissertação, de cariz experimental, pretende-se continuar a estudar a viabilidade da utilização de um geopolímero, nomeadamente ao nível da sua capacidade resistente, se este incluir plastificantes na sua massa, ou se variar a temperatura de cura.

O principal objetivo da dissertação consiste em produzir diversos provetes geopoliméricos, cujas massas conterão percentagens pré-estabelecidas de plastificante, e em ensaiá-los de modo a avaliar as suas capacidades resistentes. Também, o controlo de diversas temperaturas de cura a que foram submetidos os provetes constitui um parâmetro a considerar nos resultados.

Os resultados obtidos, neste trabalho experimental, permitem concluir que existe a possibilidade da substituição do cimento Portland Normal por materiais ativados alcalinamente. Ainda assim, de modo a não prejudicar as capacidades resistentes dos geopolímeros, recomenda-se que se limite a presença de plastificante na sua massa a valores máximos de 0,3% da massa do ligante, e que as temperaturas de cura sejam limitadas aos 30°C.

## ABSTRACT

Excessive energy currently consumed in construction is an obstacle to achieving the goals assumptions inherent to the development and sustainable construction. It is of interest, therefore, to study alternatives to materials traditionally used, and in particular concrete. Therefore, it is important to analyze the mechanical properties of the mixtures, the binder used has the function to replace the Normal Portland cement and to present satisfactory results and an obtaining process more efficient, less polluting and more economical.

In this dissertation, experimental in nature, it is intended to continue to study the feasibility of using a geopolymer, especially in terms of its bearing capacity, if it includes plasticizers in its mass, or vary the cure temperature.

The main purpose of this work is to produce various geopolymeric samples whose masses contain pre-established percentages of plasticizer, and in test them in order to evaluate their strength capabilities. Also, the control of various curing temperatures to which the specimens underwent is a parameter considering the results.

The results obtained in this experimental work, allow concluding that there is a possibility of replacement of Standard Portland cement by alkali-activated materials. Still, in order not to affect the resistant capabilities of geopolymers, it is recommended to limit the presence of plasticizer to a maximum of 0.3% by weight of binder, and with curing temperatures to be limited to 30 ° C .

---

## ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO .....	1
1.1	Enquadramento geral .....	1
1.2	Objetivos .....	2
1.3	Organização do documento .....	2
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1	Evolução Histórica.....	4
2.2	Impacte Ambiental.....	7
2.3	Ligantes ativados alcalinamente .....	10
2.4	Influência da adição de plastificante.....	12
2.5	Efeito da temperatura de cura .....	14
3	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	20
3.1	Caracterização dos materiais .....	20
3.1.1	Metacaulino .....	20
3.1.2	Areia .....	21
3.1.3	Ativador.....	22
3.1.5	Plastificante .....	23
3.2	Composições das misturas .....	23
3.3	Procedimento de ensaio .....	28
3.3.1	Ensaio de rotura à tração por flexão.....	29
3.3.2	Ensaio de rotura à compressão .....	31

---

4	RESULTADOS .....	33
4.1	Adição de plastificante.....	33
4.1.1	Ensaio de rotura à tração por flexão.....	33
4.1.2	Ensaio de rotura à compressão .....	39
4.2	Temperatura de cura .....	44
4.2.1	Ensaio de rotura à tração por flexão.....	45
4.2.2	Ensaio de rotura à compressão .....	54
4.3	Confrontação dos resultados obtidos com estudos já realizados .....	59
5	CONCLUSÕES.....	61
5.1	Trabalhos Futuros .....	62
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	64

---

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2. 1 – Coliseu de Roma. ....	4
Figura 2. 2 – Evolução da temperatura com o nível de concentração de CO <sub>2</sub> . (Torgal et al, 2005). ....	8
Figura 2. 3 – Evolução da resistência à compressão com o aumento da temperatura de exposição (Torgal et al, 2005). ....	9
Figura 2. 4 – Perda de peso após ataque químicos em geopolímeros e betões à base de CPN (Torgal et al, 2005). ....	9
Figura 2. 5 – Medição da expansão em geopolímeros e betões à base de CPN em resultado de reações alcali-silica (Torgal et al, 2005). ....	10
Figura 2. 6 – Tempo de cura em função da temperatura de cura. (Bing-hui et al, 2014). ....	15
Figura 2. 7 – Resistência à compressão em função da temperatura e duração de cura. (Bing-hui et al, 2014). ....	16
Figura 2. 8 – Resistência à compressão de provetes realizados às temperaturas de cura de 20, 40, 60, 80 e 100°C durante 1, 2 e 3 dias nessas condições. Heah et al (2011). ....	17
Figura 2. 9 – Micrografias do geopolímero curado durante 3 dias a 60°C e analisado no 1º dia (a), 7º dia (b) e 28º dia (c). Micrografias do geopolímero curado durante 1 dia a 80°C e analisado no 1º dia (d), 7º dia (e) e 28º dia (f). Micrografias do geopolímero curado durante 2 dias a 100°C e analisado no 7º dia (g) e 28º dia (h). Heah et al (2011). ....	18
Figura 2. 10 – Nível de porosidade registada das amostras curadas às temperaturas de 22°C, 40°C e 60 °C. (Perera et al 2007). ....	19
Figura 3. 1 - Metacaulinos usados para a obtenção das misturas. ....	20
Figura 3. 2 - Curva granulométrica da areia (Pereira, 2013). ....	22
Figura 3. 3 - Plastificante usado para as misturas. ....	24

---

Figura 3. 4 - Elaboração da mistura.....	25
Figura 3. 5 - Preparação dos moldes dos provetes. ....	25
Figura 3. 6 - Colocação da mistura nos moldes.....	26
Figura 3. 7 - Vibração das misturas nos moldes.....	27
Figura 3. 8 - Data logger usado para o registo da temperatura.....	28
Figura 3. 9 - Modelo de carga segundo a norma NP EN 12390-5. ....	29
Figura 3. 10 - Provede submetido a um ensaio de rotura à tração por flexão. ....	30
Figura 3. 11 - Ensaio de rotura à compressão.....	31
Figura 3. 12 - Modos de rotura de compressão satisfatórios segundo a norma NP EN 12390-3. .....	32
Figura 4. 1 – Provedes dos ensaios de tração. Provedes referência de metacaulino castanho...	34
Figura 4. 2 – Influência da adição de plastificante na resistência à tracção por flexão.....	39
Figura 4. 3 – Modos de rotura atingidos pelos provedes após o ensaio de rotura à compressão. .....	40
Figura 4. 4 - Influência da adição de plastificante na resistência à compressão. ....	44
Figura 4. 5 – Aspeto dos provedes realizados a diferentes temperaturas de cura. ....	45
Figura 4. 6 – Registo da temperatura de cura. Provedes submetidos a uma temperatura média de cura de 10°C.....	47
Figura 4. 7 - Registo da temperatura de cura. Provedes submetidos a uma temperatura média de cura de 30°C.....	49
Figura 4. 8 - Registo da temperatura de cura. Provedes submetidos a uma temperatura média de cura de 40°C.....	51
Figura 4. 9 - Registo da temperatura de cura. Provedes submetidos a uma temperatura média de cura de 50°C.....	53
Figura 4. 10 - Influência da temperatura de cura na resistência à tracção por flexão. ....	54
Figura 4. 11 - Influência da temperatura de cura na resistência à compressão. ....	59

---



---

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2. 1 - Constituição dos betões antigos (Pinto, 2006). .....	5
Tabela 2. 2 - Evolução histórica de cimentos obtidos através da ativação alcalina. (Torgal, 2007). .....	6
Tabela 2. 3 - Constituição do betão Portland (Pinto, 2006). .....	7
Tabela 2. 4 – Composição elementar do metacaulino. (Bing-hui et al, 2014) .....	14
Tabela 2. 5 – Composição elementar do metacaulino usado por Heah et al (2011). .....	17
Tabela 3. 1 - Composição elementar do metacaulino de cor branca. (Oliveira, 2014). .....	21
Tabela 3. 2 - Composição elementar do metacaulino de cor castanha. ....	21
Tabela 3. 3 - Composição elementar da areia (Pereira, 2013). .....	22
Tabela 3. 4: Proporções das misturas. Adição de plastificante. ....	24
Tabela 4. 1 - Resultados dos ensaios de tração por flexão. Provetes referência de metacaulino castanho. ....	35
Tabela 4. 2 - Resultados dos ensaios de tração por flexão. Provetes de metacaulino branco. .	35
Tabela 4. 3 - Resultados dos ensaios de tração por flexão. Provetes com 0,3% de plastificante. ....	36
Tabela 4. 4 - Resultados dos ensaios de tração por flexão. Provetes com 0,6% de plastificante. ....	37
Tabela 4. 5 - Resultados dos ensaios de tração por flexão. Provetes com 1,2% de plastificante. ....	38
Tabela 4. 6 - Resultados dos ensaios de compressão. Provetes referência de metacaulino castanho. ....	40
Tabela 4. 7 - Resultados dos ensaios de compressão. Provetes de metacaulino branco. ....	41
Tabela 4. 8 - Resultados dos ensaios de compressão. Provetes com 0,3% de plastificante. ....	42
Tabela 4. 9 - Resultados dos ensaios de compressão. Provetes com 0,6% de plastificante ....	42

---

Tabela 4. 10 - Resultados dos ensaios de compressão. Provetes com 1,2% de plastificante ...	43
Tabela 4. 11 - Resultados dos ensaios de tração por flexão. Provetes submetidos à temperatura de cura de 10°C.....	46
Tabela 4. 12- Resultados dos ensaios de tração por flexão. Provetes submetidos à temperatura de cura de 15°C.....	48
Tabela 4. 13 - Resultados dos ensaios de tração por flexão. Provetes submetidos à temperatura de cura de 30°C.....	48
Tabela 4. 14 - Resultados dos ensaios de tração por flexão. Provetes submetidos à temperatura de cura de 40°C.....	50
Tabela 4. 15 - Resultados dos ensaios de tração por flexão. Provetes de metacaulino castanho submetidos à temperatura de cura de 50°C.....	51
Tabela 4. 16 - Resultados dos ensaios de tração por flexão. Provetes de metacaulino branco submetidos à temperatura de cura de 50°C.....	52
Tabela 4. 17 - Resultados dos ensaios à compressão. Provetes submetidos à temperatura de cura de 10°C.....	55
Tabela 4. 18 - Resultados dos ensaios à compressão. Provetes submetidos à temperatura de cura de 15°C.....	55
Tabela 4. 19 - Resultados dos ensaios à compressão. Provetes submetidos à temperatura de cura de 30°C.....	56
Tabela 4. 20 - Resultados dos ensaios à compressão. Provetes submetidos à temperatura de cura de 40°C.....	57
Tabela 4. 21 - Resultados dos ensaios à compressão. Provetes de metacaulino castanho submetidos à temperatura de cura de 50°C.....	57
Tabela 4. 22 - Resultados dos ensaios à compressão. Provetes de metacaulino castanho submetidos à temperatura de cura de 50°C.....	58

---

## SIMBOLOGIA

### Notação Química:

$\text{Al}_2\text{O}_3$	Óxido de alumínio (Alumina)
$\text{CO}_2$	Dióxido de carbono
$\text{CaCO}_3$	Carbonato de cálcio (Calcário)
$\text{CaO}$	Óxido de cálcio (Cal)
$\text{Ca}_3\text{SiO}_5$	Silicato tricálcico
$\text{Cl}$	Cloro
$\text{FeO}$	Óxido de ferro (II)
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	Óxido de ferro (III) (Ferrugem)
$\text{H}_2\text{O}$	Água
$\text{K}_2\text{O}$	Óxido de potássio
$\text{MgO}$	Óxido de magnésio
$\text{MnO}$	Óxido de manganês
$\text{NaOH}$	Hidróxido de sódio
$\text{NaSiO}_4$	Silicato de sódio
$\text{Na}_2\text{O}$	Óxido de sódio
$\text{P}_2\text{O}_5$	Pentóxido de fósforo
$\text{SO}_3$	Óxido sulfúrico
$\text{SiO}_2$	Dióxido de silício (Silica)
$\text{TiO}_2$	Dióxido de titânio

### Alfabeto Grego:

$\sigma_c$	Valor médio da tensão de rotura à compressão
$\sigma_t$	Valor médio da tensão de rotura à tração

## ABREVIATURAS

BA	Betão Armado
CPN	Cimento Portland normal
EN	Norma Europeia
LEMEC	Laboratório de Estruturas, Mecânica Estrutural e Construções do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra
NP	Norma Portuguesa
UC	Universidade de Coimbra

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Enquadramento geral

A construção civil está muito dependente do uso de minérios naturais e derivados de combustíveis fósseis. O destaque vai obviamente para o cimento Portland Normal CPN, originário da combustão de pedras calcárias e argila, o qual é utilizado no fabrico dos betões usuais, o material mais usado na construção civil do mundo desenvolvido.

Portanto, o betão armado está implicitamente ligado ao CPN, material com excelente comportamento estrutural. Uma das grandes limitações do uso deste material refere-se ao seu modo de fabrico; bastante exigente em termos energéticos, e portanto muito poluente em termos de CO<sub>2</sub>. Interessa também referir o uso de agregados pétreos com determinada granulometria no fabrico dos betões, o que implica estragos irremediáveis na paisagem, como a abertura de pedreiras. Outro aspeto relevante a ter em conta; as estruturas de betão armado, com base no CPN, evidenciam dificuldades de durabilidade a longo prazo. Assim sendo, interessa estudar alternativas ao uso do cimento Portland.

São conhecidas obras antigas onde foram utilizados materiais pétreos artificialmente aglomerados que forneceram um excelente comportamento mecânico, e também em termos de durabilidade e resistência. A redescoberta destes materiais são uma mais valia, uma vez que as dificuldades evidenciadas pelo cimento Portland parecem ser ultrapassadas com este tipo de ligantes que também são obtidos através das rochas da crosta terrestre. Foi possível descobrir que os betões utilizados nestas obras eram à base de argilas calcinadas moídas, materiais cerâmicos moídos e compostos à base de cal. Estes foram os primeiros compostos realizados com base na ativação alcalina. (Pinto, 2006).

Interessa portanto analisar este tipo de misturas, em que se substitui o cimento Portland. Este tipo de misturas apenas serão uma mais valia se evidenciarem as necessárias propriedades mecânicas, pelo menos semelhantes às do betão, e que sejam de obtenção mais eficaz, menos poluente e mais vantajoso em termos económicos. Através da pesquisa efetuada foi possível verificar que os compostos ativados alcalinamente apresentam, de facto, boas propriedades resistentes e são materiais menos poluentes e são acessíveis, pelo menos do ponto de vista monetário.

## 1.2 Objetivos

Na presente dissertação pretende-se estudar o efeito da adição de plastificante e da temperatura de cura em misturas geopoliméricas, constituídas por ligante (metacaulino), agregado (areia) e ativador composto (silicato e hidróxido de sódio). Este trabalho insere-se num campo mais vasto de conhecimento deste tipo de materiais alternativos, pelo que teve origem numa mistura já testada no Laboratório de Estruturas do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, mistura esta que era constituída por um metacaulino de cor branca, designado “MetaMAx® HRM”. Neste trabalho experimental foi usado outro tipo de metacaulino, um ligante de cor castanha de seu nome “ARGECO”.

Assim, pretende-se realizar diversos provetes para avaliar as propriedades resistentes do material, nomeadamente a resistência à tração por flexão e à compressão. Para este objetivo, serão construídos provetes com 0%, 0,3%, 0,6% e 1,2% de plastificante, percentagem esta relativa à massa de ligante. Não são conhecidos estudos relativamente à influência de plastificante na massa de geopolímeros, no que à resistência diz respeito. Portanto, espera-se que estes ensaios possam ser relevantes à implementação deste tipo de betões na construção civil.

Outro aspeto que se pretende estudar consiste no efeito da temperatura de cura neste tipo de compostos. Sabe-se que ao nível da construção, muitos compostos são realizados e curados a temperaturas distintas das temperaturas ambientes e pretende-se estudar o efeito deste parâmetro na capacidade resistente deste tipo de geopolímeros. Assim, serão construídos provetes às temperaturas de cura de 10°C, 15°C, 20°C, 30°C, 40°C e 50°C e posteriormente analisadas as suas capacidades resistentes.

## 1.3 Organização do documento

A presente dissertação é composta por duas partes distintas. Uma primeira parte de revisão bibliográfica, onde serão apresentados os estudos já realizados do tema em questão. A segunda, correspondente ao ensaio laboratorial e onde são apresentados todos os procedimentos realizados. Nesta segunda fase também serão ainda apresentados todos os resultados, discussões e conclusões do trabalho realizado.

De um modo mais detalhado, a dissertação será dividida em 5 capítulos.

No primeiro, pretende-se enquadrar o tema, fazendo uma introdução geral enunciando os objetivos propostos.

O segundo capítulo refere-se aos impactos ambientais causados pelo uso de cimento Portland. Outro aspeto relevante também enunciado neste capítulo corresponde ao efeito e à influência da adição do plastificante e à influência da temperatura de cura no material em causa.

No Capítulo 3 é descrito todo o procedimento laboratorial. É descrito pormenorizadamente a preparação das misturas e dos provetes ensaiados.

No capítulo seguinte, é feita uma análise e discussão dos resultados obtidos nos ensaios e uma comparação entre eles.

Por fim, no Capítulo 5, apresentam-se as conclusões mais relevantes do trabalho realizado e são efetuadas algumas propostas para trabalhos futuros.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo começa-se por referir a evolução histórica desde os cimentos antigos até aos modernos. Os impactos ambientais resultantes do uso do cimento Portland normal CPN e vantagens dos geopolímeros também serão abordados neste capítulo. Também é descrito a obtenção do metacaulino, material usado neste trabalho experimental, e é referida a base da ativação alcalina. Por último, refere-se a influência do plastificante quando adicionado a geopolímeros e a importância da temperatura de cura nestas misturas.

