



UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR
Engenharia

Comportamento térmico a altas temperaturas de betões de ativação alcalina com resíduos das minas da Panasqueira

(Versão final após defesa pública)

Rafael Alves da Silva Figueiredo

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Civil
(Ciclo de estudos integrado)

Orientador: Prof. Doutor João Paulo Castro Gomes

Covilhã, outubro de 2017

Dedicatória

Este trabalho é dedicado aos meus pais, a quem devo grande parte daquilo que sou. Nem sempre a vida correu como desejariam, mas mesmo assim fizeram tudo o que podiam para que isto fosse possível. Invejo-vos a vossa força! Adoro-vos Pai e Mãe!

Quero ainda dedicar este trabalho à pessoa que nos últimos 10 anos mais me fez sorrir e ser feliz. Não preciso dizer muito mais, tudo o que vivemos e me proporcionou falam por si. Tu sabes aquilo que significas para mim, e sabes muito bem qual é o teu lugar. Amo-te Joaquina!

Agradecimentos

Agradeço a todas as pessoas que fizeram parte desta caminhada, nomeadamente aos professores que ao longo destes anos me transmitiram muito do seu conhecimento e sabedoria.

Agradecer ao professor doutor João Castro Gomes por ter aceite de braços abertos a proposta de fazer esta dissertação comigo. Esteve sempre disponível quando surgiram dúvidas dando sempre o seu contributo para melhorar este trabalho de forma exemplar e sempre com boa disposição.

Agradecer também ao Jorge Bento que me ajudou imenso na parte laboratorial deste estudo.

Agradecer aos meus colegas pela ajuda sempre preciosa que me deram, agradecer aos meus amigos que nunca me falharam quando mais precisei e que sempre me ajudaram e apoiaram nesta etapa tão importante da minha vida.

Um agradecimento especial ao meu grande amigo Alexandre Neves que muito me ajudou ao longo destes anos e principalmente a ajuda que me deu na realização deste trabalho. Muito obrigado Zeca!

Agradeço à minha família, em especial aos meus pais pelo apoio incondicional que sempre me deram.

Por fim, mas não menos importante, um grande agradecimento à Joana Domingos, que foi sem dúvida a pessoa que mais me ajudou e incentivou nesta longa jornada, sempre disponível para ajudar, sempre preocupada e sempre presente nos momentos mais difíceis. Um muito obrigado!

Resumo

Os materiais ativados alcalinamente (geopolímeros), apresentam bom comportamento a altas temperaturas, mas a maioria dos estudos de geopolímeros sob altas temperaturas são focados em geopolímeros de metacaulino ou de cinzas volantes. Este trabalho pretende mostrar as potencialidades de geopolímeros produzidos com lamas residuais de minas.

Neste trabalho, foram analisados materiais de ativação alcalina (AAC) com diferentes combinações de lamas residuais, vidro moído, metacaulino e cortiça expandida num total de 15 misturas diferentes usando hidróxido de sódio e silicato de sódio como ativadores alcalinos. O tamanho das partículas dos materiais utilizados é inferior a $500 \mu m$, para as lamas residuais e para o vidro moído. Algumas misturas também incluíram cortiça expandida granulada com tamanho de partícula entre 2 a 4 mm. Também se avaliou, a capacidade deste tipo de ligantes em isolar termicamente um agregado com baixa resistência a altas temperaturas e ao fogo, como é o caso do aglomerado negro de cortiça.

Para cada tipo de mistura, foram utilizadas dez amostras com as seguintes dimensões: dimensões de $40 \times 40 \times 40 \text{ mm}^2$ para o teste de compressão, uma amostra para o teste TGA e um cubo ($100 \times 100 \times 60 \text{ mm}^2$) com um orifício troncocônico (50 mm de profundidade) e $100 \times 100 \times 25 \text{ mm}^2$ para servir de tampa, para o *cup test*.

Todas as misturas foram curadas por 24h a uma temperatura de $60 \text{ }^\circ\text{C}$ antes de serem desmoldadas e deixadas à temperatura ambiente até atingirem 7 dias para serem testadas. No sétimo dia, de cada mistura, as amostras foram colocadas em um forno estático, antes do teste de compressão, submetido a uma temperatura de $800 \text{ }^\circ\text{C}$ durante 2h.

Em seguida, o teste de compressão foi realizado e os valores antes e depois da exposição a altas temperaturas foram comparados. Foram registrados ganhos máximos de 724% e perdas máximas de 100% na resistência à compressão e perdas de massa a variar entre os 1,76% e os 13,67%.

Palavras-chave

Ativação alcalina; lamas residuais; geopolímeros; altas temperaturas; análise termogravimétrica; resistência à compressão

Abstract

Generally, alkali-activated materials (aka geopolymers) present good behavior at high temperatures, but previous studies of geopolymers under elevated temperatures are, in most cases, focused on metakaolin or fly ash based geopolymers, making the information on geopolymers with mining waste mud almost inexistent.

In this work, were analysed geopolymers with different combinations of mining waste mud, waste glass powder, metakaolin and expanded cork in a total of 15 different mixtures using sodium hydroxide and sodium silicate as alkaline activators. Materials particle size used is under 500 μm for mining waste mud, waste glass powder. Some mixtures also included expanded granulated cork with particle size between 2 to 4 mm.

Ten samples with 40 x 40 x 40 mm dimensions were used for the compression test, one sample for the TGA test, and one cube (100 x 100 x 60 mm) with a torcoconic hole (50 mm deep) and a 100 x 100 x 25 mm cover, for the cup test.

All the mixtures were cured for 24h at a temperature of 60 °C before being demoulded, and left at room temperature until they reach seven days to be tested. On the seven day, of each mixture, samples were placed in a static furnace before the compression test submitted to a temperature of 800 °C during two hours.

Then, the compression test was performed and the values before and after exposure to high temperatures were compared. Were recorded maximum gains of 724% and maximum losses of 100% in the compressive strength and mass losses ranging from 1,76% to 13,67%.

This preliminary result shows the potentials of mining waste alkali-activated materials for elevated temperatures applications.

Keywords

Alkali activation; mining waste mud; geopolymer; high temperature; TGA; compressive strength

Índice

1	Introdução	1
1.1	Enquadramento	1
1.2	Objetivos do trabalho.....	4
1.3	Estrutura da dissertação	5
2	Revisão bibliográfica.....	7
2.1	Enquadramento	7
2.2	Resumo histórico dos “geopolímeros”	7
2.3	Ativação alcalina (geopolimerização).....	8
2.3.1	Hidratação do cimento vs geopolimerização	9
2.4	Vantagens e principais aplicações	11
2.5	Questões ambientais e incentivo à produção e utilização de materiais geopoliméricos	13
2.6	Principais propriedades físicas e mecânicas	14
2.6.1	Resistência à compressão	14
2.6.2	Resistência a ataques de ácidos	15
2.6.3	Resistência térmica	16
2.7	Influência do tempo e temperatura de cura	17
3	Materiais e métodos	19
3.1	Programa experimental.....	19
3.2	Caracterização dos materiais precursores	19
3.2.1	Lamas das minas da Panasqueira	20
3.2.1.1	Composição química	21
3.2.1.2	Análise microscópica.....	23
3.2.2	Vidro moído.....	23
3.2.2.1	Composição química	24
3.2.2.2	Análise microscópica.....	26
3.2.3	Metacaulino.....	27
3.2.3.1	Composição química	27
3.2.3.2	Análise microscópica.....	28

3.3	Caracterização dos materiais ativadores.....	29
3.3.1	Silicato de sódio	29
3.3.2	Hidróxido de sódio	29
3.4	Definição das misturas em estudo	30
3.5	Ensaio de caracterização das misturas	32
3.5.1	Resistência à compressão	32
3.5.2	Regime de cura	33
3.5.3	Análise termogravimétrica (TGA).....	33
3.5.4	Cup test	34
4	Resultados	35
4.1	Resistência à compressão aos 7 dias	35
4.2	Resistência à compressão após exposição a 800 °C	37
4.3	Análise termogravimétrica (TGA).....	39
4.3.1	Análise de ensaios	39
4.3.2	Síntese de resultados	52
4.4	Cup test	53
4.4.1	Síntese de resultados	60
5	Discussão e conclusões	61
5.1	Conclusões finais	62
5.2	Propostas de trabalhos futuros.....	63
	Bibliografia	65
	Anexos	69

Lista de Figuras

Figura 1.1 - Crescimento e projeção da produção mundial de cimento Portland [7].....	2
Figura 2.1 - Modelo conceptual de geopolimerização [15]	11
Figura 2.2 - Fixação da alumina e da sílica no processo de geopolimerização [29].....	16
Figura 3.1 - Betoneira para moagem e misturação das lamas e vidro	20
Figura 3.2 - Resultado da moagem do vidro	20
Figura 3.3 - Lamas residuais das Minas da Panasqueira [500 µm]	21
Figura 3.4 - Imagem microscópica das lamas residuais [100 µm]	23
Figura 3.5 - Vidro moído [500 µm]	24
Figura 3.6 - - Imagem microscópica do vidro moído [100 µm].....	26
Figura 3.7 - Metacaulino	27
Figura 3.8 - Imagem microscópica do metacaulino [20 µm]	28
Figura 3.9 - Processo de produção da solução de hidróxido de sódio (mistura com agitador e colocação em balão de vidro)	30
Figura 3.10 - Pasta de lamas residuais com vidro moído e colocação nos provetes	30
Figura 3.11 - Prensa hidráulica ELE 3000kN e exemplo de teste de compressão.....	32
Figura 3.12 - Cura dos provetes em estufa a 60 °C	33
Figura 3.13 - Equipamento TGA Q50 com amostra de lama no cadinho	33
Figura 3.14 - Molde do cup test	34
Figura 3.15 - Forno estático ou mufla.....	34
Figura 4.1 - Resistência à compressão aos 7 dias [MPa]	35
Figura 4.2 - Rotura típica após ensaio de resistência à compressão da mistura 100MK	36
Figura 4.3 - Resistência à compressão após exposição a 800 °C [MPa]	37
Figura 4.4 - Rotura após exposição a altas temperaturas da mistura 100MK	38
Figura 4.5 - Rotura após exposição a altas temperaturas da mistura 50GL-50MK.....	38
Figura 4.6 - Alteração dos provetes de 100GL	39
Figura 4.7 - Resultado do ensaio de termogravimetria às lamas residuais	39
Figura 4.8 - Resultado do ensaio de termogravimetria ao metacaulino	40
Figura 4.9 - Resultado do ensaio de termogravimetria da mistura 100MD	41
Figura 4.10 - Resultado do ensaio de termogravimentria da mistura 100GL	42
Figura 4.11 - Resultado do ensaio de termogravimetria da amostra 100MK	42
Figura 4.12 - Resultado do ensaio de termogravimetria da amostra 80MD-10GL-10MK-10C....	43
Figura 4.13 - Resultado do ensaio de termogravimetria da amostra 80MD-10GL-10MK	43
Figura 4.14 - Resultado do ensaio de termogravimetria da amostra 80MD-10GL-10MK-20C....	44
Figura 4.15 - Resultado do ensaio de termogravimetria da amostra 80MD-20GL.....	44
Figura 4.16 - Resultado do ensaio de termogravimetria da amostra 80MD-20MK	45
Figura 4.17 - Resultado do ensaio de termogravimetria da amostra 60MD-20GL-20MK	46

Figura 4.18 - Resultado do ensaio de termogravimetria da amostra 60MD-20GL-20MK-10C ...	46
Figura 4.19 - Resultado do ensaio de termogravimetria da amostra 55MD-27GL-18MK	47
Figura 4.20 - Resultado do ensaio de termogravimetria da amostra 55MD-27GL-18MK-10C ...	48
Figura 4.21 - Resultado do ensaio de termogravimetria da amostra 55MD-27GL-18MK-20C ...	48
Figura 4.22 - Resultado do ensaio de termogravimetria da amostra 50MD-25GL-25MK	49
Figura 4.23 - Resultado do ensaio de termogravimetria da amostra 50GL-50MK.....	50
Figura 4.24 - Resultado do ensaio de termogravimetria do betão C25/30.S3.XC1.(P).D22.CL0,4	51
Figura 4.25 - Cup test da mistura 80MD-10GL-10MK-20C	53
Figura 4.26 - Cup test da mistura 55MD-27GL-18MK-20C	53
Figura 4.27 - Cup test da mistura 80MD-20GL	54
Figura 4.28 - Cup test da mistura 80MD-10GL-10MK.....	54
Figura 4.29 - Cup test da mistura 60MD-20GL-20MK.....	55
Figura 4.30 - Cup test da mistura 60MD-20GL-20MK-10C	55
Figura 4.31 - Cup test mistura 55MD-27GL-18MK-10C.....	56
Figura 4.32 - Cup test mistura 55MD-27GL-18MK	56
Figura 4.33 - Cup test da mistura 50MD-25GL-25MK.....	57
Figura 4.34 - Cup test mistura 80MD-10GL-10MK-10C.....	57
Figura 4.35 - Cup test da mistura 80MD-20MK.....	58
Figura 4.36 - Cup test da mistura 50GL-50MK	58
Figura 4.37 - Cup test mistura 100MK.....	59
Figura 4.38 - Cup test da mistura 100GL	59

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 - Percentagem de matriz estrutural dissolvida pelo ácido [%] [29]	15
Tabela 3.1 - Composição química elementar das lamas	22
Tabela 3.2 - Composição química em percentagem	22
Tabela 3.3 - Composição química elementar	24
Tabela 3.4 - Composição química em percentagem	25
Tabela 3.5 - Composição química elementar do metacaulino [%]	27
Tabela 3.6 - Composição química em percentagem	28
Tabela 3.7 - Composição das misturas	31
Tabela 4.1 - Resumo dos ensaios TGA [%]	52
Tabela 4.2 - Resumo do ensaio cup test	60

Lista de Símbolos e Acrônimos

$^{\circ}\text{C}$	Graus Celsius
$2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$	Silicato bicálcio
$3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$	Aluminato de cálcio
$4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$	Aluminato de ferro
AAC	Materiais ativados alcalinamente
Al	Alumínio
Al_2O_3	Óxido de alumínio
As	Arsênio
Ca	Cálcio
$\text{Ca}(\text{OH})_2$	Hidróxido de cálcio
$\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6\cdot\text{CaSO}_4\cdot 12\text{H}_2\text{O}$	Trissulfato de alumínio de cálcio
Ca_3SiO_5	Silicato tricálcio
Ca-Al- H_2O	Etringita
CaCO_3	Carbonato de cálcio
$\text{CaCO}_3\cdot\text{H}_2\text{O}$	Carbonato de cálcio hidratado
CaO	Cal
$\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2\cdot\text{H}_2\text{O}$	Silicato de cálcio hidratado
CO_2	Dióxido de carbono
Cr	Crômio
Cr_2O_3	Óxido de crômio
C-S-H	Silicato de cálcio hidratado
Cu	Cobre
Cu_2O	Óxido de cobre
DECA	Departamento de Engenharia Civil e Arquitetura
DTG	Termogravimetria diferencial (<i>Derivate thermogravimetry</i>)
EDX	<i>Espectroscopia de energia dispersiva por raio-X (Energy-dispersive X-ray spectroscopy)</i>
Fe	Ferro
Fe_2O_3	Óxido de ferro
GL	Vidro moído
H_2SO_4	Ácido sulfúrico
HCl	Ácido clorídrico
K	Potássio
K_2CO_3	Carbonato de potássio
kG	Quilograma
kG/ton	Quilograma por tonelada

kW/m^2	Quilowatts por metro quadrado
<i>M</i>	Concentração molar
MD	Lamas residuais
MEV	Microscópio eletrónico de varrimento
<i>mg</i>	Miligramas
<i>Mg</i>	Magnésio
<i>MgO</i>	Óxido de magnésio
MK	Metacaulino
mm^3	Milímetros cúbicos
<i>MPa</i>	Mega pascal
<i>Na</i>	Sódio
Na_2O	Óxido de sódio
<i>NaOH</i>	Hidróxido de sódio
<i>Ni</i>	Níquel
<i>NiO</i>	Óxido de níquel
$^{\circ}C/min$	Graus celsius por minuto
OCDE	Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Económico
<i>P</i>	Fósforo
P_2O_3	Trióxido de fósforo
<i>pH</i>	Potencial hidrogeniónico
<i>S</i>	Enxofre
SEM	Microscópio eletrónico de varrimento (<i>Scanning electron microscopy</i>)
<i>Si</i>	Silício
SiO_2	Dióxido de silício
TGA	Análise termogravimétrica (<i>Thermogravimetric analysis</i>)
<i>Ti</i>	Titânio
TiO_2	Dióxido de titânio
UBI	Universidade da Beira Interior
<i>Zn</i>	Zinco
<i>ZnO</i>	Óxido de zinco

1 Introdução

1.1 Enquadramento

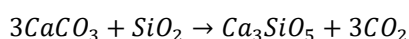
O aquecimento global é um dos maiores problemas mundiais deste século. Há já muito anos que esta temática tem sido discutida e se tem tentado minimizar, mas com *boom* da industrialização mundial, final do século XIX, houve um aumento exponencial das emissões de CO_2 [1]. A partir de 1970, deu-se início a um movimento ambientalista cujo objetivo era a defesa da saúde e qualidade de vida humana dependentes de fatores ambientais, surgindo com isso um novo campo de trabalho denominado saúde ambiental [2].

Segundo Brundtland, o uso responsável e sustentável dos recursos naturais deve “suprir as necessidades da geração presente sem afetar a possibilidade das gerações futuras de suprir as suas necessidades” [3].