### 2.1 Evolução Histórica

A ativação alcalina de aluminosilicatos veio possibilitar o reencontro com técnicas usadas anteriormente que deixaram marcas e obras grandiosas na História da humanidade. São conhecidas, como exemplo da ativação alcalina, o Coliseu de Roma (Figura 2.1), o Panteão Romano ou as Termas de Caracala, apresentando um excelente comportamento mecânico, elevada durabilidade e resistência às ações externas. (Pinto, 2006).



Figura 2. 1 – Coliseu de Roma.

As famosas pirâmides do planalto de Gizeh, no Egito, são outro exemplo de grandes obras realizadas recorrendo à ativação alcalina, e sugere que os egípcios dominavam a realização de cimentos do tipo alcalino. Existiriam matérias-primas em grande abundância, tal como a cal e o caulino, mas também a sílica e a alumina, de natureza vulcânica, originárias das lamas



argilosas do rio Nilo, e o carbonato de sódio, o célebre *natrum* dos embalsamentos. (Pinto, 2006).

Estes betões e argamassas mais antigas apresentam-se com elevada dureza e estabilidade, não demonstrando grandes sinais de desgaste ou alteração química, e revelam um comportamento mecânico muito satisfatório. Destacam-se as quantidades significativas de sílica ( $\text{SiO}_2$ ) e alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), em valores muito superiores aos usados nos betões de CPN, e a presença de óxidos alcalinos ( $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{CaO}$  e  $\text{MgO}$ ), apresentados na Tabela 2.1. (Pinto, 2006).

Tabela 2. 1 - Constituição dos betões antigos (Pinto, 2006).

Constituição Química	Cimentos Romanos	
	160 AC	140 AC
$\text{SiO}_2$	42,00 %	39,56 %
$\text{Al}_2\text{O}_3$	14,48 %	14,01 %
$\text{Na}_2\text{O}$ , $\text{K}_2\text{O}$	4,21 %	4,02 %
$\text{CaO}$ e $\text{MgO}$	39,22 %	42,35 %

Apresenta-se agora, na Tabela 2.2, uma cronologia histórica dos estudos realizados por parte da comunidade científica em torno desta problemática. Destaca-se a evolução das investigações, depois de Davidovits, em 1979, ter patenteado as investigações sobre a polimerização de metacaulino, introduzindo o termo “geopolímero”.

Tabela 2. 2 - Evolução histórica de cimentos obtidos através da ativação alcalina. (Torgal, 2007).

Autor	Ano	Descrição
Feret	1939	Cimentos com escórias
Purdon	1940	Combinações alcalis-escórias
Glukhovsky	1959	Bases teóricas e desenvolvimento de cimentos alcalinos
Glukhovsky	1965	Primeiros cimentos alcalinos
Davidovits	1979	Termo “ Geopolimero”
Malinowski	1979	Caracterização de aquedutos milenares
Forss	1983	Cimento tipo F
Langton e Roy	1984	Caracterização de materiais em edifícios milenares
Davidovits e Sawyer	1985	Patente do cimento “ Pyrament “
Krivenko	1986	Sistemas $R_2O - RO - SiO_2 - H_2O$
Malolepsy e Petri	1986	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 adiabatica de ligantes alcalinos com residuos 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 cimento de escórias
Roy et al.	1991	Presa 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

O cimento do tipo Portland surge na primeira metade do século XIX, através de J. Asdin. Assumiu tal preponderância que hoje, o betão armado BA é o material de construção mais usado em todo o mundo desenvolvido. Teve grande impacto uma vez que é um material relativamente barato, não envolve tecnologias elaboradas no seu fabrico e molda-se com facilidade a qualquer tipo de cofragem, permitindo atingir apreciáveis níveis de resistência mecânica. (Pinto, 2006).

Nestes cimentos, destacam-se a combinação de óxidos de cálcio  $CaO$ , silício  $SiO_2$ , alumínio  $Al_2O_3$  e ferro  $Fe_2O_3$ , originários do calcário, da argila e do gesso. A composição do cimento Portland é apresentada na Tabela 2.3 (Pinto, 2006).

Tabela 2. 3 - Constituição do betão Portland (Pinto, 2006).

Constituição Química	Cimento Portland
SiO <sub>2</sub>	17 a 25 %
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3 a 8 %
CaO	60 a 67 %
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,5 a 6 %

São assim visíveis as diferenças de constituintes dos betões mais antigos (Tabela 2.1) quando comparados com os cimentos Portland.

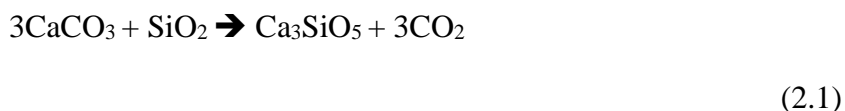
## 2.2 Impacte Ambiental

É de extrema importância conhecer e identificar os problemas que geram, e a que estão sujeitos, os materiais usados na construção civil. Nem todos os problemas estão relacionados com agentes químicos, sendo muitos deles provocados por ações físicas de desgaste e erosão, tanto a nível geofísico como por ação dos seres vivos. Assim, sabendo que estarão sujeitos aos vários agentes agressivos, é essencial garantir a conservação das propriedades dos materiais usados durante a sua vida útil. (Pinto, 2004).

As estruturas de BA à base de CPN sofrem deteriorizações precoces, originando custos elevados ao nível da reparação dessas estruturas e impactos ambientais associados a essas operações. O uso deste material possui a desvantagem de ser agressivo para o ambiente, uma vez que na sua produção se geram consideráveis quantidades de dióxido de carbono. (Torgal e Jalali, 2010).

Citando Torgal e Jalali, a vulnerabilidade do CPN deve-se ao facto de este possuir uma elevada quantidade de cal, propenso a ataque químico, e ainda agravado pela inaptidão do cimento Portland em conseguir uma boa aderência aos agregados. Devido a essa dificuldade, são originados elevados níveis de permeabilidade, contribuindo assim para a entrada de água, gases e substâncias agressivas, elementos estes que contribuem para os fenómenos de carbonatação e corrosão das armaduras. Tal como já foi referido, a produção de cimento Portland gera emissões de CO<sub>2</sub>, devido à utilização de combustíveis fósseis para a produção de eletricidade necessária ao processo produtivo. A emissão de dióxido de carbono resulta da

descarbonatação do calcário quando incinerado simultaneamente com materiais siliciosos, de acordo com a reação 2.1.



O dióxido de carbono é um dos gases responsáveis pelo aumento do efeito de estufa. Na Figura 2.2 é possível observar a similaridade entre a evolução da temperatura e o aumento de CO<sub>2</sub> ao longo dos anos.

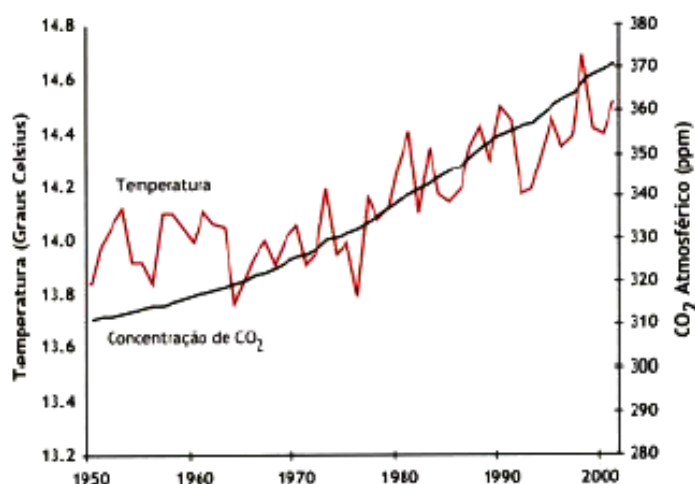


Figura 2. 2 – Evolução da temperatura com o nível de concentração de CO<sub>2</sub>. (Torgal et al, 2005).

Uma das formas da indústria cimenteira combater esta exagerada emissão de CO<sub>2</sub> consiste na produção de cimentos aditivados com subprodutos de características cimentícias, como as escórias e as cinzas volantes, diminuindo também o seu custo de produção. Mesmo baixando o nível de emissões de carbono, esse valor não se torna sustentável, existindo por isso a necessidade do desenvolvimento de materiais “mais amigos do ambiente”. (Torgal e Jalali, 2010)

A comunidade científica refere várias vantagens dos ligantes geopoliméricos (metacaulino), em relação ao cimento Portland, entre quais: a redução de emissão de CO<sub>2</sub>, resistências mecânicas conseguidas em poucas horas, baixa condutibilidade térmica, resistências a altas temperaturas, observável na Figura 2.3, resistência ao ataque químico, ilustrado na Figura 2.4,

uma vez que estes ligantes possuem a particularidade de serem imunes às reações alcálo-sílica, que se constata na Figura 2.5. A diferença de resistências a altas temperaturas é de tal modo diferenciada que os betões constituídos à base de CPN iniciam a sua desintegração para temperaturas acima dos 300°C, enquanto que os geopoliméricos resistirão até temperaturas aproximadamente de 1000°C. (Torgal et al, 2005).

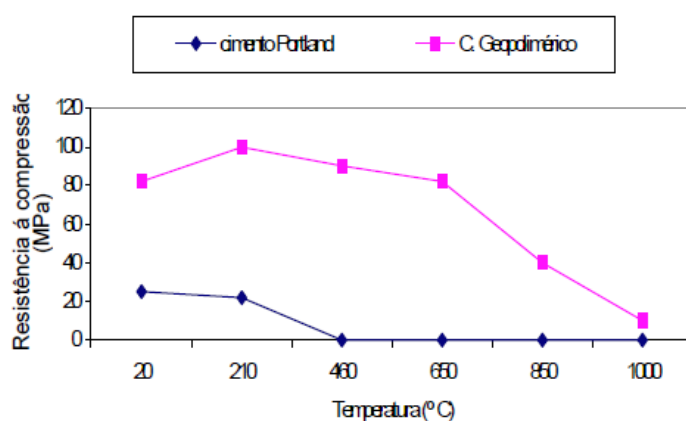


Figura 2. 3 – Evolução da resistência à compressão com o aumento da temperatura de exposição (Torgal et al, 2005).

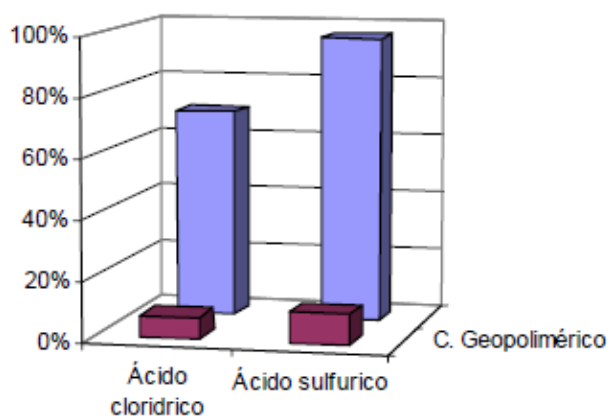


Figura 2. 4 – Perda de peso após ataque químicos em geopolímeros e betões à base de CPN (Torgal et al, 2005).

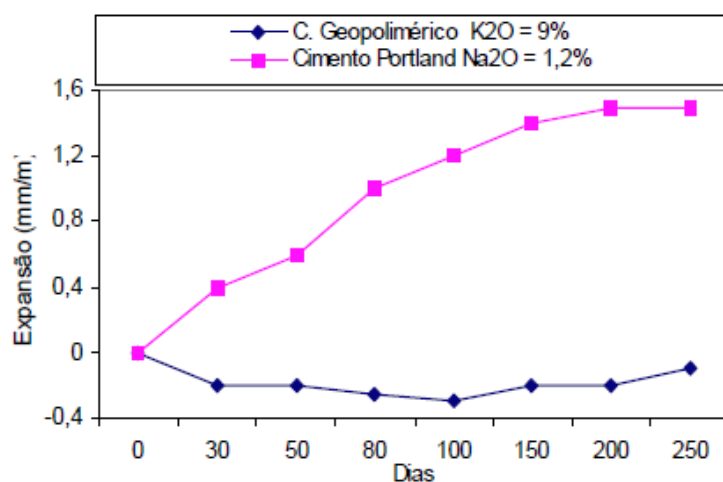


Figura 2. 5 – Medição da expansão em geopolímeros e betões à base de CPN em resultado de reações alcali-silica (Torgal et al, 2005).

Ainda assim, a comunidade científica não solucionou diversos problemas associados aos geopolímeros, entre eles: o nível de retração ligeiramente superior aos betões de CPN, a reduzida trabalhabilidade proporcionada pela viscosidade das soluções alcalinas, a elevada dependência das condições de cura, quer em relação à temperatura de cura como em relação à evaporação da fase líquida das misturas. Interessa referir que a possibilidade do uso de plastificantes vai ser abordada neste trabalho experimental, assim como várias condições de cura destas misturas. (Torgal et al, 2005).

Assim, os ligantes geopoliméricos enquadram-se numa alternativa viável ao cimento Portland, visto que apresentam maior durabilidade, melhor desempenho estrutural e menor impacto ambiental. Estes ligantes permitem, não só reduzir o nível de emissão de CO<sub>2</sub> como também reaproveitar sub-produtos industriais e de resíduos de minas e pedreiras. (Torgal e Jalali, 2010).

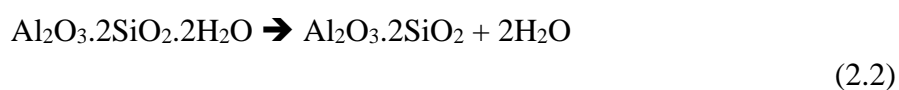
### 2.3 Ligantes ativados alcalinamente

O CPN pode ser ativado hidráulicamente, i.e., a sua resistência pode decorrer de um conjunto de reações químicas desenvolvidas depois de se adicionar água ao CPN. Alternativamente, outro conjunto de reações químicas, conducente ao aumento da rigidez de uma pasta, pode ser conseguido juntando soluções alcalinas, por exemplo o hidróxido de sódio e o silicato de sódio, a um ligante adequado; é a designada ativação alcalina de um ligante.

Com base em investigações, Glukhovsky propôs uma nova geração de ligantes, a que chamou “solo-cimentos”, cuja formação é semelhante à de muitos minerais e rochas que constituem a crosta terrestre, como é o caso dos zeólitos. A formação deste tipo de ligantes pode ser obtida de duas formas; compostos solúveis de metais alcalinos em conjunção com sistemas de alumino-silicatos, sem a presença de cálcio, como cinzas vulcânicas, metacaulinos e argilas calcinadas ou compostos ricos em cálcio: cal, cimento Portland, etc., envolvendo materiais alcalino-terrosos com um significativo teor em cálcio. Os compostos referidos são ativados alcalinamente com hidróxido de sódio ou de potássio, reação essa que provoca alterações na estrutura dos materiais. Ao grupo dos compostos ricos em cálcio pertencem os ligantes desenvolvidos e estudados pelo investigador já referido enquanto que os compostos solúveis de metais alcalinos se incluem nos sistemas cimentícios patenteados por J. Davidovits, tendo por base a ativação alcalina do metacaulino (Pinto, 2006).

Os cimentos de escórias alcalinas têm sido estudados com particular interesse uma vez que podem atingir resistências mecânicas de até 150 MPa e apresentam elevado nível de impermeabilidade e baixa retração. Enquanto que o cimento Portland funciona apenas como cola, estes cimentos de base alcalina são ativos e reagem com sistemas de alumino-silicatos numa espécie de reação pozolânica rápida. Esta reação é a responsável pelas elevadas resistências a curto prazo, a uma taxa muito superior à do CPN. Forma-se um material zeolítico muito semelhante ao que ocorre na Natureza, reforçando a durabilidade e estabilidade do betão feito com este ligante. Mas apesar do continuado e crescente interesse nos materiais ativados alcalinamente, a comunidade científica ainda não resolveu determinados aspetos do problema, entre os quais, os mecanismos que controlam o processo de ativação, assim como a natureza dos produtos de hidratação e a sua ligação com as substâncias ativadoras, questões que poderiam ajudar na total compreensão do comportamento mecânico-resistente e da elevada inércia química que apresentam (Pinto, 2006).

O metacaulino é obtido a partir do caulino, alumino-silicatos naturais, que são submetidos a um tratamento térmico com vista à desidroxilação. Assim, ao aquecer o caulino entre 500 e 900°C, obtém-se a referida desidroxilação (perda dos hidroxilos OH). A reação que está na base do metacaulino é a seguinte.



Importa referir que os caulinos, assim como as cinzas vulcânicas, e certas cinzas volantes, têm um teor em cálcio muito baixo, afastando-se dos ligantes em que o cálcio tem uma função

fundamental, como no caso do CPN. Davidovits afirma que a referida desidroxilação do caulino deverá ser acima dos 600 °C e abaixo dos 950°C, uma vez que até aos 500°C a reação é reversível, ou seja, se se adicionar água do produto originário da desidroxilação, obter-se-á novamente a hidratação do caulino. Apenas acima dessa temperatura, a formação do metacaulino se encontrará perfeitamente estável, impossibilitando a reversibilidade da reação (Pinto, 2004).