Em 2005, entrou em vigor o “Protocolo de Quioto” com objetivo de reduzir as emissões de gases com efeito de estufa. O “Protocolo de Quioto” visava a redução de 5,2%, entre 2008 e 2012, dos níveis de emissões apresentados em 1990, e fazem parte deste protocolo 55 países que em conjunto representam 55% das emissões globais de gases poluentes. Desta extensa lista fazem parte Rússia, Japão e Estados Unidos da América, que são dos países mais poluentes [4].

O relatório ambiental da União Europeia de 2010, coloca como objetivo a redução de 80 a 95% das emissões de CO_2 até 2050, para que se consiga atingir um nível de aquecimento global inferior a 2 °C, mas reduzir 80 a 95% das emissões de CO_2 implica uma mudança radical do mundo como o conhecemos hoje e uma profunda reestruturação dos sectores com maiores emissões de CO_2 , sector energético e dos transportes [5], [6].

Para além dos sectores energéticos e dos transportes, a indústria da construção também uma das principais responsáveis pela das emissões de CO_2 , sendo a produção de cimento Portland a principal fonte de emissões. No processo de produção do cimento Portland, são libertados no total cerca de 969 *kg/ton* de CO_2 para a atmosfera produto da descarbonização de calcário ($CaCO_3$) e do consumo de energia na produção do clínquer. A equação (1.1) representa a reação da qual se obtém o clínquer:



Desta reação são libertados 579 kg de CO₂ por cada tonelada de clínquer produzido, valor ao qual são somados 390 kg de CO₂ libertados pela utilização de combustíveis fósseis utilizados nesta combustão [7].

Com o crescimento da produção mundial de cimento Portland, passamos de uma produção mundial de 594 milhões de toneladas em 1970, para cerca de 2284 milhões de toneladas em 2005, sendo a maioria deste crescimento atribuída a países em desenvolvimento e especial ao crescimento da China [7]. A China foi responsável por cerca de 47% da produção mundial de cimento Portland no ano de 2005 (1064 milhões de toneladas produzidas) contra os 32% produzidos pelos países membros da OCDE (702 milhões de toneladas), 17% produzidos Brasil, Egito, Tailândia, Arábia Saudita, Coreia do Sul, Vietname, México, Indonésia e Irão (394 milhões de toneladas) e por fim a Índia com uma produção de cerca de 6% (130 milhões de toneladas) [7]. A figura 1.1 ilustra o crescimento e as projeções futuras da produção de cimento Portland a nível mundial.

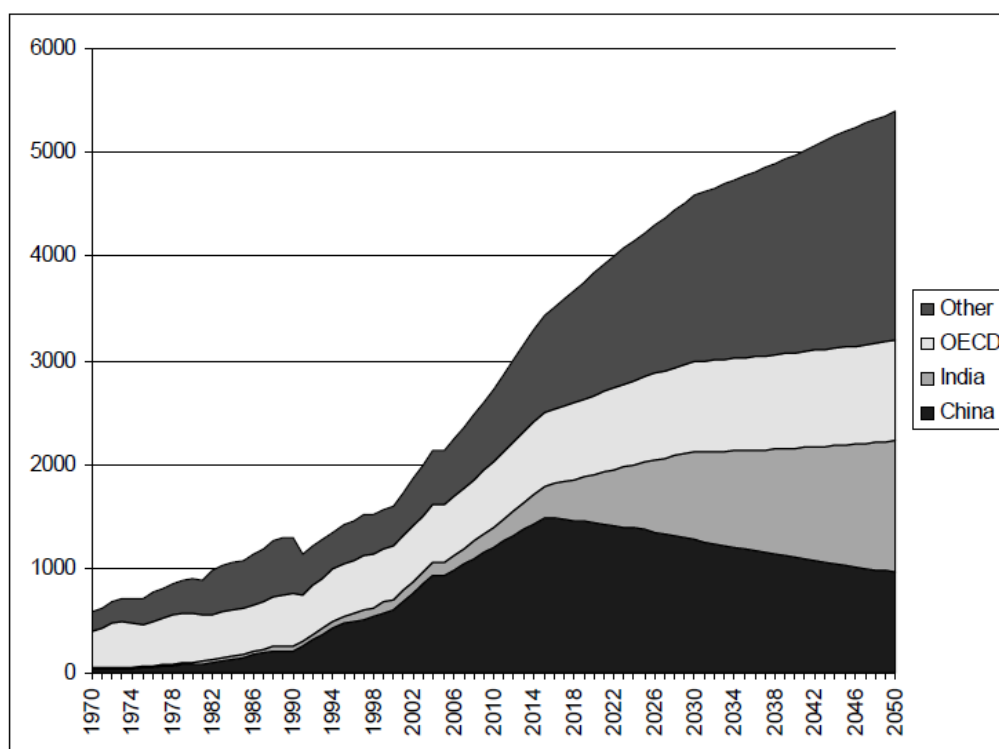


Figura 1.1 - Crescimento e projeção da produção mundial de cimento Portland [7]

O cimento Portland é há muitos anos o material de construção mais utilizado em todo o mundo, tanto pelas suas boas características mecânicas, como pelo seu baixo custo isso deve-se ao

facto de ser um material que foi e continua a ser bastante estudado, o que permite ter um aprofundado conhecimento sobre as suas características.

Tendo em conta estes fatores, é de extrema importância encontrar alternativas ao cimento Portland. A procura por novos ligantes cuja produção tenha um impacto menor no aquecimento global é aliada à necessidade de encontrar ligantes com maior durabilidade, já que, segundo Flaga, a grande debilidade das construções de betão produzidas com cimento Portland, tem a ver com a durabilidade uma vez que a vida útil de uma estrutura de betão tem vindo a diminuir ao longo dos anos estando neste momento situada nos 50 anos [8].

A comunidade científica está concentrada em encontrar novos materiais que tenham um desempenho ambiental superior e melhor características mecânicas que o cimento Portland, e é desta necessidade que surge o interesse nos ligantes obtidos por ativação alcalina que se pensa serem uma alternativa viável à utilização de cimento Portland. A falta de conhecimento e o elevado custo de produção são algumas das limitações destes ligantes, mas em contrapartida apresentem desempenho ambiental, mecânico e durabilidade superior ao cimento Portland.

De forma simplificada os ligantes de ativação alcalina, mais conhecidos como geopolímeros, são resultado da ligação de aluminossilicatos com uma mistura altamente alcalina, transformando-se numa mistura semi-cristalina e amorfa de presa rápida e com valor significativo de resistência à compressão após pouco tempo de cura. Existem vários fatores que influenciam o comportamento dos geopolímeros, tais como, o tipo de precursor, o tipo de ativador, a temperatura e tempo de cura, bem como as razões precursor/ativador.

Para Davidovits, os geopolímeros possuem características mecânicas, químicas e durabilidade de grande interesse para a construção [9]. Apresentam também grande capacidade para imobilizar resíduos sólidos e um baixo consumo energético na sua produção [10].

Apesar da investigação em torno dos geopolímeros ter crescido nas últimas décadas, o conhecimento destes ligantes está ainda numa fase pouco desenvolvida. A reatividade dos materiais pode ser aumentada, em alguns casos, com tratamento térmico. Os materiais podem apresentar características geológicas idênticas, mas possuem composições químicas e comportamentos térmicos distintos [11].

Também em Portugal, já se fizeram pesquisas acerca dos ligantes de ativação alcalina usando como precursor lamas residuais das Minas da Panasqueira. Estas lamas demonstram possuir boa composição química para a produção de geopolímeros, por serem maioritariamente constituídas por alumina (Al) e silício (Si) [11], [12].

Como este trabalho pretende-se aumentar o conhecimento à volta dos geopolímeros, neste caso à base de lamas residuais das Minas da Panasqueira, com adições de outros precursores (vidro moído e metacaulino) por forma a melhorar as propriedades químicas da mistura. Tendo ainda por base estudos anteriormente desenvolvidos à volta destas lamas, pretende-se avaliar o comportamento destes geopolímeros quando expostos a altas temperaturas.

A necessidade de conhecer melhor os ligantes obtidos usando lamas residuais das Minas da Panasqueira, apresenta um grande interesse do ponto de vista ambiental com a possibilidade de reutilizar resíduos que de outra forma seriam amontoados, mas também do ponto de vista da redução das emissões de CO_2 . Com isso espera-se que este trabalho ajude no desenvolvimento desta tecnologia e na promoção de um material cada vez com mais futuro.

1.2 Objetivos do trabalho

O principal objetivo deste trabalho é avaliar o comportamento a altas temperaturas, de diferentes misturas AAC, com diferentes percentagens de lamas residuais que variam de 0 a 100% com as adições de vidro e metacaulino, e comparar os resultados obtidos com os resultados de um betão com cimento Portland.

Para isso foram realizadas 15 misturas distintas com variação de percentagem de precursores entre os 0 e os 100% e com uma razão precursor/ativador de 2,85, à exceção de 2 misturas onde se utilizaram as razões 1,10 e 2,17. Em algumas misturas foram adicionadas pequenas percentagens de cortiça (agregado leve) entre 10 a 20% por forma a testar a influência de agregados leves na resistência dos geopolímeros.

Após curadas, as misturas foram sujeitas a um regime de calor, onde permaneceram durante cinco horas, e posteriormente foram testadas as resistências e comparadas com as resistências obtidas antes da exposição ao regime de calor.

Foi também avaliada a perda de massa das misturas, com recurso ao ensaio de termogravimetria. Por fim, e com objetivo de avaliar o comportamento destes ligantes quando expostos a ataques químicos, fez-se o *cup test*.

1.3 Estrutura da dissertação

A dissertação está dividida em 5 capítulos e 2 anexos.

O capítulo 1 é constituído por: enquadramento do tema, objetivos gerais do trabalho e a descrição da estrutura da dissertação.

No capítulo 2 é apresentada uma revisão bibliográfica que conta com: enquadramento, um breve resumo histórico sobre geopolímeros, uma curta perceção de como funciona o processo de geopolimerização e a comparação com o processo de hidratação do cimento Portland, as vantagens e principais possíveis aplicações dos ligantes geopoliméricos, as principais propriedades físicas e mecânicas dos geopolímeros e a influência do tempo e da temperatura de cura.

O capítulo 3 fala sobre os materiais e métodos utilizados na realização deste estudo onde contamos com: programa experimental, caracterização dos precursores, caracterização dos ativadores, definição das misturas em estudo e os ensaios que foram realizados.

Já no capítulo 4 são apresentados os resultados obtidos nos diversos ensaios e experimentos.

O capítulo 5 diz respeito à discussão dos resultados e conclusões gerais do trabalho.

Nos Anexos são apresentadas as composições das misturas, os resultados dos ensaios de compressão e de termogravimetria e ainda a folha de cálculo utilizada no auxílio da produção das misturas.

2 Revisão bibliográfica

2.1 Enquadramento

Este capítulo tem como objetivo, analisar alguns dos aspetos mais relevantes sobre o conhecimento atual dos geopolímeros ou ligantes obtidos por ativação alcalina.

Desde há vários anos que existe a preocupação, por parte da comunidade científica, em encontrar soluções alternativas ao cimento Portland. Para além das questões ambientais inerentes à produção do cimento Portland, a sua fraca durabilidade suscita também grandes preocupações, já que a elevada percentagem de cal, presente na sua composição, o torna vulnerável a ataques químicos, provocando fenómenos de carbonatação e corrosão das armaduras.

Uma forte alternativa ao cimento Portland são os geopolímeros. Os geopolímeros possuem uma capacidade mecânica superior bem como um melhor desempenho ambiental quando comparados com cimento Portland. Para além disso, os geopolímeros apresentam uma grande resistência aos ácidos bem como ao fogo.

2.2 Resumo histórico dos “geopolímeros”

O início da investigação ao redor dos ligantes de ativação alcalina foi dada por Glukhosky, ao estudar os ligantes utilizados nas construções romanas e nas pirâmides egípcias. Ao investigar os ligantes presentes nestas construções, concluiu que na sua composição constavam aluminossilicatos cálcicos hidratados. Graças a essa descoberta desenvolveu uma nova família de ligantes, “solo-cimento”, que eram compostos por aluminossilicatos moídos e resíduos industriais de origem alcalis [13].

Após uma trágica onda de incêndios em França, no ano de 1970, que levou à morte de centenas de pessoas, as preocupações como os materiais usados nas edificações aumentaram, levando a comunidade científica a pesquisar sobre novos materiais que apresentassem boa resistência ao fogo e que não fossem inflamáveis. No decorrer das pesquisas e estudos, surge o nome do engenheiro químico Joseph Davidovits, que após uma alargada investigação, descobriu uma nova classe de materiais resultantes da reação entre pó aluminossilicato e uma solução alcalina. Em 1979, Davidovits criou e patenteou os ligantes obtidos por ativação alcalina onde criou o termo “geopolímero” [14], [15]. Desde então a evolução dos ligantes teve um enorme crescimento.

Davidovits viria a confirmar a utilização de geopolímeros na construção das pirâmides egípcias, o que demonstra bem a capacidade mecânica, resistência e durabilidade dos ligantes obtidos por ativação alcalina.

Apesar das suas vantagens, a técnica dos geopolímeros ficou perdida na antiguidade histórica, sendo redescoberta num passado recente. Davidovits vai mais longe ao afirmar que os geopolímeros são a adaptação moderna das técnicas utilizadas pelos Romanos e Egípcios [9].

2.3 Ativação alcalina (geopolimerização)

O mecanismo de formação de geopolímeros ainda não é totalmente conhecido, pelo que têm sido desenvolvidos muitos estudos à volta desta temática, mas ainda é desconhecido o mecanismo de formação por trás do endurecimento dos ligantes. Diversos autores defendem que o mecanismo por trás da formação de geopolímeros assenta num processo de policondensação, mas são desconhecidas as fases desse processo.

Para a formação de geopolímeros, podem ser utilizados vários tipos de precursores e ativadores, e a escolha destes materiais vai definir a ativação alcalina. Existe uma diversidade de materiais aluminossilicatos que podem ser utilizados na produção de geopolímeros tais como, metacaulino, cinzas volantes, escórias de alto forno, lamas residuais, entre outros materiais.

O que leva os geopolímeros a serem considerados polímeros, segundo Davidovits, é facto de se transformarem (poli condensarem) e endurecerem facilmente e de forma rápida a baixas temperaturas, conseguindo, após 4 horas de cura, resistências de 20 MPa. Como a composição destes ligantes é em tudo semelhante aos zeólitos, ou seja, são materiais não inflamáveis e capazes de resistir a temperaturas até 1250 °C [9].

Glukhosvky, afirma que ativação alcalina é dado por um conjunto de reações de destruição-condensação, ou seja, primeiramente ocorre uma destruição das ligações covalentes $Si - O - Si$ e $Al - O - Al$, efeito do aumento do pH da solução causado pela adição de metais alcalinos, formando unidades estruturais frágeis que interagem entre si originando, posteriormente, uma estrutura coagulada na qual se dão os processos de policondensação e que no final dão origem à condensação da estrutura [11].

Palomo por sua vez, fez uma investigação acerca do mecanismo de ativação de cinzas volantes a partir de várias soluções alcalinas, chegando à conclusão que a ativação alcalina das cinzas volantes se dá partindo de um processo exotérmico de dissolução durante o qual se dá a destruição das ligações covalentes de $Si - O - Si$ e $Al - O - Al$ e os iões (sílica e alumina) passam a fazer parte da solução. Palomo refere também que o produto que resulta da destruição da

estrutura das cinzas volantes se acumula durante um período de tempo a que se dá o nome de período de indução. Por fim ocorre a condensação da estrutura que envolve o aparecimento de material cementício com uma estrutura fracamente ordenada mas com boa capacidade mecânica, a que se dá o nome de etapa exotérmica [16].

Palomo afirma também que a temperatura de cura exibe um papel fundamental no processo de ativação alcalina, pois funciona como acelerador das reações e tem também um papel importante no aumento da resistência mecânica, no caso de todos os outros parâmetros se manterem constantes. O tipo de solução alcalina utilizado na ativação tem uma influência direta na rapidez das reações, isto é, a utilização de soluções alcalinas com silicatos solúveis (silicato de sódio ou silicato de potássio), as reações desenvolvem-se mais rapidamente do que em relação a soluções de hidróxidos, uma vez que nas soluções de silicatos solúveis existe a sobreposição de etapas e as reações de dissolução das ligações covalentes, acumulação dos produtos e a policondensação dão-se em simultâneo. Como consequência disso os geopolímeros obtidos a partir de soluções de silicatos solúveis apresentam um desenvolvimento da resistência mecânica mais rápido que no caso de geopolímeros obtidos a partir de soluções de hidróxidos.

2.3.1 Hidratação do cimento vs geopolimerização

A origem do nome do cimento Portland remonta ao ano de 1824 e foi patenteado pelo químico britânico Joseph Aspdin em homenagem à ilha de Portland, visto as suas propriedades (cor e dureza) se assemelharem às rochas da ilha, tornando-se o principal ligante utilizado em construção. O cimento Portland resulta da calcinação a 1450 °C de calcário, sílica, alumínio, óxido de ferro e percentagens mínimas de outros produtos.

O cimento Portland é constituído por uma combinação de óxidos de silício, cálcio, ferro e alumínio e pequenas percentagens de outras substâncias de origem de calcário, argila e gesso. O cimento é fundamentalmente formado por 4 minerais:

- Alite - silicato tricálcico - $3CaO.SiO_2$
- Belite - silicato bicálcico - $2CaO.SiO_2$
- Aluminato de cálcio - $3CaO.Al_2O_3$
- Aluminato de ferro- $4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$

Os minerais presentes do cimento reagem em contacto com água, fazendo com que existam várias fases de hidratação. O produto da reação dos silicatos de cálcio são hidróxidos de cálcio ($Ca(OH)_2$) e silicatos de cálcio hidratados ($CaO.SiO_2.H_2O$). Por sua vez a reação de aluminatos de cálcio e de ferro em conjunto com o gesso ($CaO.SO_4.2H_2O$) resultando em trissulfato de alumínio de cálcio ($Ca_3Al_2O_6.CaSO_4.12H_2O$) [17][18].

A única fase de hidratação com composição química e estrutura cristalina bem definida é a do hidróxido de cálcio ($Ca(OH)_2$), já que a sua morfologia consiste em cristais hexagonais. Os silicatos de cálcio hidratados C-S-H apresentam a morfologia semelhante a um sódio pouco cristalino, sendo a sua estrutura variável. Numa fase inicial de hidratação a sua estrutura é composta por fibras finas, soltas e pouco cristalinas, já numa fase mais avançada de hidratação a sua estrutura em rede reticular e densa. Existem duas fases distintas de C-S-H na hidratação do cimento Portland que são designadas de “fase interior” e “fase exterior”. A fase interior de C-S-H, é originada à volta das partículas de cimento não hidratado, já a fase exterior é originado nos espaços ocupados pela água [19], [20].

Glukhosvky apresentou, nos anos 50, uma explicação para o mecanismo de ativação alcalina de materiais obtidos por sílica e alumina reativas, O modelo apresentado pelo autor está dividido em três partes:

- Destrução-coagulação
- Coagulação-condensação
- Condensação-cristalização

Mais recentemente, a teoria de Glukhosvky, tem sido ampliada com o conhecimento atual acerca da síntese de zeólitos por forma a explicar o mecanismo de geopolimerização com um só [13].

Na figura 2.1 são apresentados, de forma simplificada e resumida, os diferentes processos da geopolimerização. Os processos estão apresentados de forma sequencial para facilitar a compreensão, porque na realidade os processos de reação acontecem em simultâneo, na fase de dissolução. A dissolução de aluminossilicatos por hidrólise alcalina produz espécies de aluminatos e silicatos. Não foi comprovado, mas assume-se que ocorre dissolução das partículas à superfície, o que leva à libertação de aluminatos e silicatos. A dissolução de aluminatos amorfos, para valores elevados de pH , é rápida, fator que leva à criação de uma solução saturada formando um gel onde se dá a libertação da água consumida na fase de dissolução. O gel apresenta uma estrutura bifásica, isto é, contém ligante aluminossilicato e água. O tempo que a solução saturada de aluminossilicato leva para se transformar num gel depende do tipo de materiais precursores e das condições de síntese [15][21].

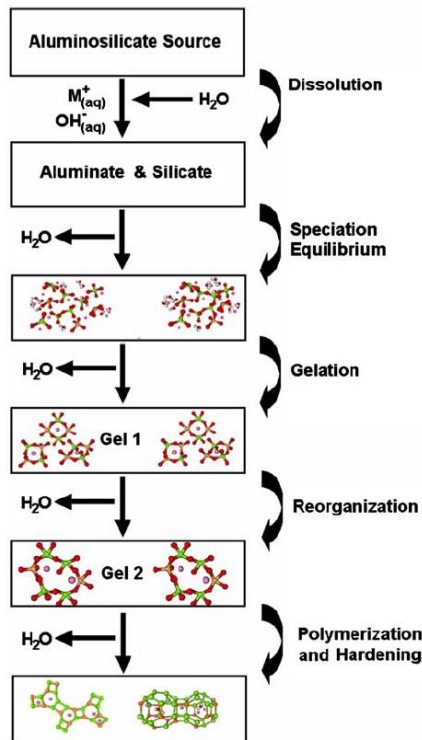


Figura 2.1 - Modelo conceptual de geopolimerização [15]

2.4 Vantagens e principais aplicações

O aparecimento dos geopolímeros surge da necessidade de encontrar materiais com uma boa resistência ao calor e que sejam uma solução viável aos materiais já existentes. Pode-se dizer que Joseph Davidovits foi o maior impulsionador do desenvolvimento dos geopolímeros. As características únicas dos geopolímeros abre todo um campo de aplicações possíveis para além da industria da construção. As principais vantagens destes ligantes é apresentada na lista seguinte:

- Resistência térmica elevada até 1000 °C [14][22];
- Cura e endurecimento rápidos e passíveis de controlo [23];
- Elevada resistência mecânica [15];
- Elevada resistência a fenómenos de abrasão [24];
- Baixa condutividade térmica e baixa retração [25];
- Boa resistência a soluções ácidas e salinas [26];
- Fácil moldagem [14];
- Boa adesão a metais, materiais cerâmicos, substratos de cimento e vidro [27].

As possibilidades de aplicação dos geopolímeros é enorme, mas como se trata de uma tecnologia significativamente recente tem algumas limitações, mas com todo o desenvolvimento e pesquisa atual espera-se que a sua aplicação cresça exponencialmente. Os principais interessados na exploração dos geopolímeros são os países industrializados, porque a produção de geopolímeros pode ser uma forma de tratamento de resíduos tóxicos e radioativos.

Davidovits apresentou uma variedade de aplicações para os geopolímeros, desde da utilização em materiais de construção, pavimentos, materiais resistentes ao fogo, isolantes térmicos, decoração, cerâmicas, materiais refratários com alta resistência a choques térmicos, materiais de fundição, compósitos para interiores de carros e/ou aviões, servir como barreira de contenção de resíduos tóxicos e radioativos, entre outras aplicações [28].

Por sua vez Jaarsveld *et al.* investigaram amplamente a utilização de geopolímeros na imobilização de metais pesados e chegaram à seguinte lista de aplicações possíveis para os geopolímeros [29]:

- Barragens e estabilização de taludes;
- Cofragens de elementos estruturais simples;
- Superfícies impermeáveis para aterros ou reservatórios;
- Superfícies de cobertura para lixeiras com capacidade de resistência suficiente para suportar a ações inerentes;
- Reforço de tuneis para a segurança necessária na atividade mineira;
- Construções de superfícies estruturais como lajes e aplicação em estradas;
- Barreiras intermitentes horizontais em grandes massas de resíduos;
- Preenchimento de vazios em minas.

Os geopolímeros, apresentam-se como uma forte alternativa ao cimento Portland tanto por razões de comportamento mecânico e físico, mas também pelo facto de que a produção de geopolímeros não atinge os valores elevados de emissões de gases poluentes (CO_2) que se verificam na produção de cimento Portland, uma vez que para a produção de geopolímeros são (re)utilizados materiais naturais presentes na crosta terrestre [30].

2.5 Questões ambientais e incentivo à produção e utilização de materiais geopoliméricos

Os geopolímeros são usualmente conhecidos pela baixa taxa de emissões de CO_2 na sua produção, quando comparados com os valores das emissões da produção de cimento Portland, porém, num estudo recente foi analisado o ciclo de vida completo dos geopolímeros concluiu que a produção de silicato de sódio (ativador alcalino) faz com que estas tecnologias se aproximem no que diz respeito ao impacto ambiental [31]. Várias investigações levadas a cabo demonstram que a produção de geopolímeros tem um impacto menor no aquecimento global que a produção de cimento Portland, facto comprovado por Habert, todavia, o autor refere que a produção de geopolímeros apresenta um maior impacto ambiental por culpa dos grandes efeitos para o meio ambiente na produção de silicato de sódio. A origem dos precursores também tem influencia no impacto ambiental, já que para diferentes precursores são necessárias diferentes quantidades de silicato de sódio, ou seja, geopolímeros à base de cinzas volantes ou de escórias de alto forno, necessitam de uma quantidade menor de silicato de sódio para ativação alcalina quando comparados com geopolímeros à base de metacaulino, o que faz deles menos poluentes. Porém, se levarmos em conta o impacto ambiental provocado pela produção de cinzas volantes ou escórias de alto forno, os geopolímeros apresentam um impacto no aquecimento global similar quando comparado com a produção de cimento Portland [31].

OS geopolímeros são para Miranda muito atrativos pela possibilidade de serem obtidos a partir de resíduos industriais ricos em aluminossilicatos, já que estas matérias possuem uma grande resistência a ambientes agressivos e têm uma grande aderência no reforço de aço [32].

Esta tecnologia vai de encontro com a difícil tarefa de processar resíduos provenientes da indústria mineira, que são ricos em metais pesados e bastante prejudiciais ao meio ambiente. Estes resíduos são normalmente depositados em aterros, o que leva a uma poluição dos terrenos e como consequência disso uma poluição da rede de água potável subterrânea existente, que sofre com o aumento dos metais tóxicos. Mas este é apenas um de muitos problemas causados por este tratamento que tem sido dado aos resíduos industriais, posto isto, os geopolímeros, podem ser usados na resolução deste problema, já que a sua produção pode ser feita através da reciclagem de resíduos [33].

Apesar dos fatores que conduzem à formação dos geopolímeros não serem completamente conhecidos, as propriedades químicas e físicas, já conhecidas, concedem informação suficiente para afirmar que a sua matriz possui perfeita capacidade de imobilização de metais tóxicos [33].

De acordo com a literatura disponível e olhando para as propriedades físicas e químicas dos geopolímeros, pode-se afirmar que esta tecnologia possui uma grande potencialidade no que diz respeito ao processamento de resíduos.

2.6 Principais propriedades físicas e mecânicas

2.6.1 Resistência à compressão

A grande resistência à compressão é talvez a principal característica dos geopolímeros. Estes ligantes são capazes de atingir valores de resistência à compressão bastante elevados com apenas algumas horas de cura tal como afirma Davidovits. O autor afirma que com apenas quatro horas de cura estes ligantes são capazes de atingir 20 MPa. Esta capacidade de resistência à compressão é justificada pelo facto de os geopolímeros possuírem um mecanismo de formação semelhante aos zeólitos, o que lhes concede uma matriz semi-cristalina capaz de resistir a valores elevados de compressão [9].

Num estudo realizado por Nugterem *et al.* onde produziram e testaram geopolímeros à base de cinzas oriundas da combustão de carvão, registou valores médios de resistência à compressão, após 3 semanas, na ordem dos 87 MPa [34].

Palomo num estudo com objetivo de perceber a influência da cura e da razão ativador/precursor nas capacidades mecânicas dos geopolímeros produzidos com cinzas volantes, apresenta resultados da resistência à compressão após cinco horas de cura e a uma temperatura de 85 °C, de 60 MPa [16].

Por sua vez Chindaprasirt *et al.* realizaram uma investigação em torno de geopolímeros feitos a partir de cinzas volantes com diferentes razões de ativadores e para diferentes razões molares dos ativadores, por forma a testar a resistência à compressão e a trabalhabilidade destes geopolímeros e a influência das razões nestes resultados. Os resultados da resistência à compressão obtidos variaram de 10 a 65 MPa chegando à conclusão de que a razão silicato de sódio/hidróxido de sódio ideal era de 0,67 - 1,00 e a variação na concentração molar de hidróxido de sódio de 10 até 20 M não demonstra ter uma grande influência na resistência à compressão.

Já Vargas *et al.* realizaram um estudo à volta de geopolímeros à base de cinzas volantes ativadas com cálcio e hidróxido de sódio. Nesse estudo, o autor, realizou três misturas com razões CaO/precursor de 0,05, 0,15 e 0,25. Foram registados decréscimos da resistência à

compressão ao longo do tempo de cura para amostras com razão 0,15 e 0,25, consequência do excesso de cal presente nas misturas [35].

Torgal, estudou a resistência à compressão de geopolímeros produzidos a partir de lamas residuais das Minas da Panasqueira ativadas com hidróxido de sódio e hidróxido de cálcio, tendo registado uma resistência máxima á compressão de 90 MPa aos 56 dias de cura [11]. Por sua vez Xu Hua, afirma que a presença de potássio nos ligantes tem influência no aumento da resistência à compressão a longo prazo [36].

No geral e comparativamente com o cimento Portland, os geopolímeros têm excelentes capacidades mecânicas e físicas, registando valores muito altos de resistência á compressão, mesmo com poucas horas de cura, contudo é ainda necessário estudar melhor a influência da razão precursor/ativador, os ativadores e os precursores utilizados.

2.6.2 Resistência a ataques de ácidos

Os geopolímeros como apresentam uma matriz estrutural mais desenvolvida, faz com que estes possuam uma maior capacidade de resistir a ataques químicos quando comparados com o cimento Portland. Na tabela 2.1 podemos verificar que o cimento Portland, comparado com os geopolímeros, apresenta uma maior percentagem de matriz estrutural dissolvida, quando expostos ao efeito de ácido sulfúrico (H_2SO_4) e ácido clorídrico (HCl) [29].

Tabela 2.1 - Percentagem de matriz estrutural dissolvida pelo ácido [%] [29]

	H_2SO_4	HCl
Cimento Portland	95	78
Escórias	96	15
Ca-aluminita	30	50
Geopolímeros	7	6

A boa capacidade de imobilização de metais tóxicos e a tendência em reduzir a troca de iões de metais pesados contidos na estrutura, são fruto da boa resistência às ações de gelo e degelo dos geopolímeros [9]. Na figura 2.2 está representada a fixação que se dá nos iões de alumina (Al) e sílica (Si) no processo de geopolimerização [29].

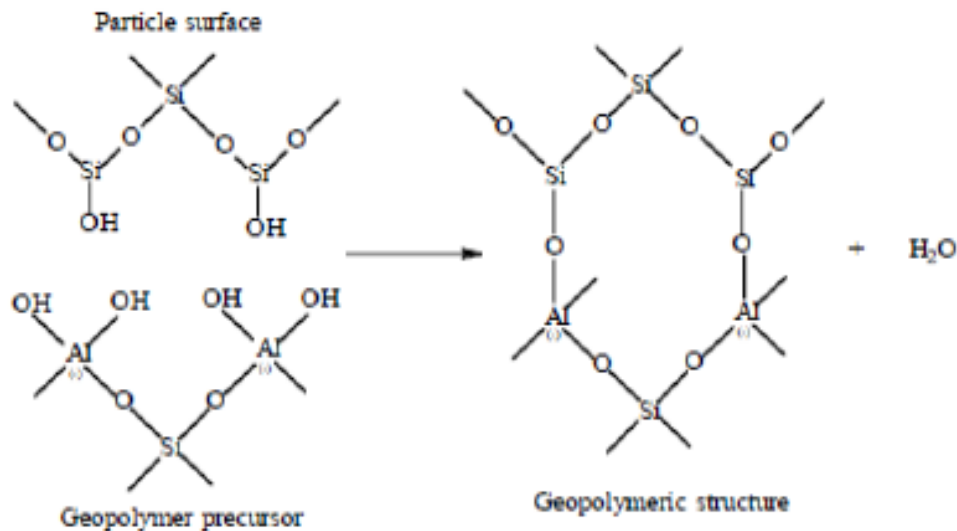


Figura 2.2 - Fixação da alumina e da sílica no processo de geopolimerização [29]

2.6.3 Resistência térmica

O interesse atual pelo estudo dos geopolímeros advém da necessidade de encontrar materiais com boas capacidades térmicas, resistentes ao fogo e não inflamáveis, após uma série de graves incêndios em França no ano de 1970, e foi iniciada pelo químico Joseph Davidovits. Segundo o mesmo, os geopolímeros apresentam estabilidade estrutural até temperaturas de 1250 °C [9].

Lyon *et al.* estudaram o comportamento de fibras reforçadas com geopolímeros quando expostas a uma radiação de 50 kW/m², radiação tipo de um fluxo de calor presente num incêndio. As fibras estiveram expostas ao fluxo de calor durante 60 minutos e não inflamaram nem libertaram fumo [22].

Segundo Kong, que estudou a performance de geopolímeros à base de metacaulino quando expostos a altas temperaturas, as amostras que tiveram uma cura a temperaturas a cima de 80 °C apresentaram uma boa performance quando expostos a altas temperaturas ao contrário das amostras que tiveram uma cura à temperatura ambiente [37].

2.7 Influência do tempo e temperatura de cura

A influência do tempo e da temperatura de cura é apontado por muitos autores como um fator importante no processo de geopolimerização e no desempenho dos geopolímeros. A temperatura de cura tem o efeito de acelerar o processo de geopolimerização, aumentando assim as capacidades mecânicas das misturas, porém, o excesso no aumento da temperatura de cura faz com que a mistura perca umidade rápido demais prejudicando a formação dos geopolímeros [38].

Existe uma variedade muito grande de estudos á volta desta temática e com uma panóplia de sugestões para a temperatura e tempo de cura ideal. Brough, testou escórias ativadas com silicato de sódio e obteve resultados crescentes da resistência à compressão, de 7 MPa para 42 MPa, com o aumento da temperatura de cura de 20 °C para 80 °C em doze horas de cura [39]. Já Thakur *et al.* afirmam que, a longo prazo, a durabilidade e o desempenho estão diretamente ligados a uma cura a temperaturas adequadas, sendo a temperatura ideal para se obter os valores máximos de resistência à compressão é de 85 °C [40]. Já Hardjito *et al.* indicam que a temperatura ideal de cura deve ser entre os 30 °C e os 90 °C com uma duração a variar de seis a noventa e seis horas [41].

Um fator que pode causar a perda de resistência dos ligantes de ativação alcalina é a perda de água provocada pela evaporação. Em amostras de produzidas com silicato como ativador, observa-se uma perda de resistência quando estas não são devidamente protegidas, facto que não acontece com amostras produzidas apenas com hidróxido de sódio como ativador [11].

Por sua vez Fernandez-Jimenez *et al.*, testaram a influência da temperatura na cura de argamassas produzidas com ativadores diferentes. Quando é utilizado como ativador um composto de silicato e hidróxido de sódio, os ligantes obtidos por ativação alcalina de escórias apresentam uma perda de resistência com o aumento da temperatura de cura, porém quando é utilizado com ativador uma solução simples de hidróxido ou carbonato de sódio os resultados são os opostos, apresentando um aumento da resistência com o aumento da temperatura [21].