A produção destes ligantes desenvolve-se em 4 etapas: a primeira, numa mistura em proporções adequadas de calcário, dolomite e caulino; de seguida, a mistura é triturada, moída e calcinada em fornos a temperaturas da ordem dos 900°C; debaixo destas condições forma-se o metacaulino, material com propriedades pozolânicas, enquanto que por perda do CO<sub>2</sub>, os carbonatos de cálcio e de magnésio se transformam em óxidos de cálcio e de magnésio; por último adiciona-se o carbonato de sódio ou de potássio, juntamente com água, formando a soda cáustica que vai desencadear uma reação exotérmica (Pinto, 2006).

Durante o processo de ativação alcalina, é obtida uma primeira fase de gelificação, seguida do processo de polimerização. Segundo Palomo, a separação marcada destas duas fases facilita e potencia os ganhos de resistência devido a uma definição mais clara e completa dos pontos de nucleação. Assim, Palomo propõe uma ordem de mistura dos reagentes, de modo a desenvolver positivamente o produto final. Primeiramente consistiria numa fase de misturar e maturar os componentes solúveis e numa fase posterior adicionar os produtos insolúveis. Segundo Pinto, esta ordem justifica-se quer do ponto de vista químico quer do ponto de vista físico. Outra questão relevante prende-se com a sensibilidade dos materiais obtidos por ativação alcalina às condições de cura. A questão principal e mais relevante dá-se na possibilidade de retração associada à perda de água de hidratação. O mesmo autor refere que se deve envolver os provetes numa película de plástico neste processo de cura, impossibilitando a eliminação ou trocas de água com o meio envolvente (Pinto, 2006).

#### **2.4 Influência da adição de plastificante**

É conhecida a principal influência da adição de adjuvantes à massa de betões constituídos pelo CPN; melhora as características resistentes da pasta. Os progressos na química dos adjuvantes têm sido assinaláveis, obtendo-se produtos que permitem reduções significativas da água de amassadura e o aumento substancial da plasticidade e trabalhabilidade das argamassas. Estas melhorias, que estes aditivos conferem às massas onde são inseridas, justifica-se pela melhoria das suas propriedades resistentes, garantindo a obtenção de um grau de hidratação mais rápido do cimento, dando lugar à formação mais compacta e mais resistente do produto final. Assim, sabe-se que com a adição de plastificante, é possível



reduzir a quantidade de água de amassadura, resultando numa redução do número de partículas não hidratadas e conferindo a já falada compactação e resistência do produto final. (Pinto, 2006).

A adição destes adjuvantes é muito importante, quer ao nível de transporte do betão, onde se pretende que este chegue ao local em perfeitas condições de trabalhabilidade, quer ao nível da colocação em obra, dando particular relevância à fase de vibração, permitindo uma maior eficiência na expulsão da fase gasosa, reduzindo assim ao máximo os problemas de segregação dos componentes do betão que possam prejudicar a formação de um composto homogéneo e denso. (Hot et al, 2014).

Muitos estudos foram realizados à base das suas propriedades químicas e mecânicas, na sua microestrutura e o seu potencial para diversas aplicações, mas poucos estudos foram direcionados para o seu comportamento reológico. Favier et al (2014), destacam as diferenças nas propriedades de fluxo que existem entre geopolímeros feitos de metacaulino e o CPN. As interações entre as partículas coloidais de metacaulino são insignificantes e são os efeitos hidrodinâmicos que controlam o comportamento reológico do material. Segundo estes investigadores, devido ao facto descrito anteriormente, adjuvantes como o caso de plastificantes que servem para melhorar o comportamento reológico do CPN não vão ser funcionais e eficientes quando aplicados em geopolímeros.

O estudo referido anteriormente, não pode ser aplicado em todas as misturas geopoliméricas, uma vez que nos constituídos por cinzas e escórias, as partículas já interagem entre si devido à presença de cálcio.

Num geopolímero, a viscosidade da mistura é controlada pela viscosidade da solução alcalina, a qual é controlada pela proporção química dos reagentes da solução por forma a obterem-se propriedades mecânicas adequadas do material. Soluções de silicato de sódio apresentam uma maior viscosidade do que soluções de silicato de potássio. Assim, para produzir geopolímeros com uma viscosidade mais baixa seria adequado usar iões de potássio em vez dos de sódio. No entanto, a substituição de sódio por potássio aumenta significativamente o preço da mistura.

A mistura à base de metacaulino não é adequada para aplicações que funcionariam como elemento de ligação, onde é necessário um alto limite elástico. Aplicações tais como a betonilha, ou de nivelamento, serão mais adequadas a este material devido ao seu peso e alta viscosidade (Favier et al, 2014).

## 2.5 Efeito da temperatura de cura

A influência da temperatura de cura em misturas geopoliméricas será agora abordada com base em várias investigações já realizadas relativamente a este parâmetro. De modo geral, a bibliografia existente refere que o aumento da temperatura de cura neste tipo de misturas é vantajosa, atingindo a temperatura ótima de cura aos 60°C.

Bing-hui et al (2014) testaram diversos provetes a diferentes temperaturas de cura, no domínio 20°C a 100°C. O ligante usado foi o metacaulino que apresenta a composição elementar ilustrada na Tabela 2.4. Neste ligante, destaca-se a presença de aproximadamente 1/3 de água na sua constituição, não se percebendo com rigor a origem desta água, uma vez que na pesquisa efetuada foi o único metacaulino com tal composição. Interessa referir que os provetes usados para a realização dos ensaios foram cubos de lado 20mm. Estes provetes parecem ser de dimensões excessivamente pequenas para os objetivos pretendidos.

Tabela 2. 4 – Composição elementar do metacaulino. (Bing-hui et al, 2014)

Component	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	H <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO
Composition (mass%)	36.98	19.06	10.43	31.95	0.79	0.6	0.19

Por exemplo, na Figura 2.6 pode observar-se que o aumento da temperatura de cura reduz drasticamente o tempo de solidificação do material. A diferença é tal, que, no caso da mistura geopolimérica curada a 20°C, o tempo de endurecimento inicial e final foram de 953 min e 1336 min, respetivamente. Já no caso em que a temperatura de cura estudada foi de 100°C, verifica-se que em apenas 20 min o material atinge a sua solidificação.

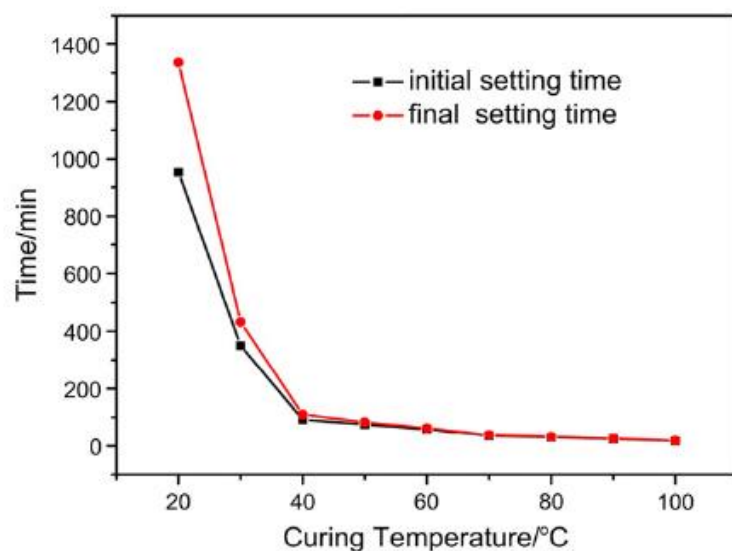


Figura 2. 6 – Tempo de cura em função da temperatura de cura. (Bing-hui et al, 2014).

Os investigadores prosseguiram o estudo e apresentam as resistências dos vários provetes nas diferentes temperaturas de cura testadas. Na Figura 2.7 é possível observar a influência do tempo de cura assim como da temperatura de cura. Como seria espectável, quanto maior o tempo de cura melhor a resistência dos provetes à compressão, uma vez que existe uma melhoria da formação da estrutura, resultado da prolongação das reações presentes nos processos de geopolimerização. Através dos resultados obtidos conclui-se que as reações de geopolimerização ocorrem a uma velocidade mais elevada a temperaturas mais altas.

Avaliando agora as resistências à compressão dos vários provetes nas diferentes temperaturas, verifica-se um aumento de resistência com o aumento da temperatura, exceto nos casos estudados a 80°C e 100°C. Os provetes curados em 7 dias a 60°C foram os que apresentaram maiores resistências à compressão, apresentando resistências na ordem dos 98 MPa. A maior diferença registada relativamente aos tempos de cura foram os provetes submetidos à temperatura de 20°C, em que no primeiro dia de cura apresentam uma resistência à compressão de 12,1 MPa e ao sétimo dia revelam a resistência de 62 MPa. Devido à temperatura relativamente baixa, esses provetes ensaiados no primeiro dia de cura ainda se apresentavam húmidos e gelatinosos, resultado da não conclusão dos processos de geopolimerização. Outro aspeto relevante prende-se com a existência de mais vazios nas idades precoces de cura, justificado pela ausência de tempo para que as reações essenciais ao processo se completem. Também referiram o aumento da viscosidade das misturas para temperaturas de cura a 80°C e a 100°C.

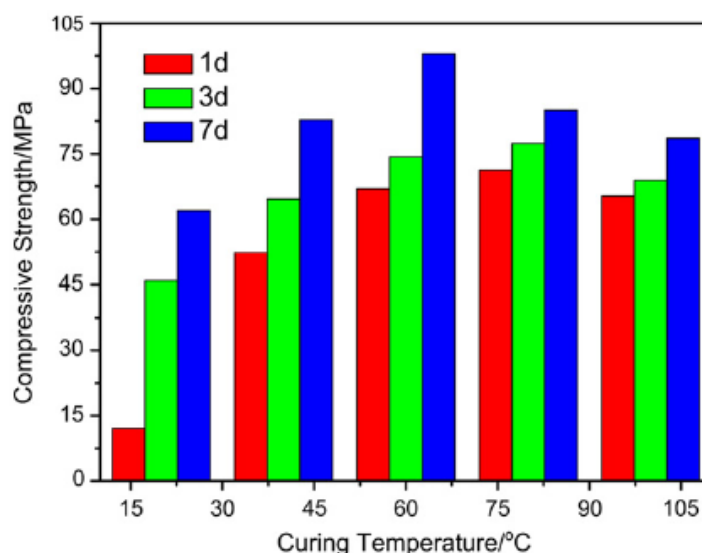


Figura 2. 7 – Resistência à compressão em função da temperatura e duração de cura. (Binghui et al, 2014).

Concluindo e analisando os resultados observados, constata-se que a elevação da temperatura de cura acelera as reações de geopolimerização deste tipo de misturas. No entanto, a cura a temperaturas de 80°C e 100°C resultam num efeito negativo sobre as propriedades resistentes do material.

Noutro trabalho experimental, realizado por Heah et al (2011), também foi estudada a influência da temperatura de cura entre a gama de temperaturas de 40°C a 100°C, durante um, dois e três dias. Interessa também referir este estudo, uma vez que se alcançou outro tipo de conclusões relevantes para o estudo em causa.

Este estudo revelou também o trabalho realizado por Rovnanik, onde foi estudado o efeito da temperatura de cura em geopolímeros a temperaturas de 10, 20, 40, 60 e 80°C. Uma conclusão importante retirada deste estudo prende-se com a adição de água extra às misturas, diminuindo a sua resistência à compressão. Interessa retirar deste estudo que a cura por períodos mais longos de tempo, a temperaturas elevadas, enfraquece a estrutura do material, o que sugere uma desidratação, diminuindo a sua integridade estrutural.

Interessa agora perceber com que tipo de metacaulino foram realizadas as misturas. Encontram-se na Tabela 2.5, as composições elementares do metacaulino usado. As misturas serviram para construir provetes cúbicos com 50mm de lado.

Tabela 2. 5 – Composição elementar do metacaulino usado por Heah et al (2011).

Chemical	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	CaO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	MgO
Wt (%)	50 - 52	33 - 35	0,6 – 1,0	0,5 – 0,9	< 0,05	1,5 – 2,0	0,01-0,05	0,3 – 0,7

Do estudo realizado, observou-se que as reações de geopolimerização são extremamente lentas às temperaturas mais baixas. Devido a essa velocidade baixa, durante os primeiros 3 dias de cura, a amostra não endurece e só revela resultados após 7 dias de cura, ainda assim baixa. Tal conclusão pode ser observada na Figura 2.8.

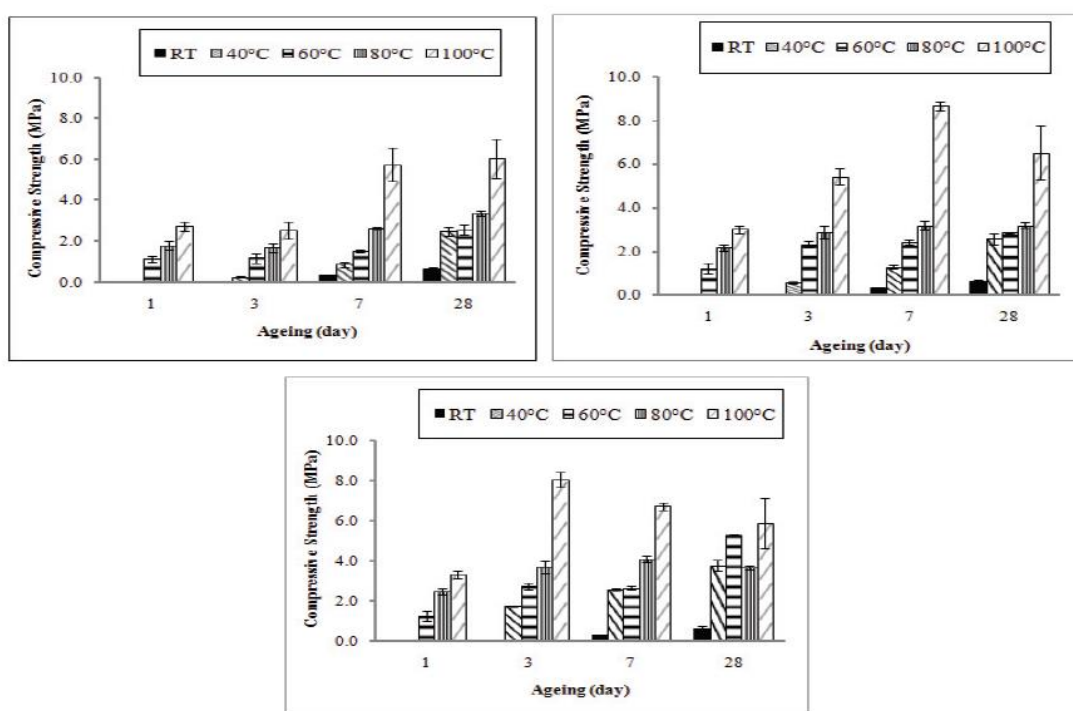


Figura 2. 8 – Resistência à compressão de provetes realizados às temperaturas de cura de 20, 40, 60, 80 e 100°C durante 1, 2 e 3 dias nessas condições. Heah et al (2011).

Nestes gráficos existem diversos aspectos que não se entendem. Em primeiro lugar não se entendem os valores das tensões resistentes à compressão inferiores a 2MPa a partir dos 7 dias de cura. Também não se entende a degradação da resistência dos provetes curados a 100 °C, entre o 7º e o 28º dias, adiante explicado. Contudo, observa-se a quebra de resistência, quando se curou a temperaturas mais elevadas durante 3 dias. Tal facto, dever-se-á à contração da mistura, em resultado da perda de moléculas de água, impedindo que as amostras se transformam numa forma semi-cristalina.

A 40°C e a 60°C o ganho foi idêntico, não havendo perda de resistência com o aumento dos dias de cura. Tal como no estudo anterior, também este conclui que a cura ótima ocorre a cerca de 60°C, uma vez que houve um ganho de resistência mais rápido em comparação com a temperatura de cura a 40°C, e também aumento de resistência quando curada a 3 dias. Nas temperaturas mais elevadas, o tempo curto de cura favoreceu o desenvolvimento da resistência à compressão. Nas mais baixas, haverá a necessidade de maior tempo de cura, de modo a favorecer as reações geopoliméricas.

Através da Figura 2.9 é possível observar que partículas de metacaulino curado a 60°C tornam-se mais densas e compactas com o tempo, contribuindo para uma maior resistência à compressão aos 28 dias. Prova-se assim a importância, do tempo de cura para as condições consideradas ótimas, no que às reações de geopolimerização diz respeito. Como já referido acima, prova-se que a cura a temperaturas mais elevadas, por exemplo a 100°C, por um longo período, fará com que a estrutura perca capacidade resistente. Este diminuir de resistência aos 28 dias poderá ser devido à evaporação de água, formando assim microcavidades. As cavidades ilustradas na Figura 2.9 (h) serão originárias provavelmente devido aos espaços deixados pela dissolução das partículas de caulinita, decorrente do processo de aquecimento. A fuga destas partículas não danificarão a matriz geopolimérica já formada, mas escapar-se-ão e revelaram os vazios resultantes.