3 Materiais e métodos

3.1 Programa experimental

O programa experimental está definido em três fases sendo:

- Fase 1 - Caracterização dos materiais;
- Fase 2 - Produção das amostras;
- Fase 3 - Realização dos ensaios.

Inicialmente, realizou-se a caracterização dos materiais necessários para a produção das misturas em estudo. Posteriormente fez-se a caracterização química dos precursores através de um ensaio de energia dispersa de raio-X assim como da caracterização química dos ativadores que foi feita recorrendo às fichas técnicas disponibilizadas pelos fornecedores e que podem ser encontradas no laboratório de materiais do DECA-UBI. As amostras em estudo foram todas produzidas utilizando lamas residuais, vidro moído e/ou metacaulino como ativadores alcalinos e também hidróxido de sódio e silicato de sódio como ativadores das misturas.

Após feito o processamento dos materiais passou-se à produção das amostras. Foram realizadas misturas com diferentes composições e percentagens de lamas residuais. Após a cura, foram feitos ensaios mecânicos para determinar a resistência à compressão das amostras, antes e depois de expostas a altas temperaturas, bem como a sua perda de massa a altas temperaturas através da análise termogravimétrica.

3.2 Caracterização dos materiais precursores

Este estudo incide principalmente sobre lamas residuais das minas da Panasqueira, no entanto para melhorar e corrigir a composição química das lamas, foram adicionados vidro moído e metacaulino para agirem como precursores. A inclusão do vidro moído e do metacaulino é justificada pela adição de óxido de silício (SiO_2) à mistura melhorando assim a sua ativação alcalina [42].

O tamanho das partículas usadas neste trabalho foi de $500 \mu m$ para as lamas residuais e o vidro moído, tendo sido necessário proceder à moagem dos materiais e posterior peneiração. Para isso foi usado no processo de moagem uma betoneira, instalada no exterior do laboratório de materiais do DECA-UBI, com algumas esferas de ferro no seu interior, tal como se mostra na figura 3.1, simulando com isso o moinho de bolas que é o equipamento normalmente utilizado

neste tipo de processo, mas que para a quantidade de material que foi necessário utilizar demoraria muito mais tempo.



Figura 3.1 - Betoneira para moagem e misturação das lamas e vidro

A título de exemplo, apresenta-se na figura 3.2 o resultado da moagem do vidro. Após a moagem é necessário proceder à peneiração.

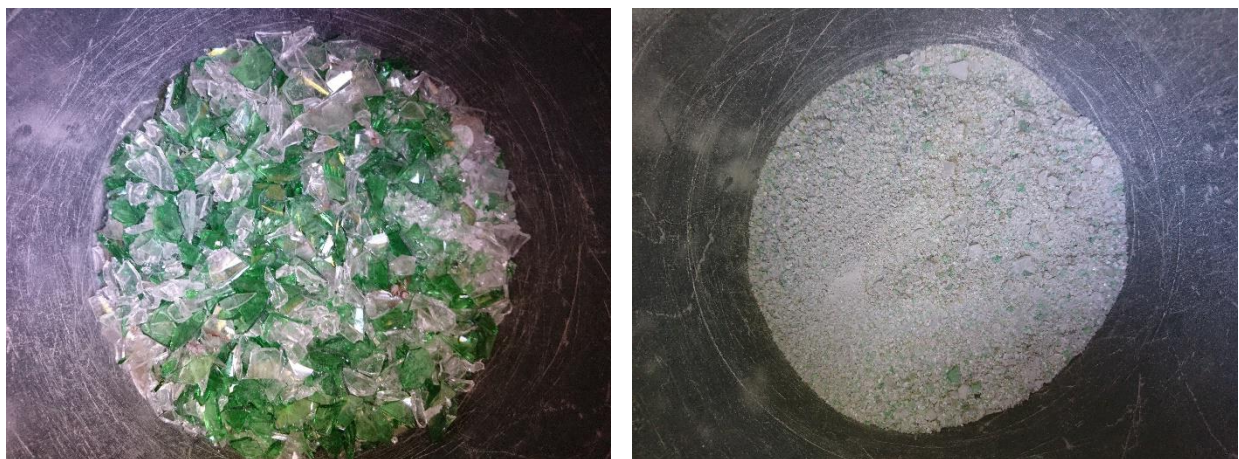


Figura 3.2 - Resultado da moagem do vidro

3.2.1 Lamas das minas da Panasqueira

As lamas residuais utilizadas são resultado da exploração mineira das minas da Panasqueira localizadas entre o cabeço do Pião (concelho do Fundão) e a aldeia da Panasqueira (concelho da Covilhã), pertencentes ao concelho da Covilhã.

Esta exploração mineira teve início no ano de 1898, sendo o volfrâmio o impulsionador desta atividade. As minas da Panasqueira viriam a tornar-se mundialmente famosas já que o volfrâmio é um mineral conhecido por ajudar no endurecimento do aço e graças a isso as estas minas

atingiram o seu auge durante as grandes guerras (1ª Guerra Mundial de 1914 a 1918, 2ª Guerra Mundial de 1939 a 1945 e também na Guerra da Coreia de 1950 a 1953) [43].

Hoje em dia as minas não apresentam os mesmos resultados que há alguns anos atrás, contudo ainda são extraídos cerca de 300 mil toneladas/ano de agregados, o que gera cerca de 30 mil toneladas/ano de lamas residuais sem qualquer tipo de aproveitamento. As lamas residuais das minas da Panasqueira, têm dimensões semelhantes a uma areia fina como se pode ver na figura 3.3.

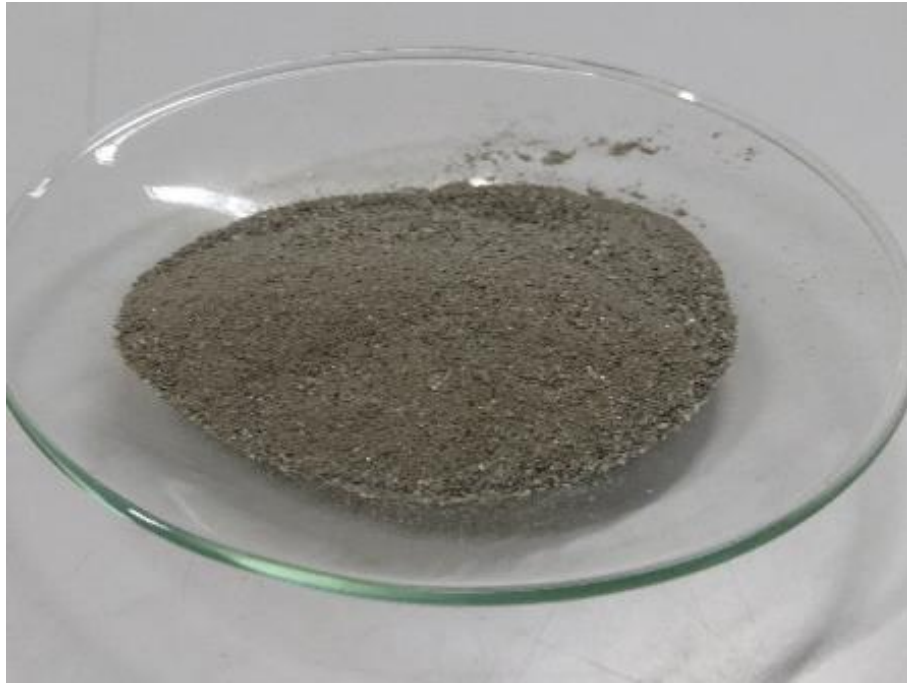


Figura 3.3 - Lamas residuais das Minas da Panasqueira [500 μ m]

3.2.1.1 Composição química

A determinação da composição química das lamas residuais das minas da Panasqueira, foi feita através do ensaio SEM/EDX, energia dispersa de raio-X. Nas tabelas 3.1 e 3.2 são apresentados os resultados do estudo da composição química das lamas resíduas das minas da Panasqueira. Estas lamas são essencialmente compostas por silício, alumina, potássio e ferro, fazendo destas lamas um excelente ligante alcalino.

Tabela 3.1 - Composição química elementar das lamas residuais [%]

 Materiais	
Al	10,50
As	1,25
Ca	0,62
Cu	0,26
Fe	7,71
K	4,06
Na	0,99
P	0,12
S	1,90
Si	25,28
Ti	0,46
Zn	0,57

Em termos de óxidos, estas lamas, são fundamentalmente constituídas por óxido de silício (SiO_2) e uma considerável percentagem de óxido de alumínio (Al_2O_3) e óxido de ferro (Fe_2O_3).

Tabela 3.2 - Composição química em percentagem de óxidos das lamas residuais

Óxidos	
Al_2O_3	14,56
CaO	0,86
Cu_2O	0,21
Fe_2O_3	8,09
K_2O	3,59
Na_2O	0,98
P_2O_3	0,16
SiO_2	39,70
SO_3	3,48
TiO_2	0,77
ZnO	0,52

3.2.1.2 Análise microscópica

A análise microscópica das lamas residuais foi realizada no centro de ótica da Universidade da Beira Interior, através de ensaios MEV. A morfologia das lamas residuais é apresentada na figura 3.2. Como se pode observar, as lamas residuais apresentam fundamentalmente partículas de formato arredondado de diversas dimensões. São também visíveis algumas partículas com um formato mais alongado.



Figura 3.4 - Imagem microscópica das lamas residuais [100 μ m]

3.2.2 Vidro moído

O vidro usado neste estudo resulta da reciclagem de garrafas de vidro com 3 tipos de coloração diferente: incolor, âmbar e verde. Todas as garrafas foram devidamente lavadas sendo-lhes retirados os rótulos, cola e/ou qualquer outro material que pudesse interferir na formação do pó de vidro. Posteriormente, as garrafas foram quebradas e moídas, até se obter uma mistura uniforme dos vários vidros, utilizando uma betoneira com esferas de ferro no interior para o efeito, tal como foi referido no ponto 3.2, resultando no pó de vidro apresentado na figura 3.5.



Figura 3.5 - Vidro moído [500 μm]

3.2.2.1 Composição química

Para a determinação da composição química do vidro foi utilizada a mesma metodologia das lamas residuais, ou seja, foi feita através do SEM/EDX. Nas tabelas 3.3 e 3.4 são apresentados os resultados do estudo da composição química do vidro. O vidro moído apresenta uma elevada percentagem de silício, existindo também uma boa percentagem de cálcio e sódio na sua composição.

*Tabela 3.3 - Composição química elementar
do vidro moído [%]*

Materiais	Vidro moído
Al	1,37
Ca	8,79
Cr	0,09
Fe	1,14
K	0,81
Mg	0,45
Na	10,89
S	0,18
Si	31,09

No que diz respeito aos óxidos, o vidro moído é basicamente constituído por óxido de silício (SiO_2), tendo também uma considerável percentagem de óxido de cálcio (CaO) e óxido de sódio (Na_2O).

*Tabela 3.4 - Composição química em percentagem
de óxidos do vidro moído*

Óxidos	
Al_2O_3	2,39
CaO	11,33
Cr_2O_3	0,14
Fe_2O_3	1,50
K_2O	0,90
MgO	0,68
Na_2O	13,52
SiO_2	61,29
SO_3	0,41

3.2.2.2 Análise microscópica

A análise microscópica do vidro moído foi realizada no centro de ótica da Universidade da Beira Interior, através o ensaio MEV. Na figura 3.4 está representado o resultado do ensaio, onde se observou que as partículas apresentam formas irregulares e pontiagudas. Observou-se também, que existe um agrupamento das partículas de menores dimensões.

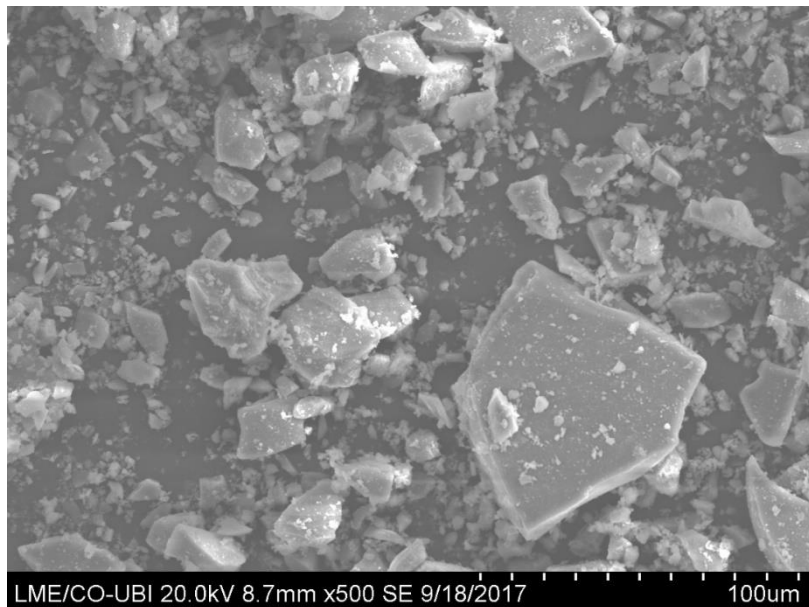


Figura 3.6 - - Imagem microscópica do vidro moído [100 μ m]

3.2.3 Metacaulino

O metacaulino (figura 3.7) utilizado foi fornecido pela empresa BASF e resulta da calcinização do caulino a temperaturas de cerca 750 °C. Em geral apresenta partículas com tamanho inferior a 5 μm .



Figura 3.7 - Metacaulino

3.2.3.1 Composição química

Para a determinação da composição química do metacaulino foi utilizada a mesma metodologia mencionada anteriormente nos pontos 3.2.1.1. e 3.2.2.1.. Nas tabelas 3.5 e 3.6 são apresentados os resultados do estudo da composição química do metacaulino. O metacaulino é fundamentalmente composto por alumina e silício.

Tabela 3.5 - Composição química elementar do metacaulino [%]

Materiais	Metacaulino
Al	24,18
Cu	0,19
Fe	1,04
K	0,85
Mg	0,26
Ni	0,21
Si	22,92
Ti	1,12

Quanto aos óxidos, o metacaulino é basicamente constituído por óxido de silício (SiO_2) e óxido de alumínio (Al_2O_3) já estes dois correspondem a quase 90% da composição do metacaulino.

Tabela 3.6 - Composição química em percentagem

de óxidos do metacaulino

Óxidos	Lamas residuais
Al_2O_3	43,53
Cu_2O	0,20
Fe_2O_3	1,39
K_2O	0,95
MgO	0,40
NiO	0,25
SiO_2	45,64
TiO_2	1,74

3.2.3.2 Análise microscópica

A análise microscópica do metacaulino, foi realizada no centro de ótica da Universidade da Beira Interior, através do ensaio MEV. Na figura 3.6 está representado o resultado do ensaio, onde se observou que o tamanho das partículas é significativamente menor quando comparado com os resultados das lamas residuais e do vidro moído. As partículas apresentam, na sua grande maioria, uma forma arredondada, contudo existem pequenas partículas com forma um pouco mais alongada. De referir que as partículas se apresentam bastante agrupadas, quando comparadas com as lamas residuais e o vidro moído, por terem um tamanho muito pequeno e não se consegue dispersá-las.

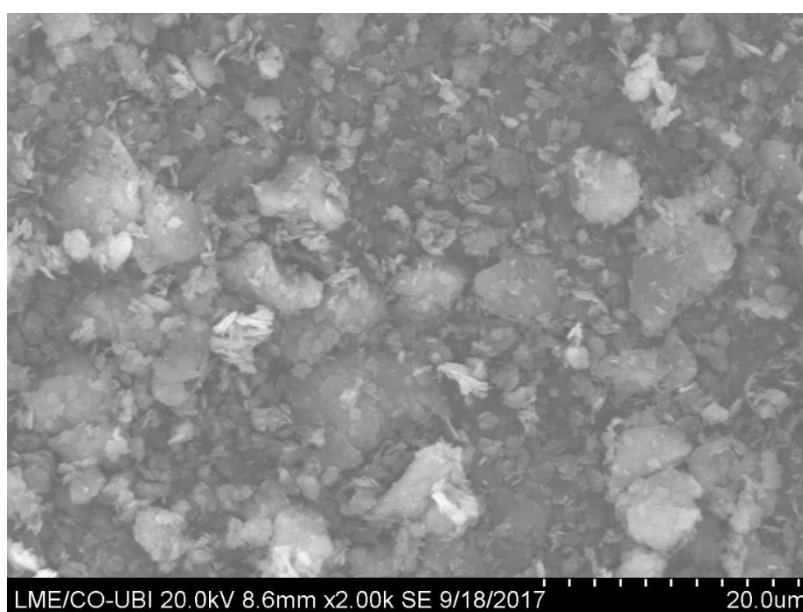


Figura 3.8 - Imagem microscópica do metacaulino [20 μm]

3.3 Caracterização dos materiais ativadores

Todas as misturas foram produzidas utilizando como ativadores alcalinos o hidróxido de sódio e o silicato de sódio.

3.3.1 Silicato de sódio

O silicato de sódio utilizado foi fornecido por ESNOVA cuja composição química pode ser consultada no laboratório de materiais do DECA-UBI. Este silicato apresenta uma coloração ligeiramente amarelada e um peso específico de $1,5725 \text{ g/dm}^3$.

3.3.2 Hidróxido de sódio

O hidróxido de sódio utilizado para a produção das misturas foi fornecido por José Manuel Gomes dos Santos, Lda em forma de granulado sendo feitas as soluções de hidróxido de sódio no laboratório com uma concentração de 10M. O hidróxido de sódio utilizado apresentava uma pureza de 98,6% pelo que foi necessário fazer uns pequenos cálculos para chegar à quantidade certa de *NaOH* necessário para 1 litro de solução, de modo a que a solução final tivesse 10M. Para isso recorreu-se às seguintes equações:

$$C = \frac{n}{V} \leftrightarrow n = C \times V$$

$$n = \frac{m}{M} \leftrightarrow m = n \times M$$

Substituindo o volume (V) por 1 dm^3 e a massa molar (M) do *NaOH* por 40 g/mol chegou-se a:

$$C = \frac{n}{V} \leftrightarrow n = 10 \times 1 = 10 \text{ mol de NaOH}$$

$$n = \frac{m}{M} \leftrightarrow m = 10 \times 40 = 400 \text{ g de NaOH}$$

Estes 400 g de *NaOH* seriam para uma pureza de 100%, como o *NaOH* utilizado tinha uma pureza de 97,5% foi necessário fazer uma pequena correção:

$$n = \frac{100 \times 400}{98,6} \leftrightarrow n = 405,68 \text{ g de NaOH}$$

Posto isto, foram colocadas as 405,68 g de *NaOH* juntamente com 800 ml de água destilada num copo de vidro e colocou-se um agitador magnético para se poder fazer a mistura da solução até esta ficar incolor. Posteriormente a solução foi colocada num balão volumétrico e deixou-se arrefecer. Por fim, foi adicionada água destilada até se atingir os 1000 ml do balão volumétrico.



Figura 3.9 - Processo de produção da solução de hidróxido de sódio (mistura com agitador e colocação em balão de vidro)

3.4 Definição das misturas em estudo

Foram produzidas 15 misturas com diferentes composições e percentagens de lamas residuais, vidro moído e metacaulino. Foi também utilizada, como agregado, cortiça expandida. Na tabela 3.7 estão apresentadas todas as misturas e a sua composição.

O nome de cada mistura tem por base a sua composição, por exemplo a mistura 80MD-10GL-10MK é composta por 80% de lamas residuais, 10% de vidro moído e 10% de metacaulino. Todas as outras misturas seguem esta lógica sendo que as siglas MD, GL, MK e C significam lamas, vidro, metacaulino e cortiça, respetivamente.

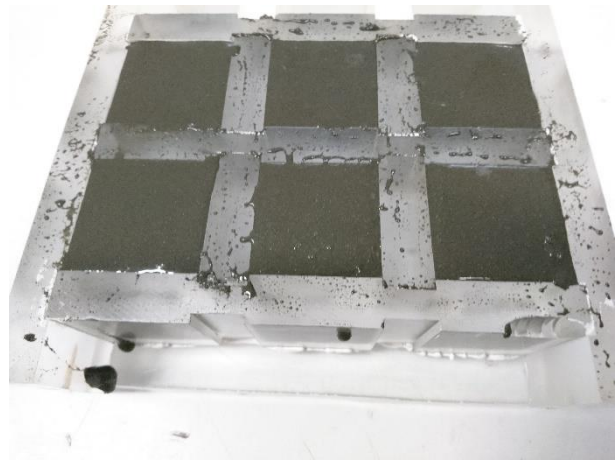


Figura 3.10 - Pasta de lamas residuais com vidro moído e colocação nos provetes

Tabela 3.7 - Composição das misturas

Mistura	Precusores (g)			Ativadores (g)		Agregados (g)
	Lamas residuais	Vidro moído	Metacaulino	Silicato de sódio	Hidróxido de sódio	Cortiça
100MD	4437,85	-	-	1167,86	389,29	-
100GL	-	2190,93	-	576,56	192,19	-
100MK	-	-	2278,03	1553,20	517,73	-
80MD-10GL-10MK	2144,69	219,09	227,80	682,00	227,33	-
80MD-20GL	2309,66	471,89	-	731,99	244,00	-
80MD-20MK	2309,66	-	490,65	736,93	245,64	-
60MD-20GL-20MK	1633,26	444,93	462,62	668,63	222,88	-
55MD-27GL-18MK	1497,16	600,65	416,35	661,62	220,54	-
50MD-25GL-25MK	1391,99	568,80	591,41	671,63	223,88	-
50GL-50MK	-	1137,60	1182,83	812,33	255,93	-
80MD-10GL-10MK-10C	2004,46	204,77	212,91	637,40	212,47	11,34
80MD-10GL-10MK-20C	1742,15	177,97	185,05	553,99	184,66	22,18
60MD-20GL-20MK-10C	1469,94	400,44	416,35	601,77	200,59	11,09
55MD-27GL-18MK-10C	1347,44	540,59	374,72	595,46	198,49	11,09
55MD-27GL-18MK-20C	1197,73	480,52	333,08	529,30	176,43	22,18

Todas as misturas foram produzidas com uma razão precursor/ativador de 2,85 à exceção das misturas 100MK e 50GL-50MK que foram produzidas com uma razão precursor/ativador de 1,1 e 2,17, respetivamente. Houve a necessidade de alterar estas razões devido à finura do metacaulino o que faz com que haja uma maior absorção dos ativadores e consequentemente uma menor trabalhabilidade das misturas. Estas razões foram obtidas experimentalmente por tentativa e erro até se chegar a uma mistura homogénea, com boa consistência e boa trabalhabilidade, ou seja, não apresenta excesso de água e com alguma fluidez.

3.5 Ensaios de caracterização das misturas

O principal objetivo deste estudo foi analisar a resistência à compressão das misturas antes e após estas serem expostas a altas temperaturas e fazer a comparação com um betão de cimento Portland. Foram também feitos ensaios de termografia, por forma a analisar as perdas de massa das misturas quando expostas a altas temperaturas. Por fim, fez-se uma pequena análise ao comportamento das misturas quando expostas a altas temperaturas e a ataques químicos.

3.5.1 Resistência à compressão

Os ensaios de resistência à compressão foram realizados no laboratório de materiais da Universidade da Beira Interior recorrendo a uma prensa hidráulica ELE 3000kN (figura 3.11). A resistência foi obtida em provetes cúbicos com dimensões $40 \times 40 \times 40 \text{ mm}^3$, pelo que foi necessário utilizar um acessório para provetes pequenos. O valor da resistência à compressão (σ) é calculado pela razão entre a carga máxima aplicada no provete (F) e a área de contacto do provete (A) com a prensa e a sua unidade é o *MPa*.

$$\sigma = \frac{F}{A} \text{ [MPa]}$$



Figura 3.11 - Prensa hidráulica ELE 3000kN e exemplo de teste de compressão

3.5.2 Regime de cura

A cura das misturas foi feita em 2 fases distintas. Numa primeira fase as misturas foram colocadas numa estufa (figura 3.12), durante 24 horas, a cerca de 60 °C. Após as 24 horas os provetes foram retirados dos moldes ficando a curar à temperatura ambiente até atingirem os 7 dias de idade e serem assim sujeitos aos ensaios definidos.



Figura 3.12 - Cura dos provetes em estufa a 60 °C

3.5.3 Análise termogravimétrica (TGA)

A análise termogravimétrica ou TGA (*Thermogravimetric analysis*) tem como objetivo analisar as perdas de massa de cada amostra, quando sujeitas a altas temperaturas. Neste caso o equipamento utilizado foi o TGA Q50 (fig. 3.13) que se encontra no laboratório de materiais da Universidade da Beira Interior. Este ensaio consiste em pegar numa quantidade bem pequena de pó da amostra, entre 5-8 mg, e expor esse pó a uma temperatura crescente até atingir os 1000 °C, com um incremento de temperatura de 20 °C/min. No final os resultados vêm sobre a forma de gráfico onde é analisada a perda total de massa, bem como as variações de massa ao longo do tempo.



Figura 3.13 - Equipamento TGA Q50 com amostra de lama no cadinho

3.5.4 Cup test

Por forma a avaliar o comportamento das misturas quando expostas a ação de químicos, fizeram-se provetes com dimensões $100 \times 100 \times 60 \text{ mm}^3$ com um buraco troncocónico de 40 mm na base e 50 mm na superfície do provete (fig. 3.13). Foram também feitos provetes com dimensões $100 \times 100 \times 25 \text{ mm}^3$. Após curados de acordo com o ponto 3.5.2., e seguindo a norma ASTM C454, com algumas alterações, foi colocada uma mistura de carbonato de potássio (K_2CO_3) granulado no buraco de cada provete. Em seguida tapou-se o buraco dos provetes, utilizando para isso uma massa refratária da Den Braven como ligante dos 2 corpos, e deixou-se curar a argamassa na estufa durante 24 horas a uma temperatura de cerca de $60 \text{ }^\circ\text{C}$. Após a cura da argamassa, colocou-se o provete no forno estático (mufla - figura 3.14) a uma temperatura crescente até atingir os $800 \text{ }^\circ\text{C}$, com um incremento de temperatura de $200 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ durante 5 horas. Após o termino do ciclo, o provete teve um arrefecimento natural dentro da mufla até atingir os $100 \text{ }^\circ\text{C}$, sendo posteriormente retirado e colocado à temperatura ambiente para ter um arrefecimento mais rápido. Assim que o provete atingiu a temperatura ambiente, foi cortado e analisado o seu estado de degradação.

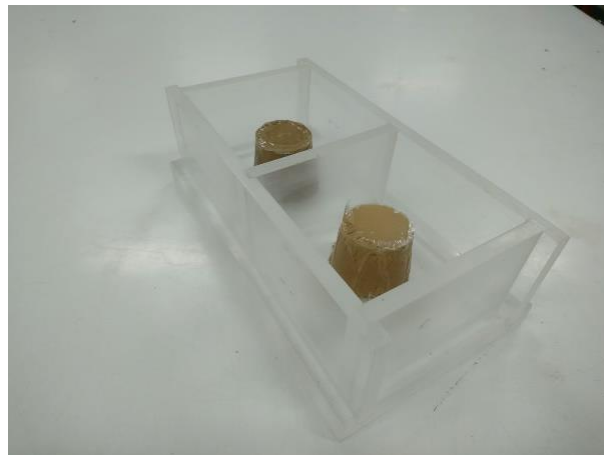


Figura 3.14 - Molde do cup test



Figura 3.15 - Forno estático ou mufla

4 - Resultados

4.1 Resistência à compressão aos 7 dias

Como referido anteriormente no Capítulo 3, a resistência à compressão foi analisada em provetes de dimensões 40 x 40 x 40 mm³ (seis provetes de cada mistura) e foi analisada em 2 fases. Numa primeira fase foram testados e analisados os provetes com 7 dias de cura cujos resultados são apresentados na fig. 4.1.

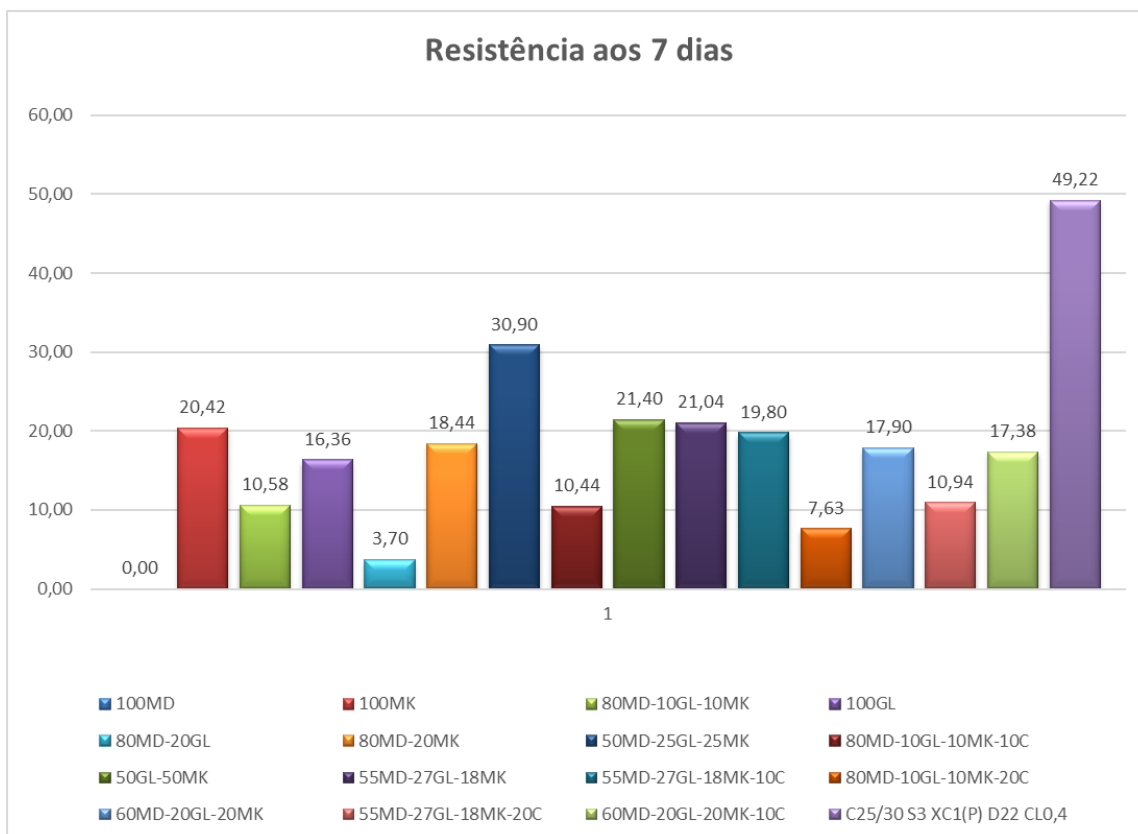


Figura 4.1 - Resistência à compressão aos 7 dias [MPa]

As misturas tiveram comportamentos bem diferentes no que diz respeito à resistência à compressão, mas todos os provetes apresentaram uma rotura típica. Na fig. 4.2, apresenta-se a rotura típica no provete 100MK onde a forma de cone invertido foi mais evidente.

Como se observa na fig. 4.1, a mistura 100MD não apresentou qualquer resistência à compressão, dado que pode ser justificado pelo facto de a mistura não ter reagido completamente. Por outro lado, foi registada uma resistência à compressão máxima de 30,90 MPa na mistura 50MD-25GL-25MK, sendo ainda a resistência média registada de 15,13 MPa.



Figura 4.2 - Rotura típica após ensaio de resistência à compressão da mistura 100MK

4.2 Resistência à compressão após exposição a 800 °C

Na segunda fase, foram testados e analisados os provetes expostos a altas temperaturas e cujos resultados dos ensaios de compressão se apresentam na fig. 4.3. Ao contrário do que aconteceu com os provetes testados aos 7 dias, estes não obtiveram todos uma rotura típica tão evidente sendo que em alguns dos casos houve destruição completa dos provetes, como é o caso das misturas 100MK e 50GL-50MK, como se ilustra nas fig. 4.4 e 4.5 respetivamente.

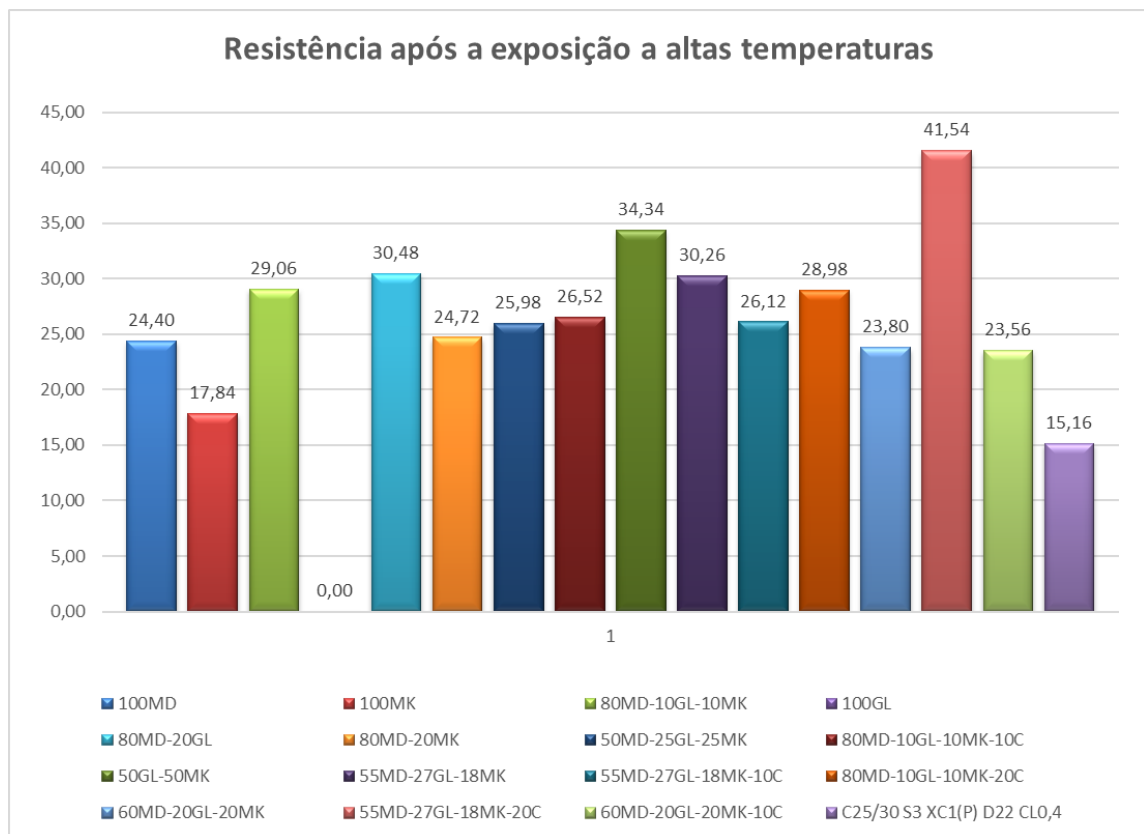


Figura 4.3 - Resistência à compressão após exposição a 800 °C [MPa]

A mistura 100GL após a exposição a altas temperaturas teve uma alteração na sua forma e coloração (fig. 4.6) o que impossibilitou a realização dos ensaios de resistência à compressão, daí o valor de 0,00 MPa. Nesta fase, registou-se um valor de resistência à compressão máximo de 34,34 MPa na mistura 50GL-50MK sendo a resistência média à compressão de 25,84 MPa.