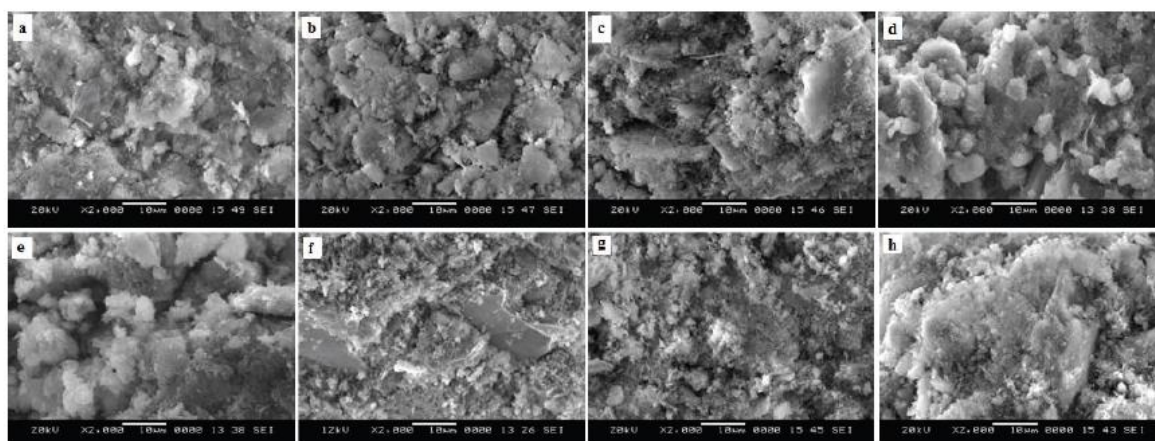


Figura 2. 9 – Micrografias do geopolímero curado durante 3 dias a 60°C e analisado no 1º dia (a), 7º dia (b) e 28º dia (c). Micrografias do geopolímero curado durante 1 dia a 80°C e analisado no 1º dia (d), 7º dia (e) e 28º dia (f). Micrografias do geopolímero curado durante 2 dias a 100°C e analisado no 7º dia (g) e 28º dia (h). Heah et al (2011).

Também Perera et al (2007) estudaram o efeito da temperatura de cura, mas debruçaram-se no estudo da porosidade revelada pelas várias temperaturas. Deste estudo concluiu-se que a rigidez diminui exponencialmente com a porosidade, o que conhecido, e a porosidade

depende da quantidade de água de amassadura, como nos betões constituídos por CPN, em que a resistência diminui com o rácio água/cimento.

Assim, o estudo consistiu na pré cura dos provetes a três temperaturas diferentes, temperatura ambiente RT=22°C, 40°C e 60°C durante 24 horas. Na Figura 2.10 é visível o nível de porosidade das amostras às várias temperaturas registadas. Uma das dificuldades encontrada consistiu na desmoldagem das amostras com menos de 3 dias, uma vez que se encontravam demasiado húmidas. É facilmente perceptível o aumento da porosidade das amostras com o aumento da temperatura. Tal facto deve-se à evaporação da fase líquida, abrindo assim espaços no material. Obviamente que, com o aumento da porosidade deu-se a perda de peso e a redução da densidade do material.

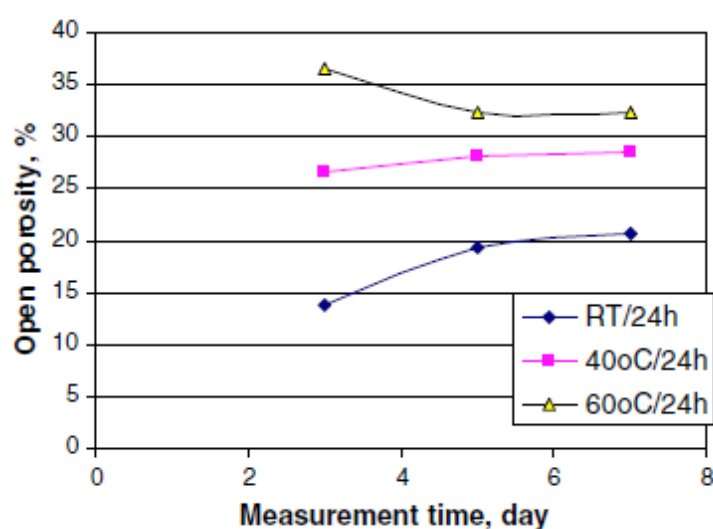


Figura 2. 10 – Nível de porosidade registada das amostras curadas às temperaturas de 22°C, 40°C e 60 °C. (Perera et al 2007).

### 3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Neste capítulo pretende-se enunciar a atividade experimental realizada ao longo deste trabalho. Inicialmente são descritos e enunciadas todas as características de cada material utilizado para a obtenção dos provetes realizados. De seguida é descrito e ilustrado o procedimento seguido para a obtenção das misturas. O capítulo termina com a descrição de como foram feitos os ensaios e de como se obtiveram os parâmetros que se pretende estudar; a tensão de rotura à tração por flexão e a tensão de rotura à compressão.

#### 3.1 Caracterização dos materiais

##### 3.1.1 Metacaulino

Neste trabalho foram usados dois tipos de metacaulinos, um de cor branca designado comercialmente por “MetaMAx® HRM” e um segundo de cor castanha comercialmente conhecido por “ARGEKO”. O primeiro foi fornecido pela empresa americana “Engelhard” enquanto que o segundo foi disponibilizado pela empresa francesa “Argeco Développement”. Os metacaulinos usados podem ser observados na Figura 3.1.



Figura 3. 1 - Metacaulinos usados para a obtenção das misturas.

Trata-se de metacaulinos de alta reatividade, constituídos por partículas finas e de alto teor de aluminossilicatos. As grandes diferenças físicas entre eles são a já referida diferença de cor e também a massa volúmica, sendo maior a do metacaulino de cor castanha.

---



O metacaulino branco é um material já conhecido e estudado no LEMEC. Os principais constituintes deste composto, no que à sua composição elementar diz respeito, são apresentados na Tabela 3.1. Tanto para o metacaulino referido como para o metacaulino castanho destacam-se a sílica e a alumina como os principais constituintes dos mesmos.

Tabela 3. 1 - Composição elementar do metacaulino de cor branca. (Oliveira, 2014).

Elemento	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SO <sub>3</sub>	FeO
Percentagem	57	36,97	0,15	2,73	0,40	1,26	0,42	0,54	0,36

Este metacaulino apresenta uma dimensão média das partículas de 1,2 µm, uma massa volúmica de 2500 kg/m<sup>3</sup> e uma superfície específica de 13 m<sup>2</sup>/g.

De seguida, na Tabela 3.2 é apresentada a composição elementar constituinte do metacaulino de cor castanho fornecidos pela entidade fornecedora.

Tabela 3. 2 - Composição elementar do metacaulino de cor castanha.

Elemento	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	MnO	Na <sub>2</sub> O
Percentagem	70,19	21,80	0,38	1,15	2,20	0,09	0,02	0,27	0,09

Como já referido anteriormente, este composto apresenta uma maior massa volúmica, relativamente ao de cor branca. Assim a massa volúmica é de 2510 kg/m<sup>3</sup>, com uma dimensão média das partículas de 5,7 µm e uma superfície específica de 20,1 m<sup>2</sup>/g.

### 3.1.2 Areia

A areia usada neste trabalho foi recolhida junto do nó da autoestrada A1, na zona de Taveiro. Este material também já tinha sido objeto de estudo, e assim, apresenta-se na Tabela 3.3 a sua composição elementar. Este material apresenta uma densidade de 2,64 kN/m<sup>3</sup>. A Figura 3.2 ilustra a curva granulométrica correspondente. (Guerra, 2014).

Tabela 3. 3 - Composição elementar da areia (Pereira, 2013).

Elemento	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	MgO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	TiO <sub>2</sub>	CaO	Cl
Percentagem	85,16	6,67	4,79	1,51	0,46	0,37	0,33	0,31	0,26	0,06

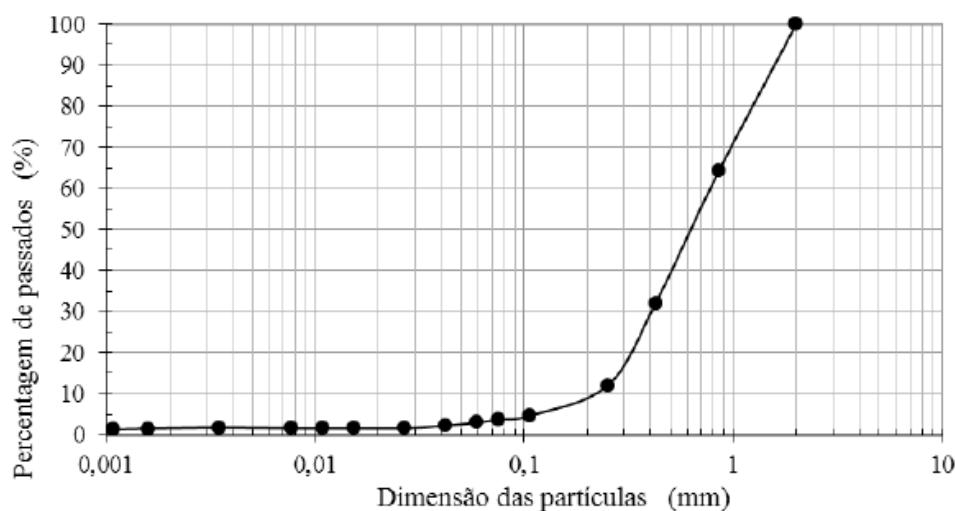


Figura 3. 2 - Curva granulométrica da areia (Pereira, 2013).

### 3.1.3 Ativador

Neste trabalho foi usado um ativador composto resultante da combinação, em proporções adequadas, do ativador Hidróxido de Sódio (NaOH) com o ativador Silicato de Sódio (NaSiO<sub>4</sub>).

O hidróxido de sódio é um composto preparado com base na soda cáustica, juntando-lhe água. A soda cáustica usada e fornecida pela empresa “*Sociedade Portuguesa de Drogas, S.A*” foi em forma de grãos. Para a obtenção do hidróxido de sódio foi usado a proporção de 1 kg de soda cáustica para 2,5 litros de água, correspondendo a uma concentração molal de 12,5M. Esta componente do ativador é responsável pela separação das principais componentes elementares do ligante, a sílica e a alumina.

Interessa referir que esta mistura foi realizada num recipiente metálico uma vez que é uma reação exotérmica onde se atinge cerca de 70°C de temperatura. Para além disso, nesta reação é libertado hidrogénio, o qual requer alguma precaução.

O silicato de sódio também funciona como ativador na reação química e foi igualmente fornecido pela empresa “*Sociedade Portuguesa de Drogas, S.A*”. Comercialmente este

composto é designado por *Silicato de Sódio D40* e apresenta-se no estado líquido, revelando uma viscosidade moderada. Esta componente do ativador é responsável pelas ligações responsáveis pela rigidez do composto, nomeadamente os aluminossilicatos.

A composição do ativador é conseguida com a mistura do hidróxido de sódio com o silicato de sódio na proporção de 1 (hidróxido de sódio) : 2 (silicato de sódio).

### **3.1.5 Plastificante**

O plastificante usado neste trabalho foi fornecido pela empresa “BASF” e é comercialmente designado por *Pozzolith 540*. É um composto que se apresenta no estado líquido, revelando uma cor escura.

## **3.2 Composições das misturas**

A ativação alcalina consiste na mistura de compostos que reagindo entre si formam geopolímeros. Como ligante nas misturas foram usados dois metacaulinos, os já referidos de cor branca MB e castanha M, e como ativador na mistura foi usado um ativador composto de hidróxido e silicato de sódio. A quantidade de ativador foi apenas a necessária para garantir a trabalhabilidade da mistura. Como inerte foi apenas usada a areia. Não foi usado qualquer tipo de brita devido à menor dimensão dos provetes.

Como o metacaulino de cor branca apresenta uma maior densidade do que o de cor castanha, as proporções de ativador composto tiveram de ser ajustadas ao respetivo ligante. Assim, para a mistura do metacaulino mais denso foi usada a proporção de 300g de NaOH e 600g de NaSiO<sub>4</sub>, enquanto que para o menos denso a proporção foi de 215g de hidróxido de sódio e 430g de silicato de sódio.

Com o intuito de estudar a influência da adição do plastificante à mistura de um geopolímero, optou-se por realizar diversas misturas, nas quais foram sendo adicionadas várias percentagens de plastificante relativamente à massa de ligante. O plastificante usado encontra-se ilustrado na Figura 3.3. As composições das misturas são descritas na Tabela 3.4. Como se pode constatar, as quantidades de areia e de metacaulino são constantes. A quantidade de ativador composto varia em função do anteriormente descrito. A designação de cada mistura depende então do tipo de metacaulino e da quantidade de plastificante adicionado à mistura. De referir que a quantidade de plastificante adicionado corresponde a uma dada percentagem em peso da quantidade de ligante, tal como se faz na produção do betão.

Foi também estudada a influência da temperatura de cura das misturas. Para o efeito foram produzidas diversas misturas que depois foram curadas à temperatura pretendida durante pelo menos três dias. As quantidades dos componentes de cada mistura são mantidas constantes e iguais às das misturas base MB 0%, ou M 0%, apresentadas na Tabela 3.4.

Interessa referir que as quantidades descritas para cada mistura, correspondem à massa necessária para a realização de 6 provetes de dimensões 40mmx40mmx160mm.



Figura 3. 3 - Plastificante usado para as misturas.

Tabela 3. 4: Proporções das misturas. Adição de plastificante.

Designação	Metacaulino	Areia	Hidróxido de sódio	Silicato de sódio	Percentagem de plastificante
MB 0%	750g	1875g	300g	600g	0%
M 0%	750g	1875g	215g	430g	0%
M 0,3%	750g	1875g	215g	430g	0,3%
M 0,6%	750g	1875g	215g	430g	0,6%
M 1,2%	750g	1875g	215g	430g	1,2%

Posteriormente a todos os compostos medidos segue-se a fase da mistura destes, realizada na misturadora ilustrada na Figura 3.4. Inicialmente introduziu-se a areia no recipiente da misturadora, e depois, foi sendo introduzido de forma lenta e em simultâneo o metacaulino, o ativador e a percentagem de plastificante indicada para cada mistura.



Figura 3. 4 - Elaboração da mistura.

Previamente à realização da mistura, tinham sido preparados os moldes para a colocação da mesma, bem como a necessária mesa vibratória, ilustrada na Figura 3.5. Cada molde é constituído por três secções de dimensão transversal 40mmx40mm e comprimento 160mm. Logo após da conclusão da mistura, esta é colocada em moldes tal como se mostra na Figura 3.6.



Figura 3. 5 - Preparação dos moldes dos provetes.



Figura 3. 6 - Colocação da mistura nos moldes.

Depois da colocação da mistura nos moldes, procedeu-se à vibração destes para assim expulsar as bolhas de ar presentes na mistura, tal como se ilustra na Figura 3.7. Com esta compactação da pasta pretende-se melhorar significativamente as capacidades resistentes do material. O processo de vibração das misturas decorria durante 1 minuto, sensivelmente.

Foi visível a menor viscosidade e aumento da trabalhabilidade das misturas com o aumento da percentagem de plastificante. Um processo semelhante ao das argamassas. Constatou-se também que, as misturas onde o ligante consistia no metacaulino branco MB necessitavam de maior tempo de vibração, uma vez que havia maior dificuldade em expulsar os vazios, resultado de uma pasta mais viscosa.

Depois de vibrados, os provetes eram envolvidos numa película de plástico para evitar a evaporação da fase líquida, permitindo assim que as reações químicas se completassem.



Figura 3. 7 - Vibração das misturas nos moldes.

Todos os provetes, relativamente aos quais foi estudada a influência do plastificante, depois de vibrados, foram guardados numa sala climatizada à temperatura de 20°C e humidade relativa de aproximadamente 70%.

Para o estudo do efeito da temperatura de cura, optou-se por aproximar os componentes de cada mistura da temperatura de cura. Para o efeito, foram colocados os moldes, o metacaulino e a areia, durante aproximadamente durante 5 a 6 horas antes da realização da mistura, nas condições pretendidas de temperatura. Concluída a mistura, foram colocados à temperatura em estudo durante 72h. Posteriormente, foram colocados na sala climatizada, nas condições já enunciadas. Colocaram-se durante as primeiras 72h uma vez que é durante esse período que se regista a quase totalidade dos ganhos das propriedades resistentes do material. Devido a problemas com o termostato da estufa, e também para registar a evolução das temperaturas em cada mistura, recorreu-se a um termopar, ligado a um Data logger, para registar a temperatura de cura. Tal dispositivo está representado na Figura 3.8.



Figura 3. 8 - Data logger usado para o registo da temperatura.

Depois da descofragem dos provetes, foram medidas e registadas a massa e as suas dimensões.

### 3.3 Procedimento de ensaio

É de senso comum que a resistência à compressão corresponde à característica mais relevante dos betões no contexto de uma estrutura de BA. As armaduras desempenham a função de resistir à tração, uma vez que este material sofre de instabilidade quando sujeito a elevados níveis de compressão. Os restantes parâmetros resistentes, por exemplo o módulo de elasticidade, ou a tensão resistente à tração, podem ser estimados utilizando uma de muitas sugestões regulamentares, conhecido que seja o valor da tensão resistente à compressão. No caso dos geopolímeros não são conhecidas propostas equivalentes, pelo menos em termos tão gerais quanto o é para os betões.

Neste trabalho optou-se por dois tipos de ensaio de modo a avaliar as propriedades resistentes à tração e à compressão. Assim, os ensaios realizados para conhecer as propriedades mecânicas das misturas geopoliméricas foram: o ensaio de rotura à tração por flexão, de onde se apurou o valor médio da tensão de rotura à tração por flexão do material  $\sigma_t$ , e o ensaio de rotura à compressão para avaliar o valor médio da tensão de rotura à compressão  $\sigma_c$ . Do primeiro ensaio, não destrutivo, resultam duas “metades” que seriam posteriormente utilizadas no segundo ensaio. Este segundo ensaio tem carácter destrutivo. Todos os ensaios foram realizados entre o 15º e 17º dia, visto que durante este período de cura, se prevê que os provetes tenham atingido praticamente todas as suas propriedades resistentes. O módulo de elasticidade era um parâmetro que inicialmente foi previsto avaliar, mas devido à escassez de extensómetros no laboratório, não foi possível desenvolver o estudo deste parâmetro.