Figura 4.4 - Rotura após exposição a altas temperaturas da mistura 100MK



Figura 4.5 - Rotura após exposição a altas temperaturas da mistura 50GL-50MK

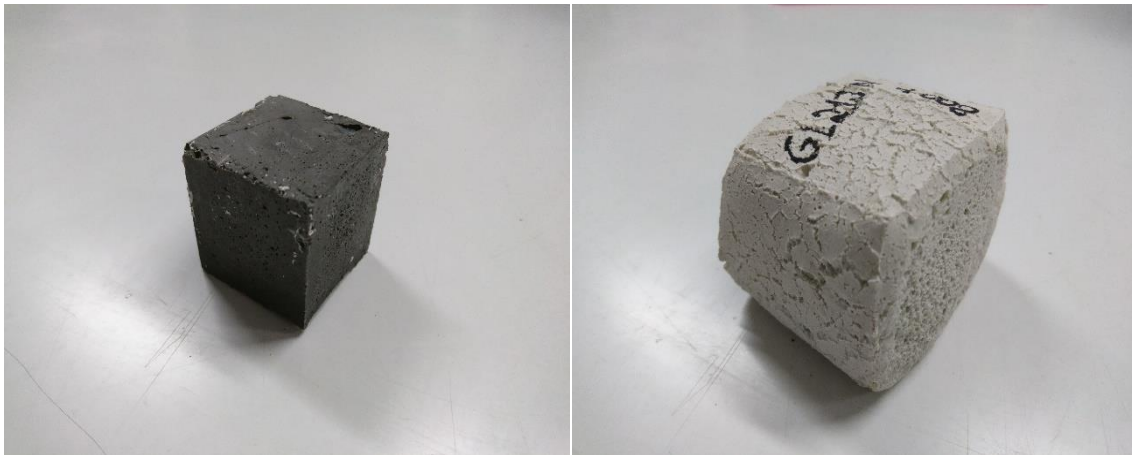


Figura 4.6 - Alteração dos provetes de 100GL

4.3 Análise termogravimétrica (TGA)

4.3.1 Análise de ensaios

Lamas residuais

Na figura 4.7 está representado o ensaio TGA-DTG das lamas residuais. Observou-se que a massa se manteve praticamente constante até aos 418,28 °C momento em que houve uma queda repentina da massa da amostra. O maior pico de perda de massa foi registado aos 552,70 °C, tal como se pode observar no DTG, o que pode, eventualmente, corresponder à evaporação da água quimicamente ligada ao cálcio presente na mistura, numa ligação do tipo $CaCO_3 \cdot H_2O$. A amostra final apresentou uma massa de 94,27% da massa total inicial.

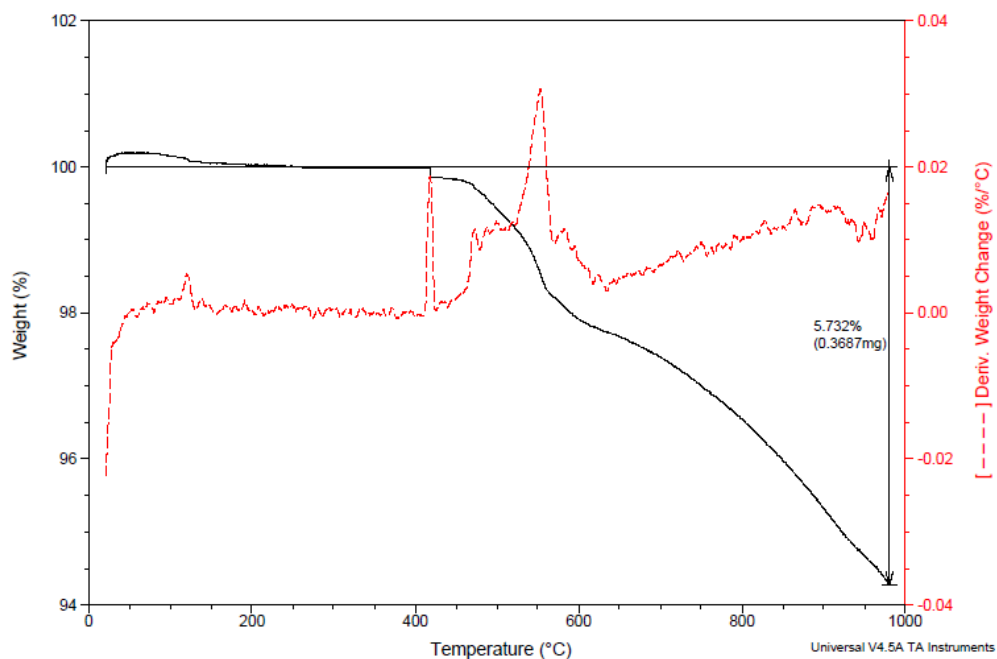


Figura 4.7 - Resultado do ensaio de termogravimetria às lamas residuais

Metacaulino

Na figura 4.8 está representado o ensaio TGA-DTG do metacaulino, onde se observou um ligeiro aumento da massa inicial até os 45,85 °C momento em que a perda de massa teve o seu início. As perdas de massa foram regulares ao longo do tempo, chegando ao final com uma perda de massa total de 1,76%. De referir que esta foi a amostra onde se obteve a menor perda de massa, fenómeno que é facilmente explicado pelo facto do metacaulino já ter sofrido tratamento térmico.

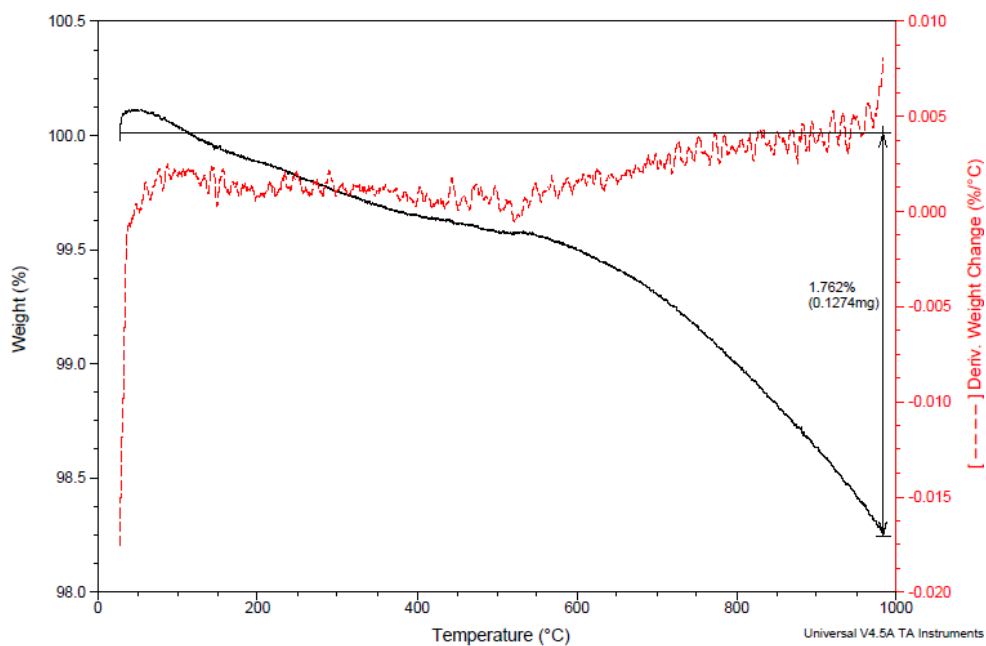


Figura 4.8 - Resultado do ensaio de termogravimetria ao metacaulino

100MD

Na figura 4.9 apresenta-se o resultado do ensaio TGA-DTG da mistura 100MD. Observou-se uma queda da massa inicial até cerca dos 150 °C que pode ser atribuída à decomposição de estruturas de compostos do tipo etringita ($Ca-Al-H_2O$) onde é libertada a água quimicamente ligada com os elementos Al e Ca, ou outros. Após a perda de água, a massa manteve-se aproximadamente constante até perto dos 750 °C onde se dá uma nova queda acentuada da massa. Através da curva DTG, observaram-se 3 momentos importantes de alteração de massa. O primeiro momento já foi referido anteriormente e diz respeito à perda de água quimicamente ligada aos elementos Al e Ca e teve o seu pico aos 80,86 °C. Em seguida registou-se outro pico aos 531,82 °C, que é atribuído à eventual evaporação de água quimicamente ligada ao cálcio presente na mistura, numa ligação do tipo $CaCO_3.H_2O$, e por fim o terceiro pico foi registado aos 871,34 °C, atribuído à decomposição do carbonato de cálcio ($CaCO_3$). No final foi registada uma perda total de 7,99%.

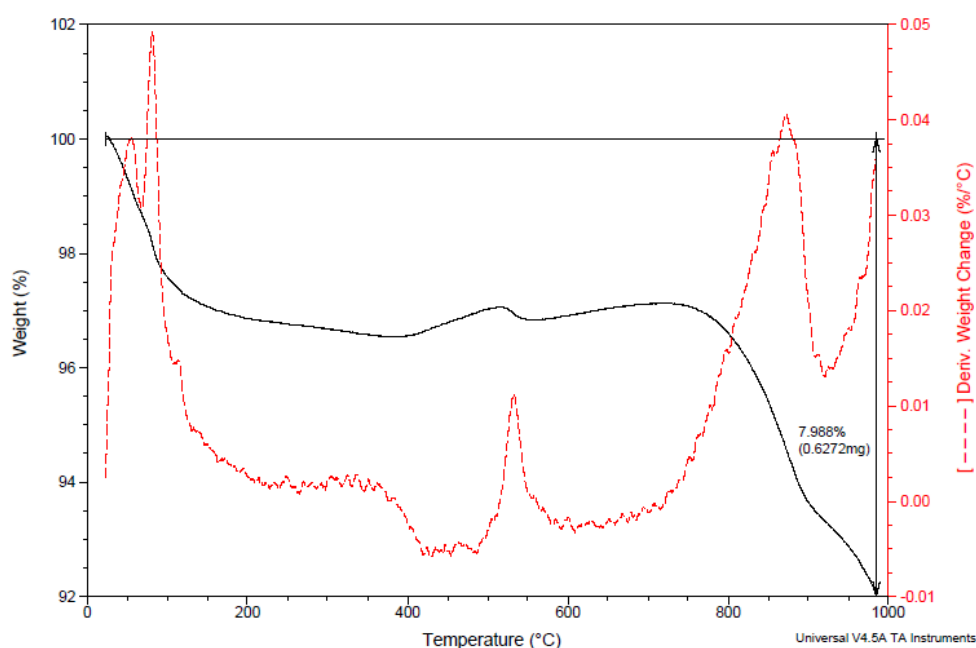
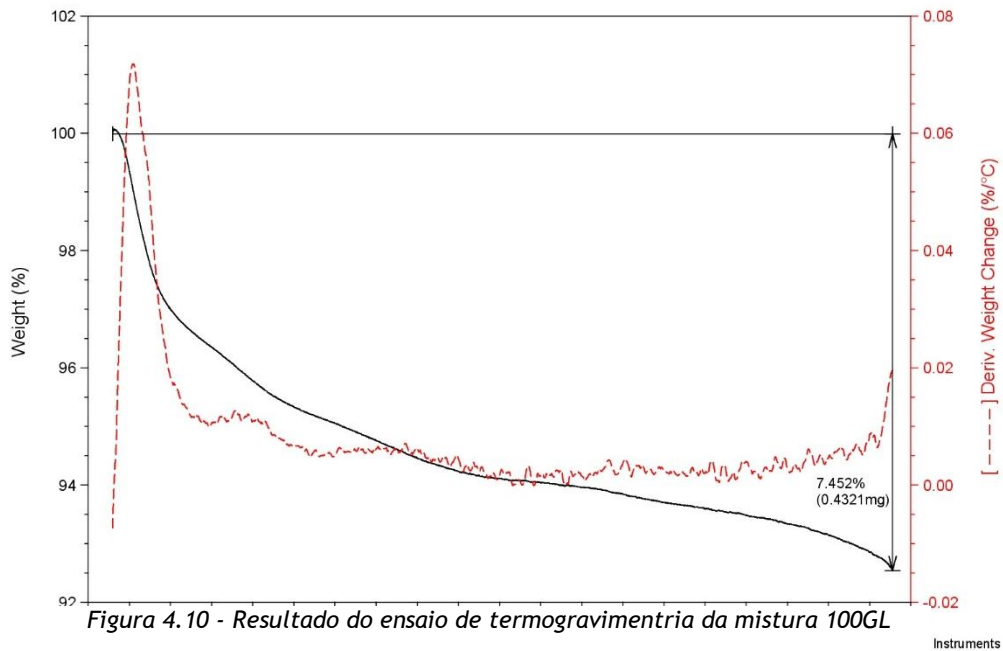


Figura 4.9 - Resultado do ensaio de termogravimetria da mistura 100MD

A análise termogravimétrica das amostras 100GL, 100MK, 80MD-10GL-10MK, 80MD-20GL, 80MD-20MK, 60MD-20GL-20MK, 55MD-27GL-18MK, 50MD-25GL-25MK, 50MD-50MK, 80MD-10GL-10MK-10C, 80MD-10GL-10MK-20C, 60MD-20GL-20MK-10C, 55MD-27GL-18MK-10C e 55MD-27GL-18MK-20C são apresentados nas figuras 4.10, 4.11, 4.12, 4.13, 4.14, 4.15, 4.16, 4.17, 4.18, 4.19, 4.20, 4.21, 4.22 e 4.23, respetivamente. Verificaram-se perdas de massa, nos mesmos intervalos de temperatura da amostra 100MD representada na figura 4.9, ou seja, as explicações das possíveis perdas destas amostras são as mesmas anteriormente dadas na amostra 100MD.

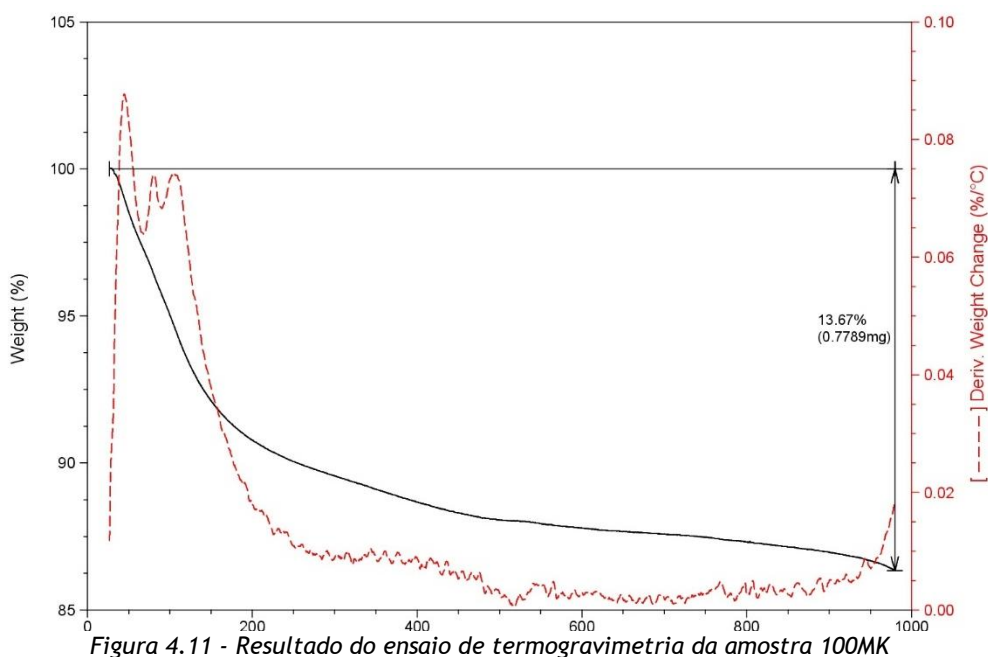
100GL

Na figura 4.10 está representado o resultado da termogravimetria da amostra 100GL, onde se observou uma acentuada queda de massa até perto dos 465 °C. Após esta perda inicial as perdas de massa foram menos acentuadas. No total registou-se uma perda 7,46%.



100MK

Na figura 4.11 está representado o resultado da termogravimetria da amostra 100MK, onde se observou uma acentuada queda de massa até perto dos 475 °C. Após esta perda inicial as perdas de massa foram menos acentuadas. No total registou-se uma perda de 10,80%.



80MD-10GL-10MK; 80MD-10GL-10MK-10C; 80MD-10GL-10MK-20C

Nas figura 4.12, 4.13 e 4.14 estão representados os resultados das termogravimetrias das amostras 80MD-10GL-10MK, 80MD-10GL-10MK-10C e 80MD-10GL-10MK-20C, respetivamente. Optou-se por se fazer uma análise conjunta por serem misturas semelhantes sendo a única diferença a presença de aglomerado de cortiça. Observou-se queda inicial da massa até cerca dos 125 °C. Entre os 125 °C e os 500 °C as perdas foram praticamente constantes. No intervalo 450 °C a 550 °C deu-se um pico de perda. As perdas totais foram de 11,08%, 8,69% e 8,86%, respetivamente.