A norma NP EN 196-1 (2006) regulamenta a metodologia para a obtenção de resistências à tração por flexão, e também à compressão, usando provetes prismáticos 4x4x16 cm<sup>3</sup>. Esta norma foi respeitada durante os ensaios realizados.

### 3.3.1 Ensaio de rotura à tração por flexão

O ensaio de rotura à tração por flexão foi realizado com o objetivo de obter a tensão de rotura à tração por flexão dos provetes. Assim, adotou-se o modelo de carga previsto na norma NP EN 12390-5 (2009) que pode ser visualizado na Figura 3.9.

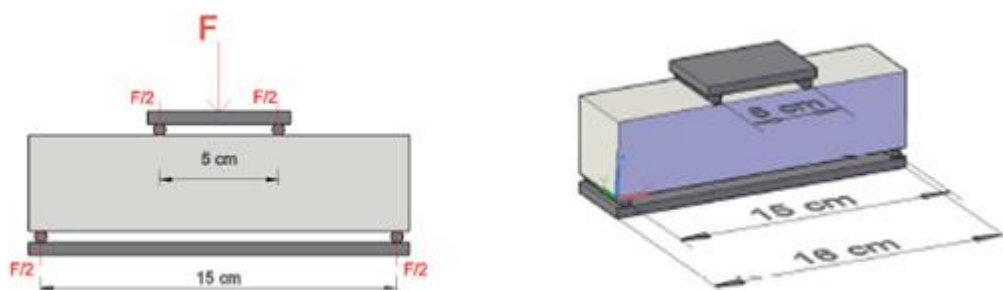


Figura 3. 9 - Modelo de carga segundo a norma NP EN 12390-5.

Neste modelo, os provetes são submetidos a um momento fletor constante entre as cargas  $F/2$  aplicadas na superfície superior, ou seja, no tramo central. Neste caso, como o momento fletor é nulo nas secções transversais correspondentes aos apoios inferiores, a máxima tensão de tração irá ocorrer também no tramo central. O valor máximo atingido em cada ensaio designa-se por valor da tensão de rotura à tração por flexão  $\sigma_t$ . A média dos resultados de um conjunto de provetes, construídos a partir de uma mistura, determina o valor médio correspondente à mistura. Considere-se então um provete de largura  $b$  e altura  $h$ . Assim, considerando uma análise estática, e admitindo uma variação linear das tensões em altura, o valor de  $\sigma_t$  pode ser avaliado por:

$$\sigma_t = \frac{6M}{b \cdot h^2} = F \cdot \frac{L}{2} \cdot \frac{6}{b \cdot h^2} = 3 \cdot \frac{F \cdot L}{b \cdot h^2} \quad (3.1)$$

Em que  $M$  representa o momento de rotura no tramo central, e  $L$  representa a distância entre apoios.

Este ensaio foi realizado no equipamento *Servosis série ME-402* disponível no laboratório. Na Figura 3.10 pode ser visualizado o esquema de ensaio de rotura à tração por flexão de um provete. Quer sob a placa de aço inferior, quer sobre a placa superior, foram colocadas borrachas a separar estas placas e os pratos da prensa de modo a reduzir os possíveis impactos gerados na prensa, ou até, para compensar possíveis excentricidades da ação aplicada.

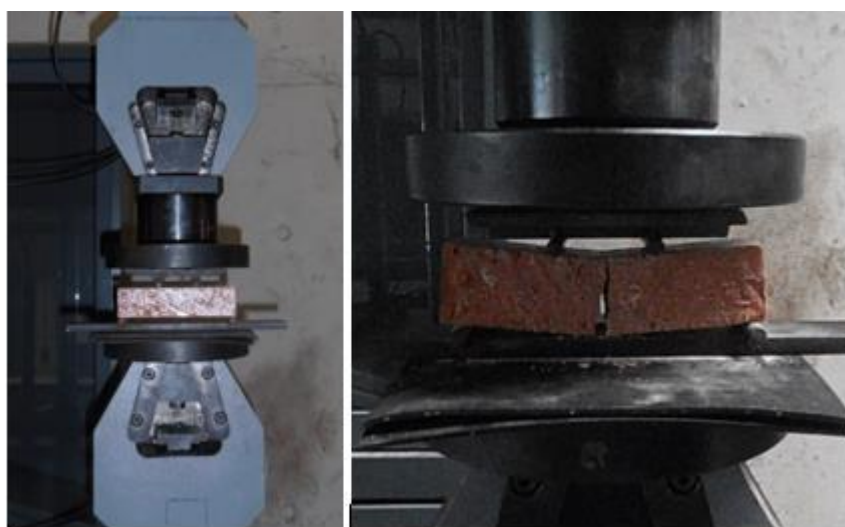


Figura 3. 10 - Provete submetido a um ensaio de rotura à tração por flexão.

Por questões operacionais e de segurança, este ensaio foi realizado com controlo de deformação. Para além disso, interessa referir que se pretende fazer uma análise estática e portanto, para reduzir os efeitos dinâmicos associados ao ensaio, planeou-se o ensaio para demorar pelo menos 3 minutos.

O ensaio teve duas etapas: na primeira etapa, a uma de velocidade 0,06 mm/s, pretendeu-se “encostar” a prensa ao provete, até se atingir aproximadamente 10% da carga de rotura; na segunda, mais lenta, a uma velocidade de 0,006 mm/s pretendeu-se chegar à rotura do provete sempre com o intuito de reduzir os efeitos dinâmicos associados ao ensaio.

De referir que parte substancial da deformação aplicada é absorvida no esmagamento das borrachas. Deste ensaio resulta a já referida rotura do provete e a sua separação em duas “metades” que posteriormente se levariam à rotura através do ensaio de compressão.

### 3.3.2 Ensaio de rotura à compressão

De acordo com a norma NP EN 196-1 (2006), este ensaio é realizado imediatamente a seguir ao ensaio de rotura à tração por flexão, sobre os prismas resultantes. Interessa também referir que o dispositivo utilizado para este ensaio se encontra regulamentado na norma EN ISO 7500-1 (2004). O ensaio encontra-se representado na Figura 3.11. Nesta figura é possível visualizar as borrachas inferiores e superior, cujas funções já foram anteriormente descritas.



Figura 3. 11 - Ensaio de rotura à compressão

A metodologia de ensaio é semelhante ao ensaio anterior: na primeira etapa, de “encosto”, até aproximadamente 10% da carga de rotura, foi programada uma velocidade de 0,1 mm/s; na segunda etapa foi estabelecida uma velocidade de 0,007 mm/s até atingir a rotura por compressão. Uma vez mais, a aplicação desta metodologia tem como objetivo prolongar o ensaio, pelo menos durante 3 minutos, de modo a que sejam reduzidos os efeitos dinâmicos associados ao ensaio.

Assim, o registo da força máxima aplicada ao provete  $F$ , permite calcular o valor da tensão de rotura de compressão de cada provete através de:

$$\sigma_c = \frac{F}{b \cdot h} \quad (3.2)$$

Mais uma vez, o valor médio da mistura é determinado pela média dos valores  $\sigma_c$  apurados.

Relativamente ao modo de rotura do provete, a norma NP EN 12390-3 (2011) classifica-os como satisfatórios se apresentarem um qualquer dos modos de rotura apresentados na Figura 3.12.



Figura 3. 12 - Modos de rotura de compressão satisfatórios segundo a norma NP EN 12390-3.

## 4 RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados, analisados e comentados todos os resultados obtidos através dos ensaios de rotura à tração por flexão e de rotura à compressão descritos e pormenorizados no capítulo 3. Nos ensaios referidos foi possível avaliar a tensão de rotura à tração por flexão e a tensão de rotura à compressão.

Os resultados apresentados encontram-se organizados por percentagem de plastificante inserida nas argamassas e pela temperatura de cura dos provetes. A argamassa sem adição de plastificante será a referência para o estudo da influência do mesmo, e a argamassa realizada à temperatura de cura de 20°C será a referência para o estudo da influência da temperatura de cura nas várias misturas realizadas.

### 4.1 Adição de plastificante

De forma a avaliar a influência da adição de plastificante quando adicionado à massa de geopolímeros, foram realizados dois tipos de ensaios; o ensaio de rotura à tração por flexão e o ensaio de rotura por compressão. Os ensaios serviriam para determinar a tensão de rotura à tração por flexão e a tensão de rotura por compressão, respetivamente. Os provetes e as metodologias dos ensaios foram descritas no capítulo anterior.

#### 4.1.1 Ensaio de rotura à tração por flexão

Neste ponto são apresentados e analisados os valores das tensões de rotura à tração por flexão variando a percentagem de plastificante inserida. No caso dos provetes de referência, também é feita a comparação da resistência dos provetes quando é usado o metacaulino de cor branca ou o de cor castanha.

Tal como foi referido, os provetes são inicialmente submetidos ao ensaio de rotura à tração por flexão. Neste caso particular, os provetes de referência foram construídos a 23 de Março e foram ensaiados após 17 dias de cura na sala climatizada do LEMEC. As roturas ocorreram sempre na zona central dos provetes, i.e. entre pontos de aplicação da ação, tal como esperado, embora um pouco desviadas do seu centro de gravidade, tal como se mostra na Figura 4.1.

---



Figura 4. 1 – Provetes dos ensaios de tração. Provetes referência de metacaulino castanho.

Relativamente aos provetes de referência de metacaulino castanho, são apresentados, na Tabela 4.1 os valores medidos das larguras  $b$  e das alturas  $h$  dos provetes, os valores máximos das forças registadas em cada provete  $F_{\max}$ , bem como os valores das tensões resistentes à tração por flexão  $\sigma_t$ . Os valores médios e os desvios padrões das forças  $F_{\max}$  e das  $\sigma_t$  também são apresentados.

Os valores obtidos para as tensões resistentes à tração encontram-se bastante próximos entre si, se se exceptuar o valor correspondente ao provete nº3, relativamente ao que foi usada a velocidade 0,06 mm/s e portanto os efeitos dinâmicos associados ao ensaio podem introduzir desvios significativos no resultado apurado. Neste contexto, optou-se por excluir este valor da média e do desvio padrão. O valor do coeficiente de variação das tensões de 0,09 significa que os valores obtidos podem ser considerados como bons, conferindo assim confiança aos resultados obtidos. É de destacar o valor médio de  $\sigma_t=5,2\text{MPa}$ , que constitui um valor superior relativamente às argamassas de CPN, tal como era esperado e tinha sido referido no Capítulo 2.

Tabela 4. 1 - Resultados dos ensaios de tração por flexão. Provetes referência de metacaulino castanho.

Provete nº	b(mm); h(mm)	F <sub>max</sub> (kN)	σ <sub>t</sub> (MPa)	Obs
1	40,5; 40,1	2,39	5,51	-
2	40,6; 40,1	2,32	5,33	-
3	40,3; 40,1	2,63	6,10	Erro velocidade
4	41,0; 40,0	2,48	5,67	-
5	40,6; 40,0	1,99	4,59	-
6	40,8; 40,1	2,15	4,92	-
Média	-	2,27	5,20	-
Desvio padrão	-	0,20	0,44	-

Tal como os provetes de metacaulino castanho, também os de metacaulino branco foram construídos no dia 23 de Março e ensaiados após 17 dias de cura na sala referida anteriormente. Na Tabela 4.2 são apresentados os valores correspondentes.

Os valores obtidos para as tensões resistentes à tração por flexão também são equivalentes entre si. Obteve-se um coeficiente de variação das tensões de 0,05 e portanto, pode dizer-se que, os valores obtidos são muito bons, conferindo assim bastante confiança nos resultados obtidos. Neste caso, o valor médio de σ<sub>t</sub> é relativamente inferior ao valor de resistência à tração do metacaulino castanho.

Tabela 4. 2 - Resultados dos ensaios de tração por flexão. Provetes de metacaulino branco.

Provete nº	b(mm); h(mm)	F <sub>max</sub> (kN)	σ <sub>t</sub> (MPa)	Obs
7	40,6; 40,0	2,04	4,71	-
8	41,0; 40,0	2,21	5,05	-
9	40,4; 40,0	2,08	4,82	-

Tabela 4.2 – Resultados dos ensaios de tração por flexão. Provetes de metacaulino branco (continuação).

Provete nº	b(mm); h(mm)	F <sub>max</sub> (kN)	σ <sub>t</sub> (MPa)	Obs
10	40,4; 40,0	1,93	4,47	-
11	40,1; 40,0	2,08	4,86	-
12	40,5; 40,1	2,21	5,09	-
Média	-	2,09	4,83	-
Desvio padrão	-	0,11	0,23	-

Como já referido, serão agora analisados e comentados os resultados devido à influência da adição de plastificante à massa de geopolímeros. Os provetes resultantes da adição de 0,3% de plastificante foram realizados a 25 de Março e ensaiados após 15 dias de cura na sala climatizada. Na Tabela 4.3 são apresentados os valores correspondentes.

Neste caso, obteve-se um coeficiente de variação das tensões de 0,04, o que significa que os valores obtidos são muito bons, conferindo assim bastante confiança nos resultados obtidos. É observável que o valor médio de σ<sub>t</sub> não sofre grande variação quando comparado com o dos provetes de referência.

Tabela 4. 3 - Resultados dos ensaios de tração por flexão. Provetes com 0,3% de plastificante.

Provete nº	b(mm); h(mm)	F <sub>max</sub> (kN)	σ <sub>t</sub> (MPa)	Obs
13	40,1; 40,1	2,33	5,43	-
14	40,3; 40,1	2,31	5,36	-
15	40,5; 40,1	2,21	5,10	-
16	40,4; 40,0	2,43	5,64	-
17	40,1; 40,1	2,20	5,12	-
18	40,4; 40,1	2,30	5,32	-



Tabela 4.3 – Resultados dos ensaios de tração por flexão. Provetes com 0,3% de plastificante (continuação).

Provete nº	b(mm); h(mm)	F <sub>max</sub> (kN)	σ <sub>t</sub> (MPa)	Obs
Média	-	2,30	5,33	-
Desvio padrão	-	0,08	0,20	-

Na continuação do estudo da influência do plastificante, serão agora analisados e comentados os resultados obtidos para a situação de adição de 0,6% de plastificante à sua massa. Estes provetes foram construídos no dia 10 de Abril e ensaiados após 17 dias de cura na sala climatizada. Na Tabela 4.4 são apresentados os valores apurados.

O coeficiente de variação das tensões de 0,04 é, mais uma vez, um valor reduzido que indica que os valores obtidos são muitos bons. Também é observável que o valor médio de σ<sub>t</sub> é equivalente ao da situação de referência.

Tabela 4. 4 - Resultados dos ensaios de tração por flexão. Provetes com 0,6% de plastificante.

Provete nº	b(mm); h(mm)	F <sub>max</sub> (kN)	σ <sub>t</sub> (MPa)	Obs
19	40,3; 40,0	2,25	5,23	-
20	40,5; 40,0	2,21	5,12	-
21	40,8; 40,0	2,35	5,40	-
22	40,5; 40,0	2,45	5,66	-
23	40,5; 40,0	2,19	5,06	-
24	40,6; 40,0	2,23	5,16	-
Média	-	2,28	5,27	-
Desvio padrão	-	0,10	0,22	-

Por último, apresentam-se os resultados relativos ao caso da adição à massa de geopolímeros de 1,2 % de plastificante. Estes provetes foram construídos no dia 14 de Abril e ensaiados após 15 dias de cura na sala climatizada. Na Tabela 4.5 são apresentados os valores apurados.

Analogamente ao provete 3 do primeiro conjunto, também o ensaio relativo ao provete nº29 foi realizado a uma velocidade superior, razão pela qual os correspondentes valores não serão considerados para a média nem para o desvio padrão. Os restantes resultados constituem um conjunto que se pode considerar como bom, uma vez que o coeficiente de variação apurado vale 0,10. É de destacar uma pequena descida do valor médio de  $\sigma_t$  relativamente à situação de referência.

Tabela 4. 5 - Resultados dos ensaios de tração por flexão. Provetes com 1,2% de plastificante.

Provete nº	b(mm); h(mm)	F <sub>max</sub> (kN)	$\sigma_t$ (MPa)	Obs
25	40,2; 40,0	2,11	4,91	-
26	40,1; 40,0	2,09	4,88	-
27	40,3; 40,0	1,81	4,21	-
28	40,0; 40,0	2,21	5,17	-
29	40,0; 40,0	2,57	6,01	Erro velocidade
30	40,1; 40,0	2,38	5,57	-
Média	-	2,12	4,95	-
Desvio padrão	-	0,21	0,50	-

Para concluir a análise da influência do plastificante em geopolímeros, é apresentado um resumo dos resultados já enunciados anteriormente, sob a forma de gráfico, na Figura 4.2. Os pontos a castanho representam os valores das várias misturas realizadas com o metacaulino castanho, enquanto que o ponto branco MB representa a mistura realizada com o metacaulino branco. Numa fase inicial, até percentagens de plastificante de 0,6%, não são perceptíveis variações significativas deste parâmetro resistente. No entanto, é possível observar que existe uma tendência de quebra em relação à resistência à tração por flexão com a adição de 1,2% de plastificante. Também se verifica que as argamassas constituídas por metacaulino de cor castanha apresentam uma resistência ligeiramente superior do parâmetro em estudo. Face aos

resultados evidenciados, conclui-se que a presença de plastificante em geopolímeros não altera os resultados da resistência à tração por flexão para doses reduzidas, mas é desfavorável à resistência à tração para doses mais elevadas.