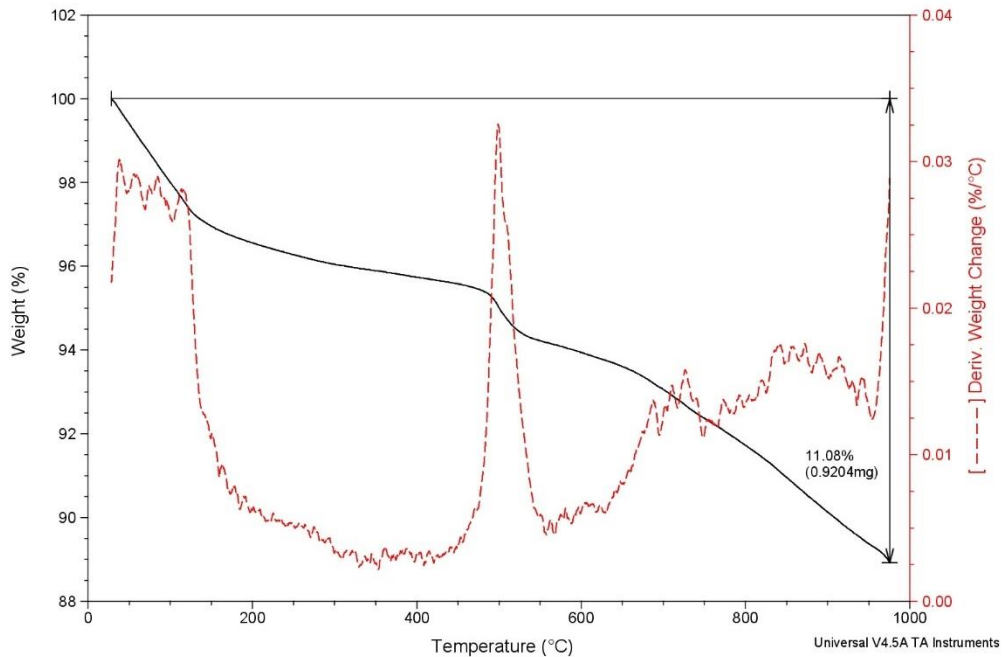


Figura 4.13 - Resultado do ensaio de termogravimetria da amostra 80MD-10GL-10MK

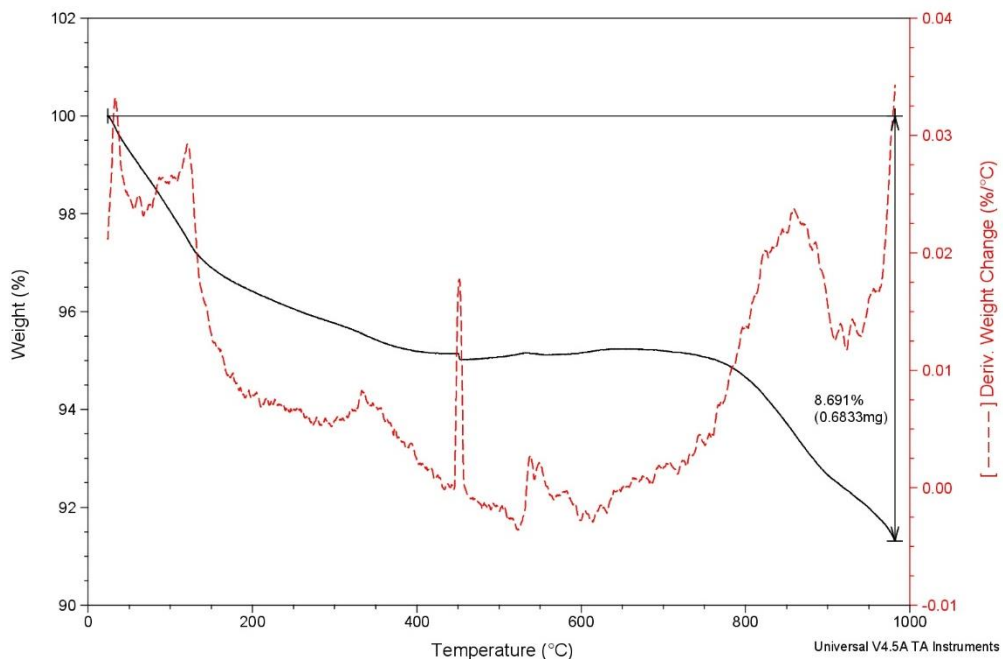


Figura 4.12 - Resultado do ensaio de termogravimetria da amostra 80MD-10GL-10MK-10C

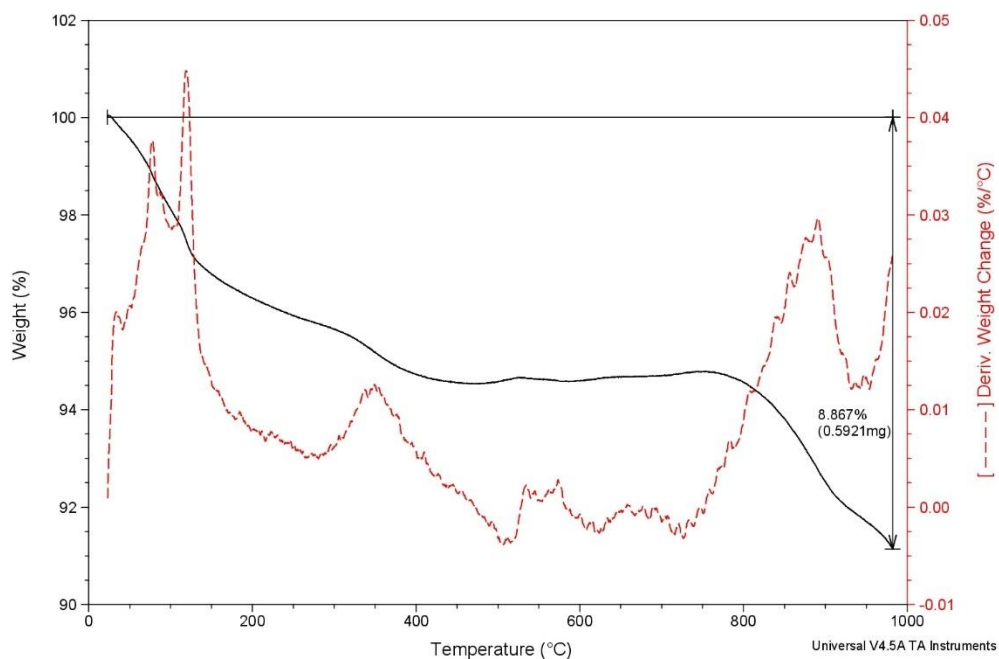


Figura 4.14 - Resultado do ensaio de termogravimetria da amostra 80MD-10GL-10MK-20C

80MD-20GL

Na figura 4.15 está representado o resultado da termogravimetria da amostra 80MD-20GL, onde se observou uma queda inicial de massa até perto dos 175 °C. Após esta perda inicial as perdas de massa foram menos acentuadas, até perto dos 450 °C onde se registou um pequeno pico de perda. No total registou-se uma perda de 8,71%.

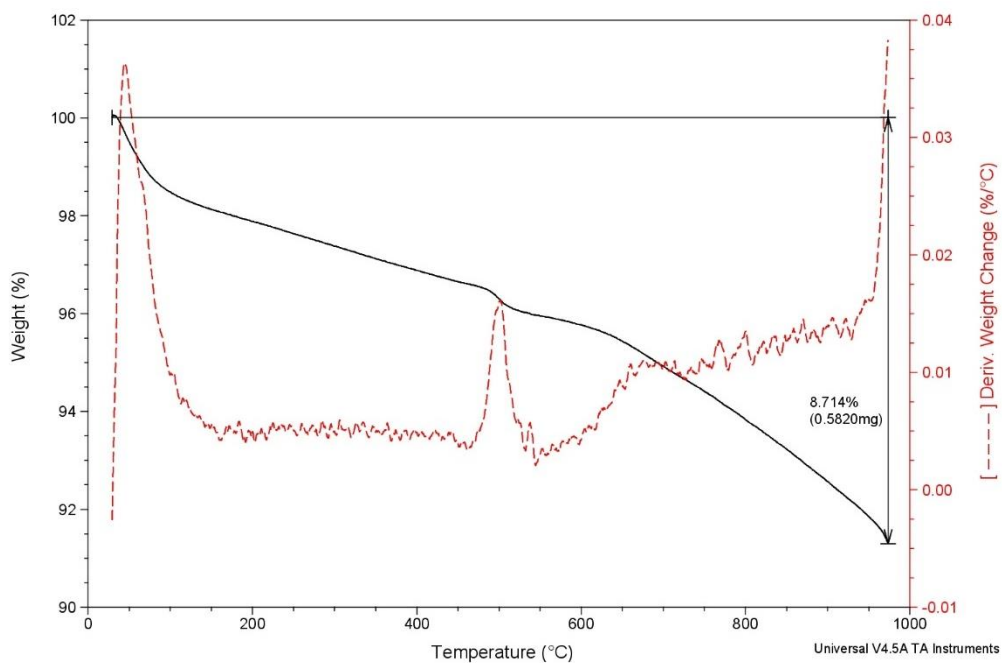


Figura 4.15 - Resultado do ensaio de termogravimetria da amostra 80MD-20GL

80MD-20MK

Na figura 4.16 está representado o resultado da termogravimetria da amostra 80MD-20MK, onde se observou uma queda inicial de massa até perto dos 230 °C. Após esta perda inicial as perdas de massa foram menos acentuadas, até perto dos 800 °C onde se registou um pequeno pico de perda. No total registou-se uma perda de 8,82%.

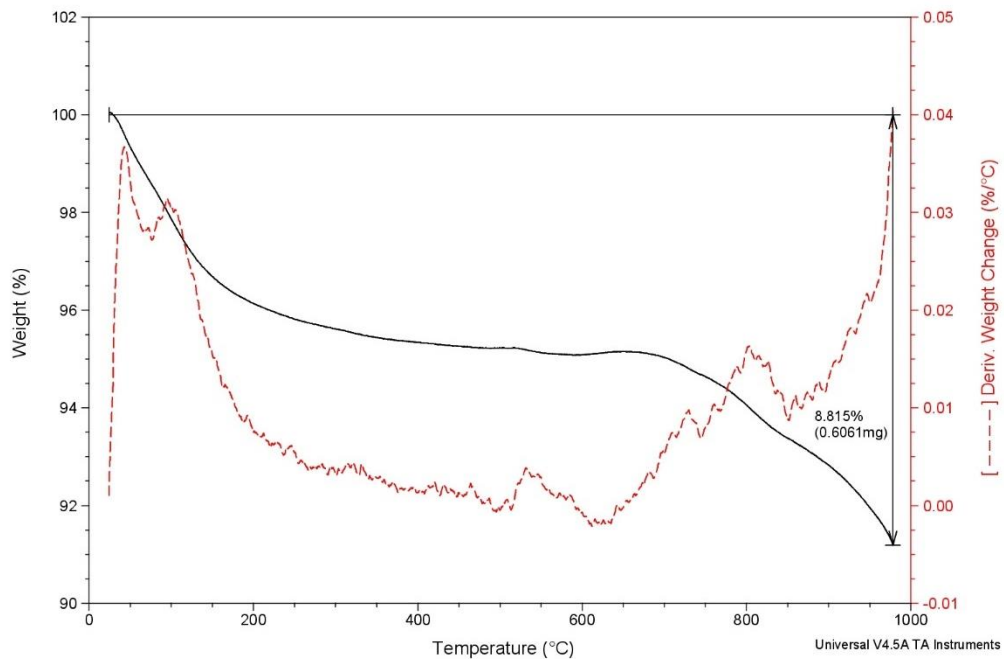


Figura 4.16 - Resultado do ensaio de termogravimetria da amostra 80MD-20MK

60MD-20GL-20MK; 60MD-20GL-20MK-10C

Nas figura 4.17 e 4.18 estão representados os resultados das termogravimetrias das amostras 60MD-20GL-20MK, 60MD-20GL-20MK-10C, respetivamente. Optou-se por se fazer uma análise conjunta por serem misturas semelhantes sendo a única diferença a presença de aglomerado de cortiça. Observou-se queda inicial da massa até cerca dos 200 °C. Entre os 200 °C e os 475 °C as perdas foram praticamente constantes. No intervalo 475 °C a 550°C deu-se um pico de perda. As perdas totais foram de 9,93% e 8,59%, respetivamente.

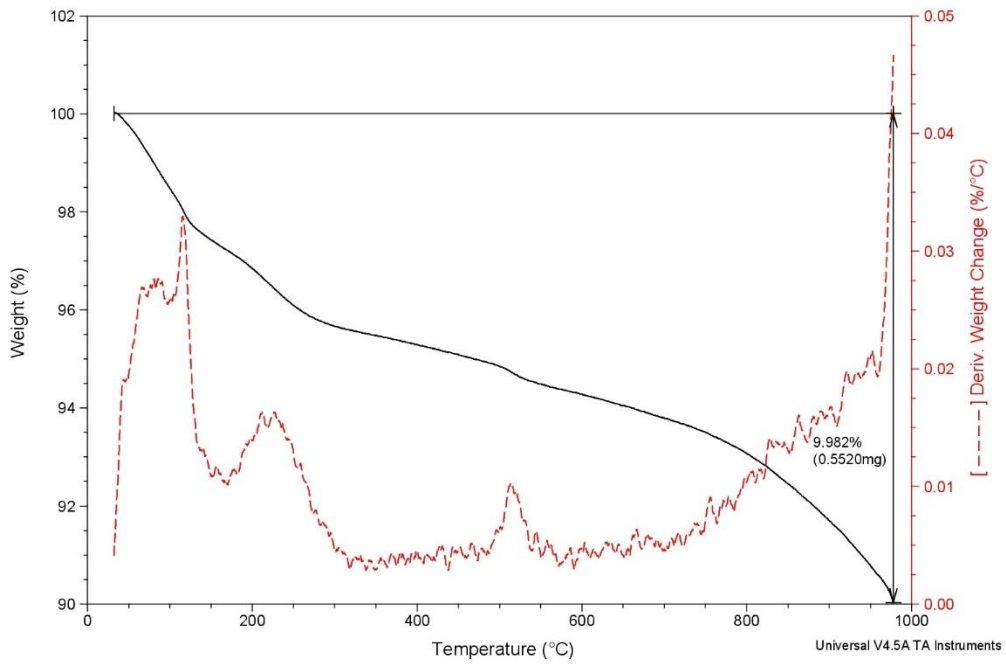


Figura 4.17 - Resultado do ensaio de termogravimetria da amostra 60MD-20GL-20MK

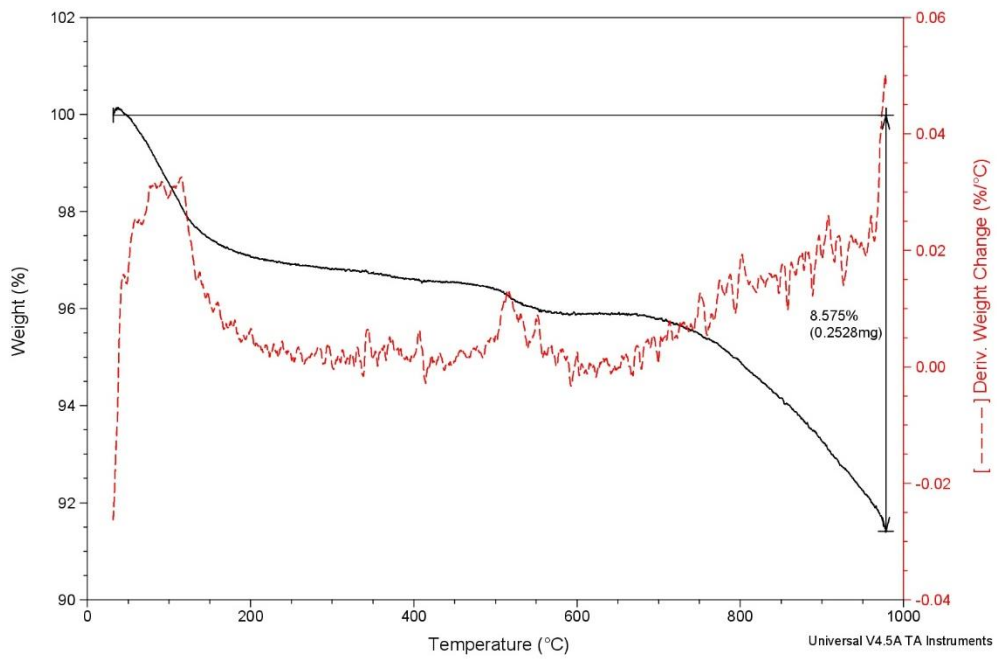


Figura 4.18 - Resultado do ensaio de termogravimetria da amostra 60MD-20GL-20MK-10C

55MD-27GL-18MK; 55MD-27GL-18MK-10C; 55MD-27GL-18MK-20C

Nas figura 4.19, 4.20 e 4.21 estão representados os resultados das termogravimetrias das amostras 55MD-27GL-18MK, 55MD-27GL-18MK-10C e 55MD-27GL-18MK-20C, respetivamente. Optou-se por se fazer uma análise conjunta por serem misturas semelhantes sendo a única diferença a presença de aglomerado de cortiça. Observou-se queda inicial da massa até cerca dos 180 °C. Entre os 180 °C e os 475 °C as perdas foram praticamente constantes. No intervalo 475 °C a 550°C deu-se um pico de perda. Registou-se também um pico perto dos 900 °C. As perdas totais foram de 10,92%, 10,68 e 11,07%, respetivamente.