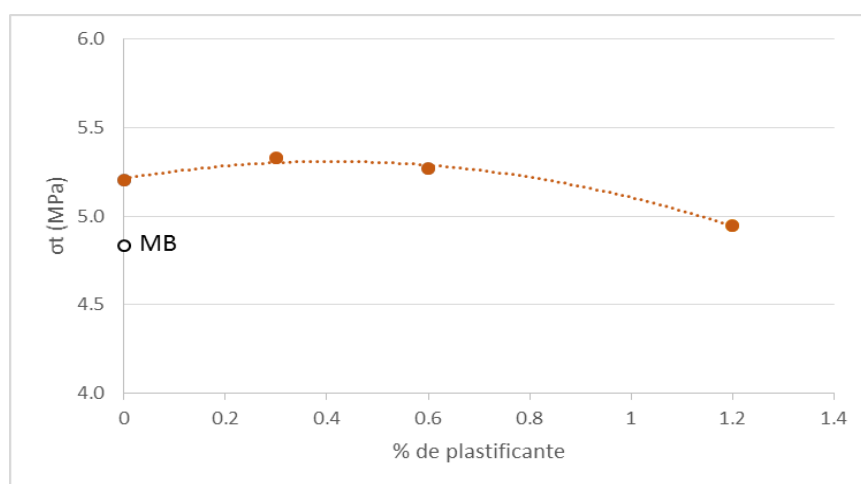


Figura 4. 2 – Influência da adição de plastificante na resistência à tração por flexão.

#### 4.1.2 Ensaio de rotura à compressão

Neste ponto são apresentados e analisados os valores das tensões de rotura à compressão variando a percentagem de plastificante inserida. No caso dos provetes de referência, também é feita a comparação da resistência dos provetes quando é usado o metacaulino de cor branca ou o de cor castanha.

Do resultado do ensaio anterior, são originárias duas metades de cada provete, que serão ensaiadas. As condições e tempo de cura dos provetes são as mesmas já enunciadas no subcapítulo anterior, uma vez que o ensaio de rotura à compressão realiza-se com as metades obtidas de cada provete resultante do ensaio de rotura à tração por flexão. Assim, para cada mistura realizada são realizados 12 ensaios de rotura à compressão. Os modos de rotura foram considerados satisfatórios, uma vez que, como ilustra a Figura 4.3, cumpriram o modo de rotura desejável segundo a norma referida no Capítulo 3.



Figura 4. 3 – Modos de rotura atingidos pelos provetes após o ensaio de rotura à compressão.

Relativamente aos provetes de referência de metacaulino castanho, são apresentados, na Tabela 4.6 são apresentados os valores medidos e os valores médios e os desvios padrões apurados. O valor do coeficiente de variação das tensões de 0,02 significa que os valores obtidos podem ser considerados como muito bons, conferindo assim grande confiança nos resultados obtidos. É de destacar o valor médio de  $\sigma_c=33,9\text{MPa}$ , que constitui um valor superior relativamente às argamassas de CPN, tal como era esperado e tinha sido referido no Capítulo 2.

Tabela 4. 6 - Resultados dos ensaios de compressão. Provetes referência de metacaulino castanho.

Provete nº	b(mm); h(mm)	$F_{\max}$ (kN)	$\sigma_c$ (MPa)	Obs
1	40,5; 40,1	55,5	34,2	-
2	40,6; 40,1	54,6	33,6	-
3	40,3; 40,1	56,0	34,7	-
4	41,0; 40,0	55,3	33,7	-
5	40,6; 40,0	53,9	33,1	-
6	40,8; 40,1	56,2	34,4	-
Média	-	55,2	33,9	-
Desvio padrão	-	0,88	0,57	-

Na Tabela 4.7 são apresentados os valores correspondentes aos provetes constituídos por metacaulino branco. O coeficiente de variação das tensões de 0,03 é um valor reduzido, podendo assim afirmar-se dizer-se que os valores obtidos são muitos bons. Neste caso, o valor médio de  $\sigma_c$  é relativamente superior ao valor de resistência à compressão do metacaulino castanho.

Tabela 4. 7 - Resultados dos ensaios de compressão. Provetes de metacaulino branco.

Proвете n°	b(mm); h(mm)	F <sub>max</sub> (kN)	$\sigma_c$ (MPa)	Obs
7	40,6; 40,0	61,0	37,5	-
8	41,0; 40,0	58,7	35,8	-
9	40,4; 40,0	58,0	35,9	-
10	40,4; 40,0	54,7	33,8	-
11	40,1; 40,0	57,8	36,0	-
12	40,5; 40,1	57,5	35,4	-
Média	-	58,0	35,7	-
Desvio padrão	-	2,03	1,19	-

Serão agora analisados e comentados os resultados obtidos devido à influência da adição de plastificante à massa de geopolímeros. Na Tabela 4.8 são apresentados os valores correspondentes. Neste caso, obteve-se um coeficiente de variação das tensões de 0,04, um valor reduzido. É perceptível que o valor médio de  $\sigma_c$  não sofre grande variação quando comparado com o dos provetes de referência.

Tabela 4. 8 - Resultados dos ensaios de compressão. Provetes com 0,3% de plastificante.

Provete nº	b(mm); h(mm)	F <sub>max</sub> (kN)	σ <sub>c</sub> (MPa)	Obs
13	40,1; 40,1	53,1	33,0	-
14	40,3; 40,1	51,2	31,7	-
15	40,5; 40,1	50,0	30,8	-
16	40,4; 40,0	55,1	34,1	-
17	40,1; 40,1	53,6	33,4	-
18	40,4; 40,1	50,3	31,1	-
Média	-	52,2	32,4	-
Desvio padrão	-	2,03	1,34	-

Em continuação do estudo, serão agora analisados e comentados os resultados obtidos para a situação de adição de 0,6% de plastificante à sua massa. Na Tabela 4.9 são apresentados os valores apurados. O coeficiente de variação das tensões de 0,02 é, mais uma vez, um valor reduzido. Destaca-se uma quebra de resistência à compressão, uma vez que o valor médio de σ<sub>c</sub> é inferior ao da situação de referência.

Tabela 4. 9 - Resultados dos ensaios de compressão. Provetes com 0,6% de plastificante

Provete nº	b(mm); h(mm)	F <sub>max</sub> (kN)	σ <sub>c</sub> (MPa)	Obs
19	40,3; 40,0	44,4	27,5	-
20	40,5; 40,0	45,4	28,1	-
21	40,8; 40,0	47,1	28,8	-
22	40,5; 40,0	44,9	27,7	-
23	40,5; 40,0	46,5	28,7	-
24	40,6; 40,0	46,3	28,6	-

Tabela 4.9 - Resultados dos ensaios de compressão. Provete com 0,6% de plastificante (continuação)

Provete nº	b(mm); h(mm)	F <sub>max</sub> (kN)	σ <sub>c</sub> (MPa)	Obs
Média	-	45,8	28,2	-
Desvio padrão	-	1,04	0,57	-

A última análise será o caso da adição à massa de geopolímeros de 1,2 % de plastificante. Na Tabela 4.10 são apresentados os valores apurados. O coeficiente de variação das tensões de 0,12 é um valor relativamente alto que indica que os valores obtidos são razoáveis. Observa-se que o valor médio de σ<sub>c</sub> é superior à situação anterior, mas ainda assim, inferior à situação de referência.

Tabela 4. 10 - Resultados dos ensaios de compressão. Provete com 1,2% de plastificante

Provete nº	b(mm); h(mm)	F <sub>max</sub> (kN)	σ <sub>c</sub> (MPa)	Obs
25	40,2; 40,0	47,3	29,4	-
26	40,1; 40,0	44,8	27,9	-
27	40,3; 40,0	43,4	26,9	-
28	40,0; 40,0	56,9	35,5	-
29	40,0; 40,0	54,1	33,8	-
30	40,1; 40,0	56,2	35,0	-
Média	-	50,4	31,4	-
Desvio padrão	-	6,00	3,80	-

Como resumo e conclusão do estudo realizado, é apresentado um gráfico, na Figura 4.4, com os valores apurados anteriormente. Os pontos a castanho representam os valores das várias misturas realizadas com o metacaulino castanho, enquanto que o ponto branco MB representa a mistura realizada com o metacaulino branco. É perceptível uma tendência de quebra em

relação à resistência à compressão, atingindo o menor valor na adição de 0,6% de plastificante. Uma vez que a confiança nos resultados relativos a adição de 1,2% são apenas satisfatórios, não se pode afirmar com absoluta certeza que existe um ganho tão considerável de resistência quando se adiciona 1,2% de plastificante relativamente a adição de 0,6%. Também se verifica que as misturas constituídas por metacaulino de cor branca apresentam uma resistência superior do parâmetro em estudo. Face aos resultados evidenciados, conclui-se que a presença de plastificante em geopolímeros não é favorável à resistência à compressão.

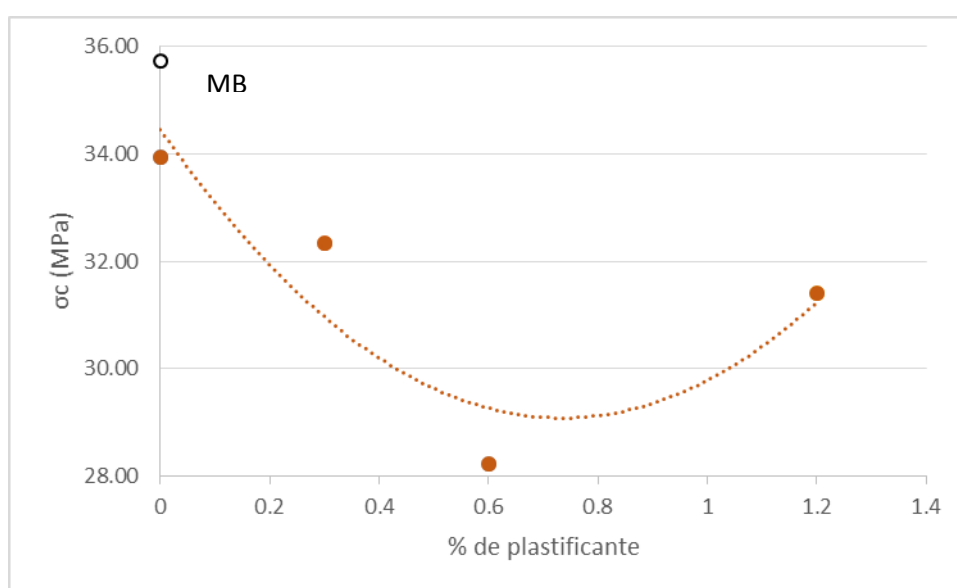


Figura 4. 4 - Influência da adição de plastificante na resistência à compressão.

## 4.2 Temperatura de cura

Tal como no ponto anterior, a avaliação da influência da temperatura de cura foi realizada com base nos dois tipos de ensaios referidos; o ensaio de rotura à tração por flexão e o ensaio de rotura por compressão, de modo a determinar a tensão de rotura à tração por flexão e a tensão de rotura por compressão, respetivamente. Os provetes e as metodologias dos ensaios foram descritas no Capítulo 3.

Relativamente à temperatura de cura, e tal como é visível na Figura 4.5, importa destacar as diferenças de cor e textura dos provetes curados a temperaturas mais elevadas (30, 40 e 50°C, à esquerda), e curados a temperaturas mais reduzidas (10, 15 e 20°C, à direita). Tal facto poderá ser consequência da evaporação de parte da fase líquida durante o processo de cura,



mas esta análise será comentada e detalhada no subcapítulo referente aos resultados associados às diferentes temperaturas de cura em estudo.



Figura 4. 5 – Aspeto dos provetes realizados a diferentes temperaturas de cura.

Outro facto relevante prende-se com a dificuldade na fase da mistura, aquando das misturas realizadas às temperaturas de 40 e 50°C. Esta dificuldade resultou do facto da colocação prévia da areia, do metacaulino e dos moldes às temperaturas em estudo, aproximadamente 5 a 6 horas antes da sua realização. Devido à colocação desses elementos a temperatura mais elevada, a mistura perdia alguma fase líquida durante a sua realização, tornando assim a mistura menos fluida e mais viscosa. No caso da realização da mistura de metacaulino branco, realizado a 50°C, não foi sequer possível juntar todo o ligante pretendido, uma vez que a mistura ficou muito viscosa, quase não trabalhável. Juntou-se aproximadamente 742g de ligante, menos 8g relativamente ao pretendido.

#### 4.2.1 Ensaio de rotura à tração por flexão

Neste ponto são apresentados e analisados os valores das tensões de rotura à tração por flexão variando a temperatura de cura dos provetes. No caso dos provetes de referência, a comparação entre a resistência dos provetes quando é usado o metacaulino de cor branca, ou o de cor castanha, já foi realizada quando se estudou a influência da adição do plastificante. Esses provetes foram realizados e mantidos à temperatura de cura de 20°C.

Serão agora analisados e comentados os resultados devido à influência da temperatura de cura dos provetes. Os provetes resultantes da temperatura de cura de 10°C foram realizados a 29 de Junho e ensaiados após 17 dias de cura. Na Tabela 4.11 são apresentados os valores obtidos, juntamente com os valores médios e os desvios padrões das forças das tensões.

Neste caso, tendo em conta o coeficiente de variação das tensões de 0,03, significa que os valores obtidos são muitos bons. Também se verifica que o valor médio de  $\sigma_t$  não sofre grande variação quando comparado com o dos provetes de referência.

Tabela 4. 11 - Resultados dos ensaios de tração por flexão. Provetes submetidos à temperatura de cura de 10°C.

Provete nº	b(mm); h(mm)	F <sub>max</sub> (kN)	$\sigma_t$ (MPa)	Obs
31	40,2; 40,0	2,24	5,23	-
32	40,1; 40,0	2,15	5,03	-
33	40,0; 40,0	2,11	4,94	-
34	40,2; 40,0	2,26	5,26	-
35	40,2; 40,0	2,17	5,07	-
36	40,4; 40,0	2,29	5,32	-
Média	-	2,20	5,14	-
Desvio padrão	-	0,07	0,15	-

Na Figura 4.6 é possível observar o gráfico da temperatura registada nos primeiros dias de cura dos provetes apresentados. Neste registo é possível verificar que a temperatura média a que os provetes estiveram expostos nas primeiras 56 horas foi de 10,4 °C, muito próximo dos 10 °C pretendidos, programados na câmara climática do LEMEC. Após a perturbação inicial correspondente à abertura da porta, a oscilação máxima da temperatura foi de  $\pm 1$  °C.

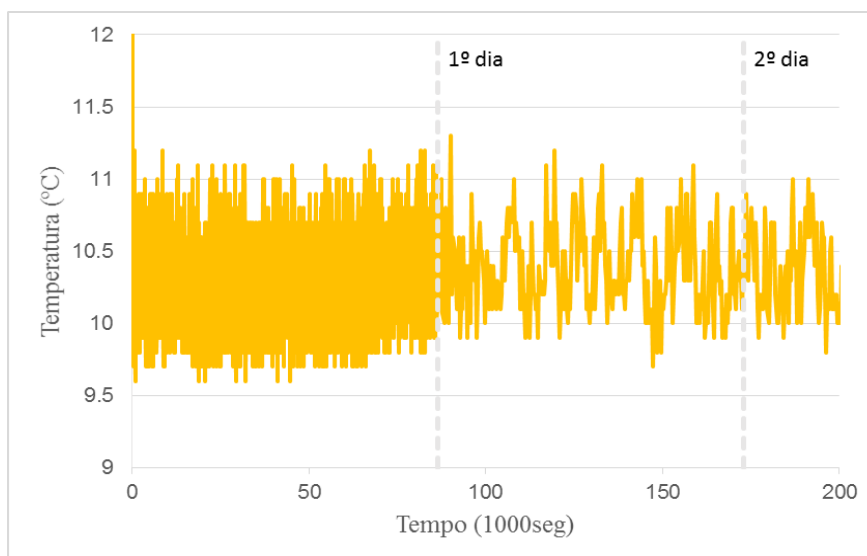


Figura 4. 6 – Registo da temperatura de cura. Provetes submetidos a uma temperatura média de cura de 10°C.

Na continuação do estudo da influência da temperatura de cura, serão agora analisados e comentados os resultados obtidos para a situação de temperatura de cura de 15°C. Estes provetes foram construídos no dia 19 de Junho e ensaiados após 15 dias de cura. Na Tabela 4.12 são apresentados os valores apurados.

Tal como vem sucedendo, o coeficiente de variação das tensões de 0,05 é um valor reduzido. Também é observável que o valor médio de  $\sigma_t$  é equivalente ao da situação de referência. Não foi possível registar a evolução da temperatura, uma vez que não se encontrava disponível o equipamento necessário, mas pode garantir-se que tal temperatura foi programada, e em princípio cumprida com um reduzido erro, uma vez que foi usada a mesma câmara climática presente no LEMEC.

Tabela 4. 12- Resultados dos ensaios de tração por flexão. Provete submetidos à temperatura de cura de 15°C.

Provete nº	b(mm); h(mm)	F <sub>max</sub> (kN)	σ <sub>t</sub> (MPa)	Obs
37	40,2; 40,0	2,20	5,13	-
38	40,2; 40,0	1,99	4,64	-
39	40,1; 40,0	2,12	4,95	-
40	40,1; 40,0	2,30	5,38	-
41	40,1; 40,0	2,24	5,23	-
42	40,2; 40,0	2,18	5,08	-
Média	-	2,17	5,09	-
Desvio padrão	-	0,11	0,25	-

Serão agora analisados e comentados os resultados obtidos para a situação de temperatura de cura de 30°C. Estes provetes foram construídos no dia 20 de Maio e ensaiados após 15 dias de cura. Na Tabela 4.13 são apresentados os valores apurados.

O coeficiente de variação das tensões de 0,11 é um valor relativamente alto que indica que os valores obtidos podem ser considerados como razoáveis. É observável uma tendência de quebra do valor médio de σ<sub>t</sub>, quando comparado com o dos provetes de referência.

Tabela 4. 13 - Resultados dos ensaios de tração por flexão. Provete submetidos à temperatura de cura de 30°C.

Provete nº	b(mm); h(mm)	F <sub>max</sub> (kN)	σ <sub>t</sub> (MPa)	Obs
43	39,9; 40,1	1,87	4,39	-
44	40,1; 40,0	1,47	3,43	-
45	40,3; 40,0	1,92	4,46	-
46	40,8; 40,1	2,12	4,86	-

Tabela 4.13 – Resultados dos ensaio de tração por flexão. Provetes submetidos à temperatura de cura de 30°C (continuação).

Provete nº	b(mm); h(mm)	F <sub>max</sub> (kN)	σ <sub>t</sub> (MPa)	Obs
47	40,2; 40,1	1,84	4,27	-
48	40,1; 40,1	1,96	4,57	-
Média	-	1,86	4,33	-
Desvio padrão	-	0,22	0,48	-

Na Figura 4.7 é possível observar o gráfico da temperatura registada nos primeiros dias de cura dos provetes anteriormente enunciados. Neste registo é possível constatar que a temperatura média a que os provetes estiveram expostos nas primeiras 56 horas foi de 30,8 °C, muito próximo dos 30 °C pretendidos, programados na estufa do LEMEC. A oscilação máxima da temperatura foi de ±3,2 °C.

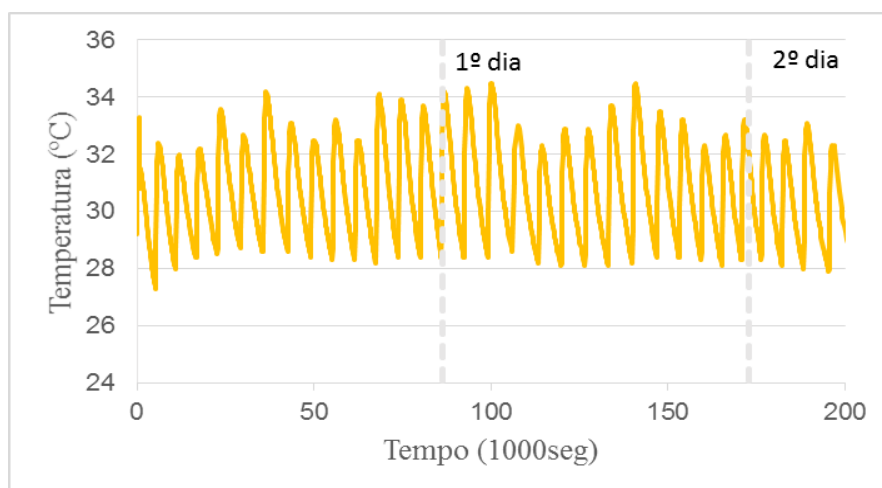


Figura 4. 7 - Registo da temperatura de cura. Provetes submetidos a uma temperatura média de cura de 30°C.

Para a situação de temperatura de cura de 40°C, os provetes foram construídos no dia 26 de Maio e ensaiados após 17 dias de cura. Na Tabela 4.14 são apresentados os valores apurados.

O coeficiente de variação das tensões de 0,05 apurado é um valor reduzido. Também é observável que o valor médio de  $\sigma_t$  regista uma quebra significativa relativamente ao valor da situação de referência.

Tabela 4. 14 - Resultados dos ensaios de tração por flexão. Provetes submetidos à temperatura de cura de 40°C.

Proвете nº	b(mm); h(mm)	F <sub>max</sub> (kN)	$\sigma_t$ (MPa)	Obs
49	40,1; 40,1	1,23	2,87	-
50	40,0; 40,0	1,11	2,60	-
51	40,2; 40,1	1,17	2,72	-
52	40,3; 40,0	1,22	2,84	-
53	39,5; 40,0	1,22	2,89	-
54	40,1; 40,0	1,13	2,64	-
Média	-	1,18	2,76	-
Desvio padrão	-	0,05	0,12	-

Na Figura 4.8 é possível observar a temperatura registada nos primeiros dias de cura dos provetes descritos. Neste caso, é possível verificar alguma oscilação nas primeiras 6 horas. Globalmente, a temperatura média a que os provetes estiveram expostos nas primeiras 56 horas foi de 40,2 °C, muito próximo dos 40 °C pretendidos, programados na estufa do LEMEC. A oscilação máxima da temperatura verificada nos ciclos curtos foi de  $\pm 2,3$  °C.

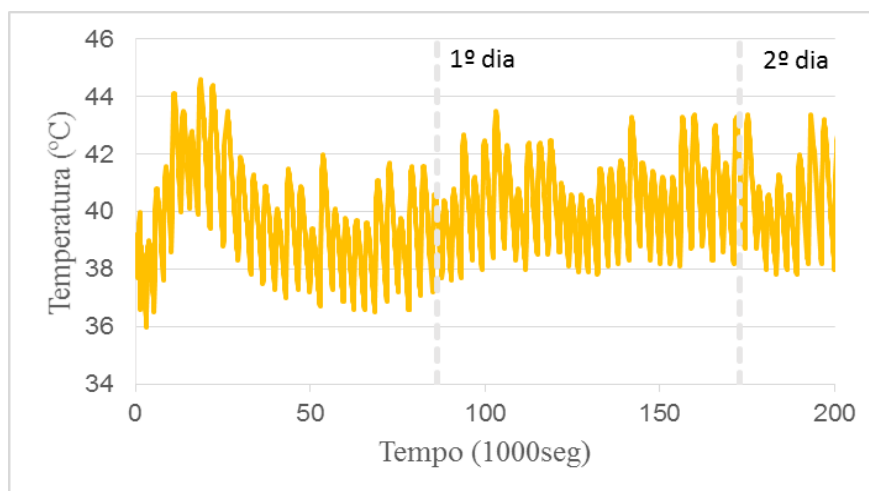


Figura 4. 8 - Registo da temperatura de cura. Provetes submetidos a uma temperatura média de cura de 40°C.

Por último, o caso da temperatura de cura dos provetes a 50°C. Este valor não foi integralmente conseguido devido à dificuldade de controlo da estufa a este nível de temperaturas. Estes provetes foram construídos no dia 2 de Julho e ensaiados após 15 dias de cura. De modo a tentar perceber a quebra de resistência à tração por flexão registada no caso anterior, optou-se por realizar duas misturas de metacaulino à temperatura já referida: uma de metacaulino castanho e outra de metacaulino branco. Na Tabela 4.15 são apresentados os valores apurados relativamente à mistura de metacaulino castanho.

O coeficiente de variação das tensões de 0,04 é um valor reduzido. Tal como na situação anterior, também é observável que o valor médio de  $\sigma_t$  regista uma quebra significativa relativamente ao valor da situação de referência.

Tabela 4. 15 - Resultados dos ensaios de tração por flexão. Provetes de metacaulino castanho submetidos à temperatura de cura de 50°C.

Proвете n°	b(mm); h(mm)	F <sub>max</sub> (kN)	$\sigma_t$ (MPa)	Obs
55	40,1; 40,0	1,19	2,78	-
56	40,0; 40,0	1,20	2,81	-
57	40,1; 40,0	1,19	2,78	-

Tabela 4.15 – Resultados dos ensaios de tração por flexão. Provete de metacaulino castanho submetidos à temperatura de cura de 50°C (continuação).

Provete nº	b(mm); h(mm)	F <sub>max</sub> (kN)	σ <sub>t</sub> (MPa)	Obs
58	40,5; 40,0	1,25	2,89	-
59	40,3; 40,0	1,09	2,53	-
60	40,7; 40,0	1,23	2,83	-
Média	-	1,19	2,77	-
Desvio padrão	-	0,06	0,12	-

Tal como os provetes de metacaulino castanho, também os de metacaulino branco foram construídos no dia 2 de Julho e ensaiados após 15 dias de cura. Na Tabela 4.16 são apresentados os valores correspondentes, cujo coeficiente de variação das tensões apurado vale 0,04. Neste caso, também o valor médio de σ<sub>t</sub> é muito inferior ao valor de resistência à tração na situação de referência.

Tabela 4. 16 - Resultados dos ensaios de tração por flexão. Provete de metacaulino branco submetidos à temperatura de cura de 50°C.

Provete nº	b(mm); h(mm)	F <sub>max</sub> (kN)	σ <sub>t</sub> (MPa)	Obs
61	40,4; 40,0	1,23	2,85	-
62	39,7; 40,0	1,29	3,04	-
63	40,0; 40,0	1,28	3,00	-
64	40,1; 40,0	1,38	3,22	-
65	40,6; 40,0	1,30	3,00	-
66	40,2; 40,0	1,27	2,95	-
Média	-	1,29	3,01	-
Desvio padrão	-	0,05	0,12	-



Na Figura 4.9 é possível observar o gráfico da temperatura registada nos primeiros dias de cura das duas situações referidas. Também neste caso é possível verificar alguma perturbação inicial, dependente da abertura da porta da estufa para retirar os itens da mistura, e para colocação posterior dos provetes após mistura. Contudo, é possível verificar que a temperatura média a que os provetes estiveram expostos nas primeiras 56 horas foi de 52,5 °C, ou seja, a cerca de 5% da temperatura de 50 °C pretendida. A oscilação máxima da temperatura foi de  $\pm 3,5$  °C.

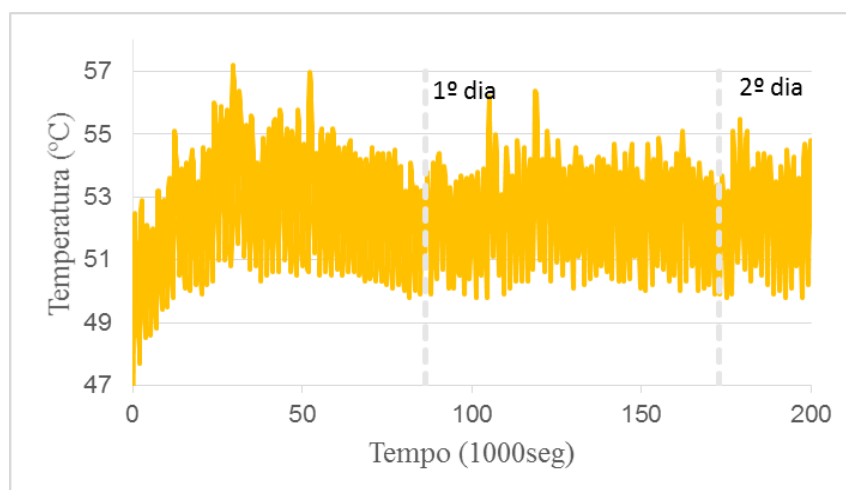


Figura 4. 9 - Registo da temperatura de cura. Provetes submetidos a uma temperatura média de cura de 50°C.

Para concluir a análise da influência da temperatura de cura em geopolímeros, na evolução da tensão resistente à tração por flexão, é apresentado um resumo dos resultados, já enunciados anteriormente, sob a forma de gráfico, na Figura 4.10. Os pontos a castanho representam os valores das várias misturas realizadas com o metacaulino castanho, enquanto que os pontos brancos MB representam as misturas realizadas com o metacaulino branco. Pode concluir-se que, numa fase inicial, até temperaturas de cura de 20°C, não são perceptíveis variações significativas deste parâmetro resistente. Após esta temperatura, é possível observar que existe uma tendência de quebra significativa, em relação à resistência à temperatura de cura a 30°C. A resistência à tração por flexão nas temperaturas de cura a 40°C e 50°C exibe uma quebra próxima dos 50%. Também se verifica que as misturas constituídas por metacaulino de cor branca acompanham as tendências reveladas pelas misturas de metacaulino castanho,

relativamente ao parâmetro em estudo; no caso da temperatura a 50 °C, a quebra é de quase 30% relativamente à temperatura de 20 °C.

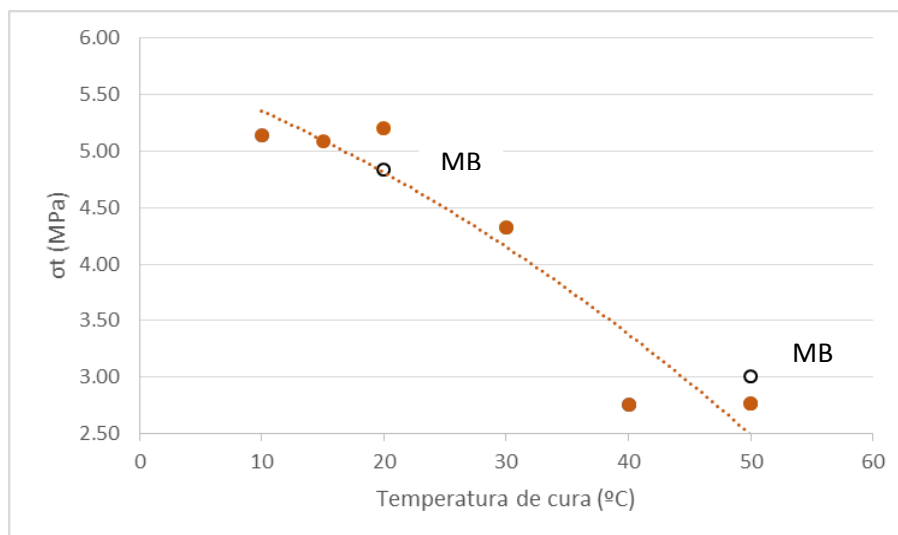


Figura 4. 10 - Influência da temperatura de cura na resistência à tração por flexão.

#### 4.2.2 Ensaio de rotura à compressão

Neste ponto são apresentados e analisados os valores das tensões de rotura à compressão variando a temperatura de cura dos provetes. Tal como já referido, a análise da resistência à compressão dos provetes submetidos à temperatura de cura de 20°C já foi apresentada aquando do estudo do efeito da adição do plastificante. As condições e tempo de cura dos provetes são as mesmas já enunciadas no subcapítulo anterior, uma vez que o ensaio de rotura à compressão realiza-se com as “metades” obtidas de cada provete resultante do ensaio de rotura à tração por flexão.

Começa-se por analisar e comentar os resultados obtidos devido à influência da temperatura de cura a 10°C dos provetes. Na Tabela 4.17 são apresentados os valores medidos e os valores médios e os desvios padrões apurados. O coeficiente de variação das tensões de 0,05 é baixo, o que significa que os valores obtidos são muitos bons e o valor médio de  $\sigma_c$  não sofre grande variação quando comparado com o dos provetes de referência.

Tabela 4. 17 - Resultados dos ensaios à compressão. Provete submetido à temperatura de cura de 10°C.

Provete nº	b(mm); h(mm)	F <sub>max</sub> (kN)	σ <sub>c</sub> (MPa)	Obs
31	40,2; 40,0	52,5	32,7	-
32	40,1; 40,0	49,9	31,1	-
33	40,0; 40,0	50,6	31,6	-
34	40,2; 40,0	53,5	33,2	-
35	40,2; 40,0	57,1	35,5	-
36	40,4; 40,0	56,7	35,1	-
Média	-	53,4	33,2	-
Desvio padrão	-	3,01	1,80	-

Relativamente à situação de temperatura de cura de 15°C, são apresentados, na Tabela 4.18, os valores apurados. O coeficiente de variação das tensões resistentes é de 0,05, um valor reduzido, e também é observável que o valor médio de σ<sub>c</sub> é equivalente ao da situação de referência.

Tabela 4. 18 - Resultados dos ensaios à compressão. Provete submetido à temperatura de cura de 15°C.

Provete nº	b(mm); h(mm)	F <sub>max</sub> (kN)	σ <sub>c</sub> (MPa)	Obs
37	40,2; 40,0	52,6	32,7	-
38	40,2; 40,0	49,4	30,7	-
39	40,1; 40,0	51,4	32,0	-
40	40,1; 40,0	51,8	32,3	-
41	40,1; 40,0	46,2	28,8	-

Tabela 4.18 – Resultados dos ensaios à compressão. Provete submetido à temperatura de cura de 15°C (continuação).

Provete nº	b(mm); h(mm)	F <sub>max</sub> (kN)	σ <sub>c</sub> (MPa)	Obs
42	40,2; 40,0	51,5	32,0	-
Média	-	50,5	31,4	-
Desvio padrão	-	2,34	1,45	-

Seguiu-se o estudo da influência da temperatura de cura de 30°C. Na Tabela 4.19 são apresentados os valores apurados. O coeficiente de variação das tensões de 0,03, é um valor muito reduzido. É observável uma tendência de quebra do valor médio de σ<sub>c</sub>, quando comparado com o dos provetes de referência.

Tabela 4. 19 - Resultados dos ensaios à compressão. Provete submetido à temperatura de cura de 30°C.

Provete nº	b(mm); h(mm)	F <sub>max</sub> (kN)	σ <sub>c</sub> (MPa)	Obs
43	39,9; 40,1	41,6	26,1	-
44	40,1; 40,0	42,6	26,5	-
45	40,3; 40,0	44,6	27,7	-
46	40,8; 40,1	42,9	26,2	-
47	40,2; 40,1	43,2	26,8	-
48	40,1; 40,1	41,2	25,6	-
Média	-	42,7	26,5	-
Desvio padrão	-	1,23	0,71	-

Na Tabela 4.20 são apresentados os valores apurados para a situação de temperatura de cura de 40°C. O coeficiente de variação das tensões de 0,02 é um valor muito reduzido. Também é observável que o valor médio de  $\sigma_c$  regista uma quebra significativa relativamente ao valor da situação de referência.

Tabela 4. 20 - Resultados dos ensaios à compressão. Provetes submetidos à temperatura de cura de 40°C.

Proвете n°	b(mm); h(mm)	F <sub>max</sub> (kN)	$\sigma_c$ (MPa)	Obs
49	40,1; 40,1	21,6	13,4	-
50	40,0; 40,0	20,4	12,7	-
51	40,2; 40,1	20,3	12,6	-
52	40,3; 40,0	20,8	12,9	-
53	39,5; 40,0	20,0	12,7	-
54	40,1; 40,0	20,9	13,0	-
Média	-	20,7	12,9	-
Desvio padrão	-	0,53	0,30	-

Por último, o caso da temperatura de cura dos provetes a 50°C. Na Tabela 4.21 são apresentados os valores apurados relativamente à mistura de metacaulino castanho. O coeficiente de variação das tensões vale 0,03; um valor muito reduzido. Acentuou-se a quebra da resistência à compressão, já revelada na situação anterior.

Tabela 4. 21 - Resultados dos ensaios à compressão. Provetes de metacaulino castanho submetidos à temperatura de cura de 50°C.

Proвете n°	b(mm); h(mm)	F <sub>max</sub> (kN)	$\sigma_c$ (MPa)	Obs
55	40,1; 40,0	18,7	11,7	-
56	40,0; 40,0	17,6	11,0	-
57	40,1; 40,0	18,1	11,3	-

Tabela 4.21 – Resultados dos ensaios à compressão. Provete de metacaulino castanho submetidos à temperatura de cura de 50°C (continuação).

Provete nº	b(mm); h(mm)	F <sub>max</sub> (kN)	σ <sub>c</sub> (MPa)	Obs
58	40,5; 40,0	18,0	11,1	-
59	40,3; 40,0	19,5	12,1	-
60	40,7; 40,0	18,5	11,4	-
Média	-	18,4	11,4	-
Desvio padrão	-	0,64	0,39	-

Na Tabela 4.22 são apresentados os valores apurados relativamente à argamassa de metacaulino branco. Aqui, o coeficiente de variação das tensões vale 0,06, ligeiramente superior ao habitual. Confirmou-se a tendência de quebra da resistência à compressão já revelada nas situações anteriores.

Tabela 4. 22 - Resultados dos ensaios à compressão. Provete de metacaulino branco submetidos à temperatura de cura de 50°C.

Provete nº	b(mm); h(mm)	F <sub>max</sub> (kN)	σ <sub>c</sub> (MPa)	Obs
61	40,4; 40,0	23,9	14,8	-
62	39,7; 40,0	23,7	14,9	-
63	40,0; 40,0	25,4	15,9	-
64	40,1; 40,0	24,1	15,0	-
65	40,6; 40,0	22,0	13,5	-
66	40,2; 40,0	22,5	14,0	-
Média	-	23,6	14,7	-
Desvio padrão	-	1,21	0,82	-

Na Figura 4.11 é apresentado um resumo dos valores apurados para a resistência à compressão das várias misturas realizadas. Este gráfico é muito semelhante ao apurado no caso das tensões resistentes de tração por flexão, ou seja, numa fase inicial, até temperaturas de cura de 20°C não são perceptíveis variações significativas deste parâmetro resistente. No entanto, é possível observar que existe uma tendência de quebra em relação à resistência à compressão, a partir da temperatura de cura a 30°C, existindo mesmo uma quebra brusca da resistência à compressão nas temperaturas de cura a 40°C e 52,5°C. Também se verifica que as misturas constituídas por metacaulino de cor branca acompanham as tendências reveladas pelas misturas de metacaulino castanho, relativamente ao parâmetro em estudo. Deste estudo fica evidenciado que misturas realizadas a temperaturas de cura superiores a 20°C. As perdas podem atingir valores na ordem dos 66%, o que é muito significativo.

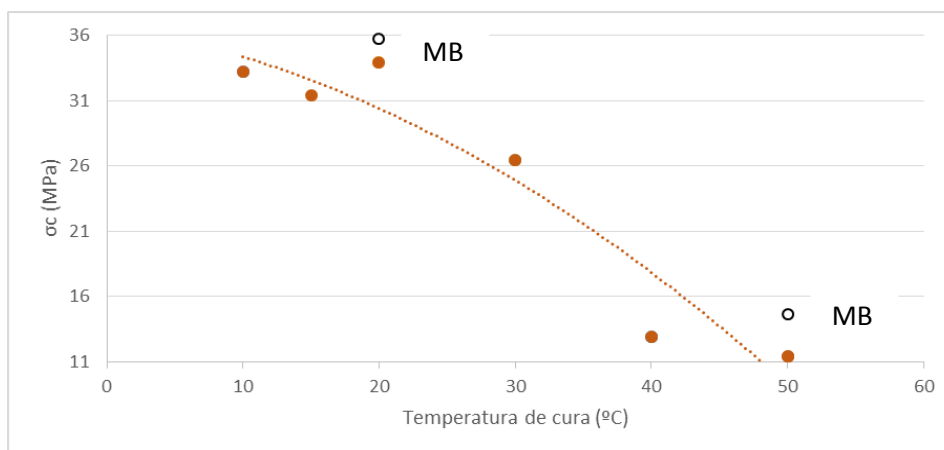


Figura 4. 11 - Influência da temperatura de cura na resistência à compressão.

### 4.3 Confrontação dos resultados obtidos com estudos já realizados

Pretende-se neste ponto efetuar uma análise e uma comparação dos resultados obtidos relativamente a outros que foram encontrados na bibliografia existente, quer para a influência do plastificante, quer para a influência da temperatura de cura de betões geopoliméricos.

Os resultados obtidos neste trabalho experimental, devido à influência do plastificante, são de difícil comparação devido à pouca bibliografia existente relativamente ao estudo deste adjuvante quando adicionado à massa dos geopolímeros. Tal como Favier et al (2014) afirmaram, foi perceptível a pouca influência do plastificante nestas misturas. Ainda assim, foi notória, mesmo que pequena, a tendência de perda de resistência à tração por flexão e à compressão quando adicionadas as maiores doses. As fracas interações entre as partículas do

metacaulino justificaram a inoperância do plastificante em geopolímeros. Para doses mais reduzidas, ou seja, para doses inferiores a 0,3% da massa do ligante, não foram observadas alterações a salientar em termos das capacidades resistentes dos provetes.

Relativamente à influência da temperatura de cura, os resultados agora apurados contrariam a bibliografia existente. No Capítulo 2 foi mencionado que a temperatura de cura ótima para betões geopoliméricos ronda 60°C. Apesar de tal temperatura não ter sido estudada, foi contudo notória a perda parcial de resistência para temperaturas de cura de 30°C. Para temperaturas de cura de 40 e 50°C, a redução das capacidades resistentes foi muito significativa.

Ainda assim, impõe-se uma “crítica” à bibliográfica existente. No estudo de Bing-hui et al (2014) foi usado um metacaulino com aproximadamente 1/3 de água nos seus constituintes. Visto que os metacaulinos usados neste trabalho não possuem qualquer percentagem de água, desconhece-se o tipo de metacaulino usado nesse estudo. Outro fator em destaque foi a dimensão dos provetes usados para os ensaios. Bing-hui et al e Heah e al (2011) usaram provetes de dimensões 20x20x20mm e 50x50x50mm, respetivamente, não se conhecendo normas europeias que enquadrem ensaios com provetes destas dimensões.

Da pesquisa efetuada, constatou-se a importância da preservação do constituinte líquido da mistura durante o processo de cura. Esse aspeto é de extrema importância, na medida em que a evaporação dos constituintes líquidos condiciona as reações geopoliméricas essenciais para a formação do geopolímero. Procurou-se ao máximo evitar que isso acontecesse, envolvendo os provetes em películas plásticas. Ainda assim, é possível que, nas temperaturas mais elevadas, não tenha sido possível controlar eficazmente essa evaporação, e assim, justificar-se-á a perda de resistência para os provetes ensaiados a essas temperaturas. É evidente que essa evaporação depende sempre das condições ambientais, de temperatura e humidade, da temperatura da mistura, e principalmente do tempo necessário para a realização da mistura, colocação nos moldes e vibração. Existindo uma programação eficaz das tarefas, foi sempre necessário despendir cerca de 10min nestas tarefas. A Figura 4.5 revela um “esbranquiçado” nos provetes às temperaturas mais elevadas, a qual, acredita-se, ter resultado da referida evaporação.



## 5 CONCLUSÕES

O principal objetivo deste trabalho experimental consistiu na avaliação das propriedades mecânicas de misturas geopoliméricas, nomeadamente a resistência à tração por flexão e a resistência à compressão, variando a percentagem de plastificante adicionada e variando a temperatura de cura a que se sujeitaram os provetes. Foram realizadas misturas com 0,3, 0,6 e 1,2% de plastificante da massa do ligante e as temperaturas de cura consideradas foram de 10, 20, 30, 40 e 50°C.

De um modo geral, as propriedades resistentes das misturas realizadas sob percentagens mais elevadas de plastificante diminuíram. Para a maior dose de plastificante inserida, 1,2% da massa do ligante, observou-se uma ligeira quebra na resistência à tração por flexão. Nesta situação, os provetes atingiram uma resistência à tração por flexão de 4,95MPa, enquanto que no caso de referência atingiram uma resistência de 5,20MPa; redução de 0,25MPa, ou seja, cerca de 5%; pouco relevante portanto. Relativamente à resistência à compressão, todas as doses adicionadas diminuíram a capacidade resistente dos provetes, atingindo o seu valor inferior na adição de 0,6% de plastificante. A situação de referência atingiu a resistência à compressão de 33,9MPa enquanto que os provetes sujeitos a 0,6% de plastificante atingiram a resistência de 28,2MPa; uma quebra de aproximadamente 17%; significativa portanto. Assim, conclui-se que a adição de plastificante não é favorável à massa de geopolímeros.

O estudo relativamente à temperatura de cura, revelou perdas das propriedades resistentes para temperaturas de cura acima dos 30°C. Para a resistência à tração por flexão houve perdas na ordem dos 47% para a situação da temperatura de cura a 50°C em relação à situação de referência, apresentando o valor de  $\sigma_t=2,77\text{MPa}$ . Uma perda de resistência muito grande, relevante e preocupante para misturas curadas sob essas condições. A capacidade resistente à compressão acompanhou a tendência da resistência à tração, sendo ainda mais marcante e relevante, visto ser esta resistência a grande condicionadora dos materiais armados usados no âmbito da engenharia civil. Neste caso as perdas registaram 66%, apresentando o valor de  $\sigma_c=11,4\text{MPa}$ . É uma resistência claramente insuficiente que impossibilitará o uso destas misturas sob estas condições de cura.

Também a comparação entre misturas constituídas pelo metacaulino branco e castanho foram realizadas e constatam-se observações importantes. Relativamente à resistência à tração por flexão, destaca-se o melhor comportamento exibido pelas misturas de metacaulino castanho,

---

apresentando um valor de  $\sigma_t=5,20\text{MPa}$ , contra  $\sigma_t=4,83\text{MPa}$ . Já na análise da resistência à compressão verifica-se o oposto, apresentando uma resistência superior as misturas construídas com o metacaulino branco; apresenta um valor de  $\sigma_c=35,7\text{MPa}$  enquanto que as misturas de metacaulino castanho apresentam um valor de  $\sigma_c=33,9\text{MPa}$ . Apesar de tudo, são diferenças sempre inferiores a cerca de 7% relativamente aos valores médios.

Finalizando, foi possível concluir que os betões geopoliméricos constituem de facto uma alternativa às argamassas correntemente usadas. Á temperatura de cura ambiente, e sem adição de plastificante, foram as condições consideradas ideais neste trabalho exploratório para as resistências à tração por flexão e para a resistência à compressão.

### 5.1 Trabalhos Futuros

A caracterização mecânica dos geopolímeros não é um trabalho inovador no LEMEC, mas constitui um processo com grande progressão de estudo. Durante o processo laboratorial, muitas dúvidas se levantaram sobre o comportamento dos materiais em estudo. De modo a aprofundar o estudo sobre o comportamento de geopolímeros, são sugeridos os trabalhos futuros de investigação:

- Metodologias para a conservação da fase líquida em condições de cura adversas, nomeadamente a elevadas temperaturas;
- A utilização de hidróxido de potássio como ativador em detrimento do hidróxido de sódio usado neste trabalho experimental;
- A substituição do silicato de sódio pelo silicato de potássio também seria interessante de estudar, uma vez que o silicato de potássio influenciará a viscosidade da mistura, tornando-a menos viscosa mas, poderá influenciar o preço da mesma;
- Um estudo acerca da rigidez das misturas, uma vez que apresentam módulos de elasticidade inferiores aos betões de CPN, para além de que este parâmetro terá influência capital na capacidade estrutural. As verificações regulamentares das deformações será um aspeto importante de estudo;
- A aderência das misturas geopoliméricas aos betões constituídos por cimento Portland Normal será um estudo interessante de se realizar, uma vez que estas misturas parecem revelar boa aderência e poderão constituir um elemento importante para reabilitação de estruturas de betão armado;
- Na sequência da proposta anterior, também seria relevante estudar a possibilidade de construir estruturas realizadas com geopolímeros armados, estudando assim a aderência destas misturas aos varões de aço;

- A influência da adição de água às misturas geopoliméricas, uma vez sujeitas a condições ambientais adversas, por exemplo a chuva, podem influenciar o comportamento mecânico e estrutural destes geopolímeros;
- Um estudo químico mais aprofundado das reações químicas que se formam nos processos de cura. São processos quase desconhecidos e acredita-se que muito dos ganhos resistentes do material poderão ter origem nessas reações geopoliméricas. Possivelmente os alunos de engenharia civil não terão os conhecimentos químicos exigidos e seria interessante uma parceria com o Departamento de Química da UC.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bing-hui, Mo, Zhu, He, Xue-min, Cui, Yan, He, Si-yu, Gong. (2014) “Effect of curing temperature on geopolymerization of metakaolin-based geopolymers”. *Applied Clay Science* 99, p.144-148.

Favier, Aurélie, Hot, Julie, Habert, Guillaume, Roussel, Nicolas, d’Espinoze de Lacaillerie, Jean.Baptiste. (2014) “Flow properties of MK-based geopolymer pastes. A comparative study with standard Portland cement pastes”. *The Royal Society of Chemistry*, p. 1134-1141. DOI: 10.1039/c3sm61889b.

Guerra, Francisco José dos Santos Ferreira (2014). “Avaliação Experimental do Comportamento Mecânico de Materiais Ativados Alcalinamente”. (Tese de Mestrado). Departamento de Engenharia Civil. Universidade de Coimbra. Coimbra: Portugal.

Heah, C.Y., Kamarudin, H., Mustafa Al Bakri, A.M., Binhussain, M., Luqman, M., Nizar Khairul, I., Ruzaidi, C.M., Liew, Y.M. (2011). “Effect of curing Profile on Kaolin-based Geopolymers”. *Physics Procedia* 22, p.305-311.

Hot, Julie, Bessaies-Bey, Hela, Brumaud, Coralie, Duc, Myriam, Castella, Charlène, Roussel, Nicolas. (2014) “Adsorbing polymers and viscosity of cement pastes.” *Cement and Concrete Research* 63, p.12-19.

ISO 7500-1 (2004). *Verification of static uniaxial testing machines – Part 1: Tension/compression testing machines – Verification and calibration of the force-measuring system*. ISSO (International Organization for Standarization).

NP EN 196-1 (2006). “Métodos de ensaio de cimentos. Parte1: Determinação das resistências mecânicas”, IPQ.

NP EN 12390-3 (2011). “Ensaio do betão endurecido. Parte 3: Resistência à compressão de provetes”, IPQ.

NP EN 12390-5 (2009), “Ensaio do betão endurecido. Parte 1: Resistência à flexão de provetes”. IPQ.

Oliveira, Mário José de Jesus Couto. (2014) “Caracterização do Comportamento Mecânico de Sistemas Ligantes Obtidos por Ativação Alcalina; Evolução Temporal e Composição de Activador.” (Tese de Mestrado). Departamento de Engenharia Civil. Universidade de Coimbra. Coimbra: Portugal.

Pereira, J. (2013). “Estudo do solo enquanto material de construção sustentável.” (Tese de Mestrado). Departamento de Engenharia Civil. Universidade de Coimbra. Coimbra: Portugal.

Perera, D. S., Uchida, O., Vance, E.R., Finnie, K.S. (2007) “Influence of curing schedule on the integrity of geopolymers”. *J Mater Sci*, p.3099-3106. DOI: 10.1007/s10853-006-0533-6.

Teixeira Pinto, A. (2004). “Sistemas ligantes obtidos por ativação alcalina do metacaulino.” (Tese de Doutoramento). Universidade do Minho. Guimarães: Portugal.

Teixeira Pinto, A. (2006). “Introdução ao estudo dos geopolímeros.” Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro. Vila Real: Portugal.

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.

Torgal, F., Jalali, S. (2010). “Cimento Portland normal versus ligantes geopoliméricos: Durabilidade e desempenho ambiental.” *Teoria e Prática na Engenharia Civil*, n.15, p. 1-9.

Torgal, F., Jalali, S. (2007). “Construção Sustentável. O caso dos materiais de construção.” 3º Congresso Nacional. Coimbra: Portugal.

Torgal, F. “Betões Geopoliméricos. Um material com elevadas potencialidades para o reaproveitamento de agregados reciclados”. *Maquinaria* 223, p. 56 – 62.