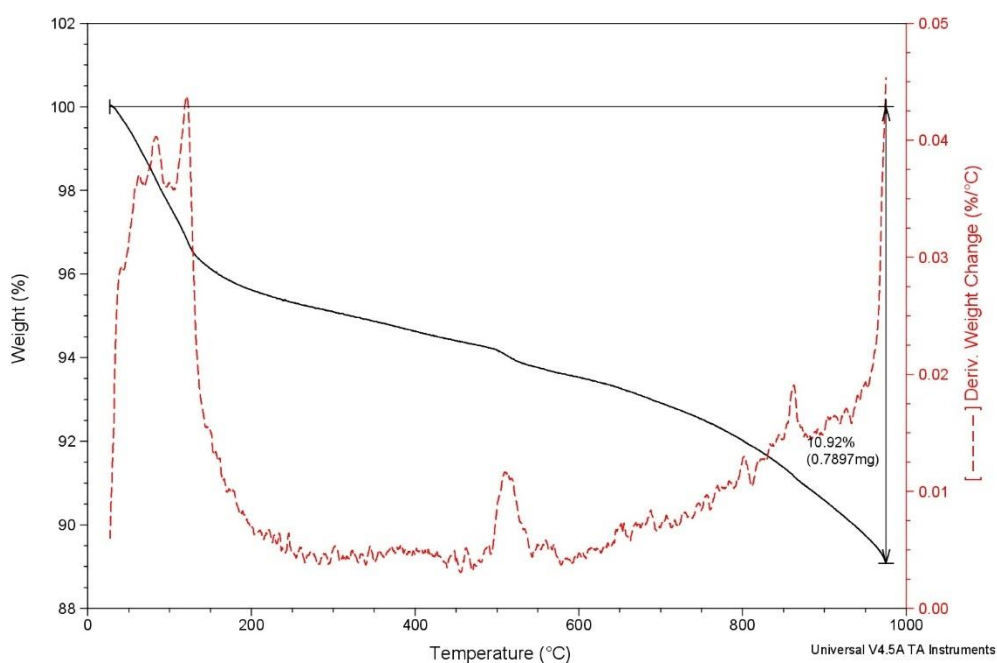


Figura 4.19 - Resultado do ensaio de termogravimetria da amostra 55MD-27GL-18MK

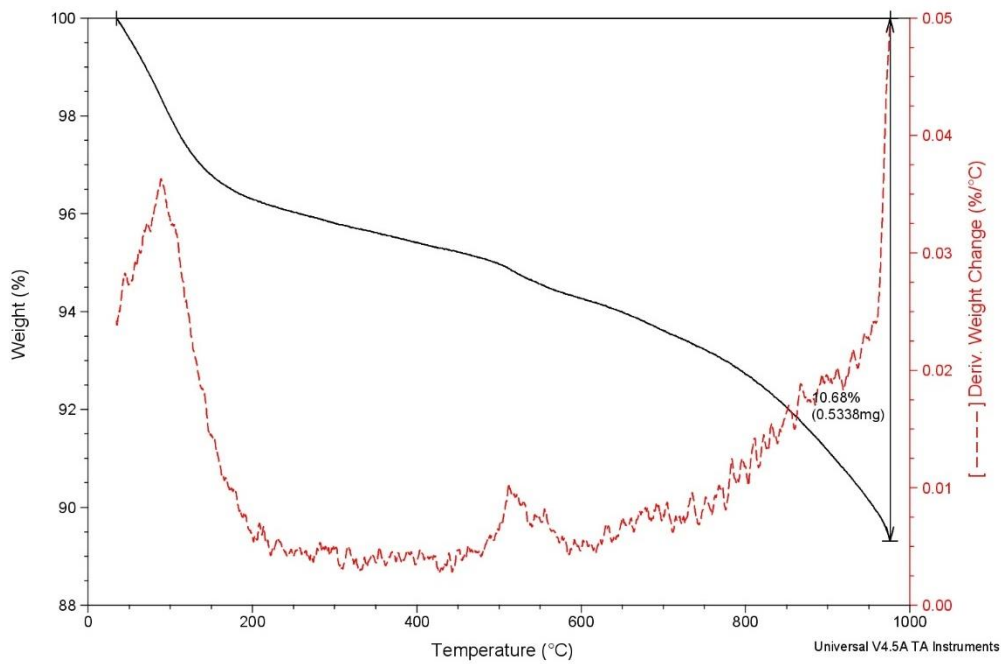


Figura 4.20 - Resultado do ensaio de termogravimetria da amostra 55MD-27GL-18MK-10C

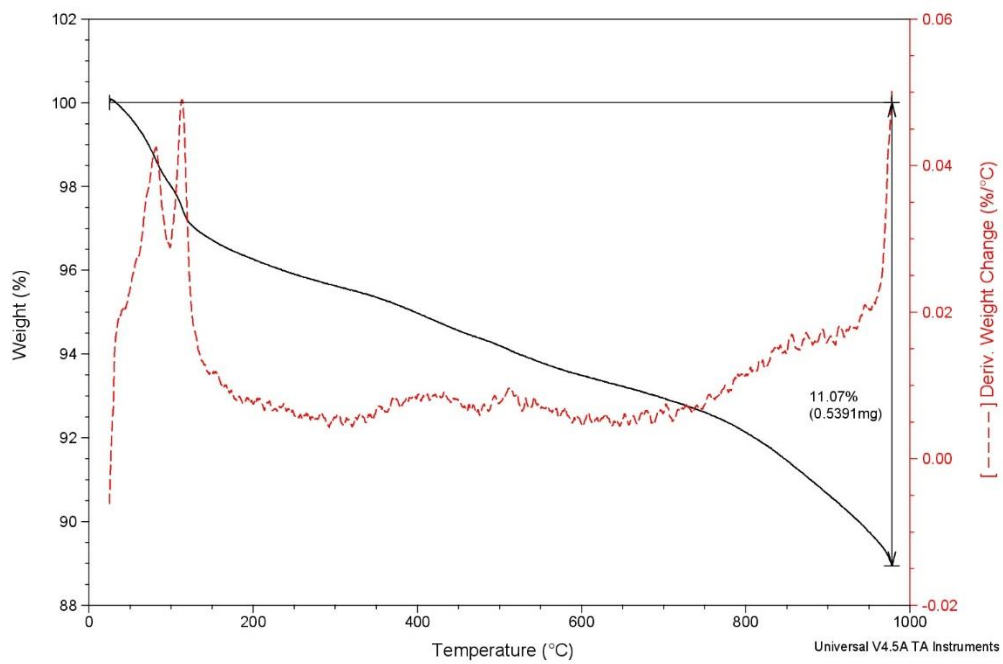


Figura 4.21 - Resultado do ensaio de termogravimetria da amostra 55MD-27GL-18MK-20C

50MD-25GL-25MK

Na figura 4.22 está representado o resultado da termogravimetria da amostra 50MD-25GL-25MK, onde se observou uma queda inicial de massa até perto dos 205 °C. Após esta perda inicial as perdas de massa foram menos acentuadas, até perto dos 500 °C onde se registou um pequeno pico de perda. No total registou-se uma perda de 8,67%.

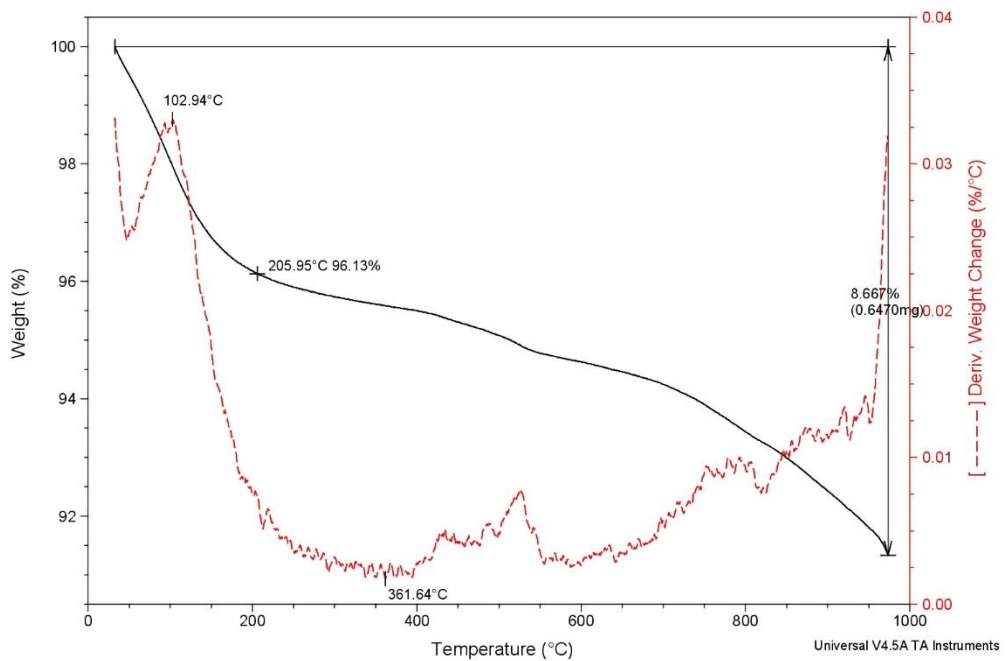


Figura 4.22 - Resultado do ensaio de termogravimetria da amostra 50MD-25GL-25MK

50GL-50MK

Na figura 4.23 está representado o resultado da termogravimetria da amostra 50MD-25GL-25MK, onde se observou uma queda inicial de massa até perto dos 220 °C. Após esta perda inicial as perdas de massa foram menos acentuadas, até perto dos 895 °C onde se registou um pequeno pico de perda. No total registou-se uma perda de 10,03%.

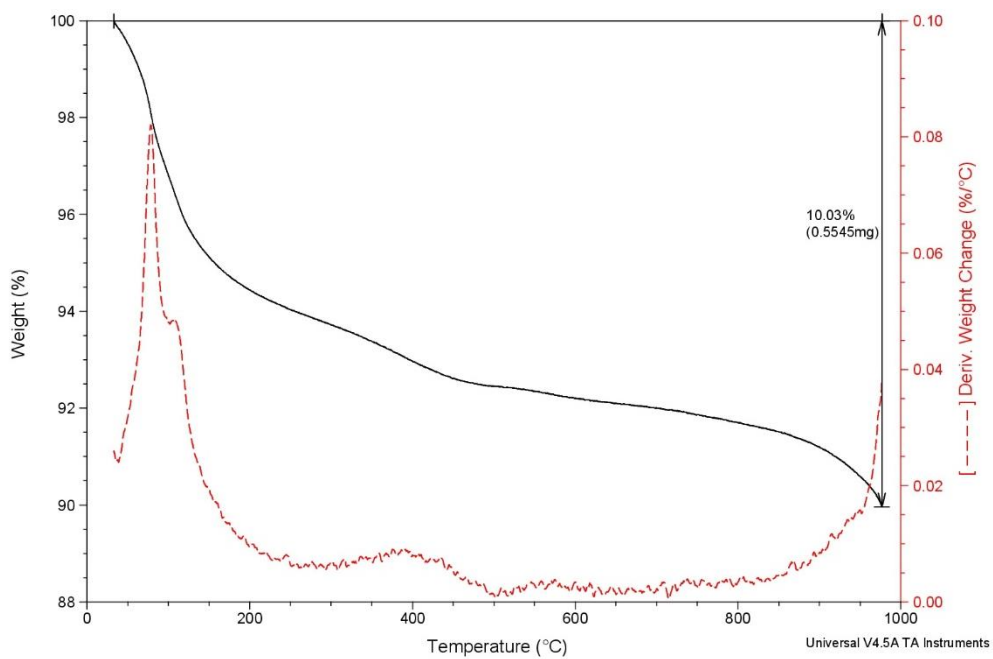


Figura 4.23 - Resultado do ensaio de termogravimetria da amostra 50GL-50MK

C25/30.S3.XC1(P).D22.CL0,4

Na figura 4.24 está representado o resultado da termogravimetria de um betão C25/30.S3.XC1(P).D22.CL0,4, onde se observou uma queda inicial de massa até perto dos 480 °. No intervalo 480 °C a 680 °C deu-se um pico de perda que originou uma perda de massa de cerca de 6,23%. Perto dos 850 °C registou-se um pico de perda. No total registou-se uma perda de 9,60%.

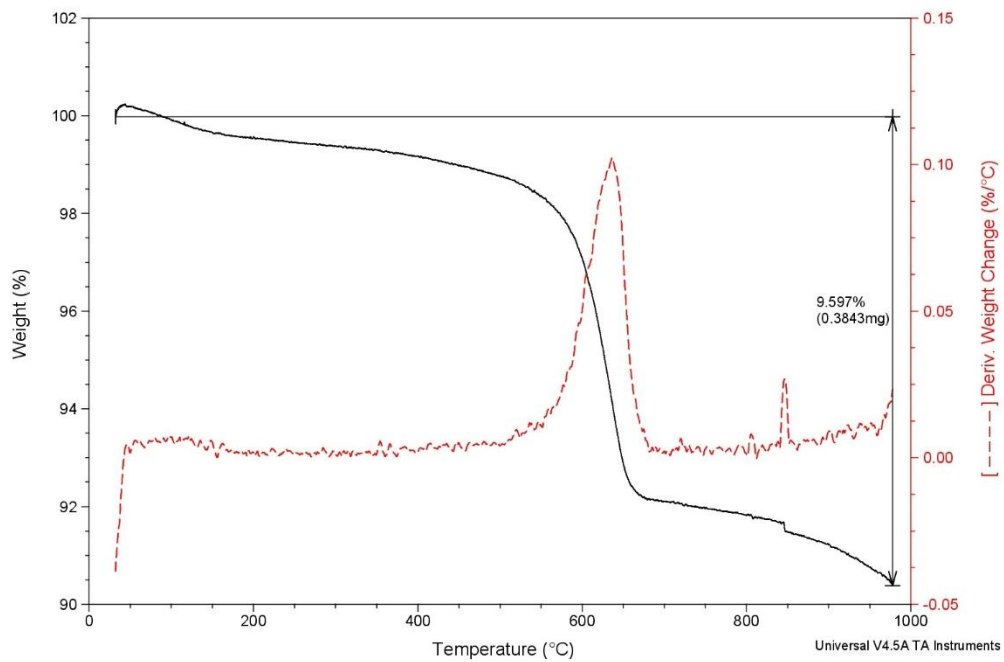


Figura 4.24 - Resultado do ensaio de termogravimetria do betão C25/30.S3.XC1.(P).D22.CL0,4

4.3.2 Síntese de resultados

Este ensaio permitiu medir qual a perda de massa de cada mistura quando expostos a uma temperatura até 1000 °C. Foram realizados um total de 20 ensaio TGA, de entre os quais também foram ensaiados os precursores utilizados à exceção do vidro moído, já que o seu ponto de fusão se dá muito próximo das temperaturas atingidas neste ensaio o que poderia danificar o equipamento de ensaio.

Os resultados resumidos das perdas de massa de cada mistura são apresentados na tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Resumo dos ensaios TGA [%]

Mistura	Perda de massa (%)	Ca-Al-H ₂ O	CaCO ₃	Resistência 7dias [MPa]	Resistência 800 °C [MPa]
Lamas residuais	5,73	-	-	-	-
Metacaulino	1,76	-	-	-	-
100MD	7,99	X	X	0,00	21,40
100GL	7,45	X		16,36	0,00
100MK	13,67	X		20,42	17,84
80MD-10GL-10MK	11,08	X	X	10,58	29,06
80MD-20GL	8,71	X	X	3,70	30,48
80MD-20MK	8,82		X	18,44	24,72
60MD-20GL-20MK	9,93	X	X	17,90	23,80
55MD-27GL-18MK	10,92	X	X	21,04	30,26
50MD-25GL-25MK	8,67	X	X	30,90	25,98
50GL-50MK	10,03	X	X	21,40	34,34
80MD-10GL-10MK-10C	8,69	X	X	10,44	26,52
80MD-10GL-10MK-20C	8,86	X	X	7,63	28,98
60MD-20GL-20MK-10C	8,59	X	X	17,38	23,56
55MD-27GL-18MK-10C	10,68	X	X	19,80	26,12
55MD-27GL-18MK-20C	11,07	X	X	10,94	41,54
C25/30.S3.XC1(P).D22.CL0,4	9,60	X	X	49,22	16,16

4.4 Cup test

Com este ensaio foram obtidos resultados visuais do efeito causado pela presença de carbonato de potássio (K_2CO_3) em contacto direto com as amostras e quando expostas a um regime de altas temperaturas. Os resultados foram divididos em 4 categorias tal como na norma ASTM C454:

- Não afetado, sem fissuras visíveis;
- Ligeiramente fissurado;
- Fissurado, fissuras com dimensão superior a 0,64 mm;
- Desintegrado, partido em 2 ou mais peças.

Desta forma após o ensaio foram agrupados os resultados da seguinte forma:

Misturas ligeiramente afetadas

80MD-10GL-10MK-20C

Apresenta fissuras minúsculas no interior e um ligeiro aumento do volume exterior tal como se pode ver na figura 4.25



Figura 4.25 - Cup test da mistura 80MD-10GL-10MK-20C

55MD-27GL-18MK-20C

Apresenta fissuras minúsculas no interior e um ligeiro aumento do volume exterior tal como se pode ver na figura 4.26.



Figura 4.26 - Cup test da mistura 55MD-27GL-18MK-20C

80MD-20GL

É bem visível a zona afetada pelo carbonato de potássio, tal como se pode ver na figura 4.27. Não apresenta fissuração significativa. Apresenta um pequeno aumento de volume exterior.



Figura 4.27 - Cup test da mistura 80MD-20GL

80MD-10GL-10MK

É bem visível a zona afetada pelo carbonato de potássio, tal como se pode ver na figura 4.28. Não apresenta fissuração, apenas um ligeiro aumento do volume exterior.



Figura 4.28 - Cup test da mistura 80MD-10GL-10MK

Misturas fissuradas

60MD-20GL-20MK

Apresenta algumas fissuras a nível interno, sendo bem visível a zona afetada pelo carbonato de potássio (figura 4.29). Houve também um pequeno aumento do volume exterior.

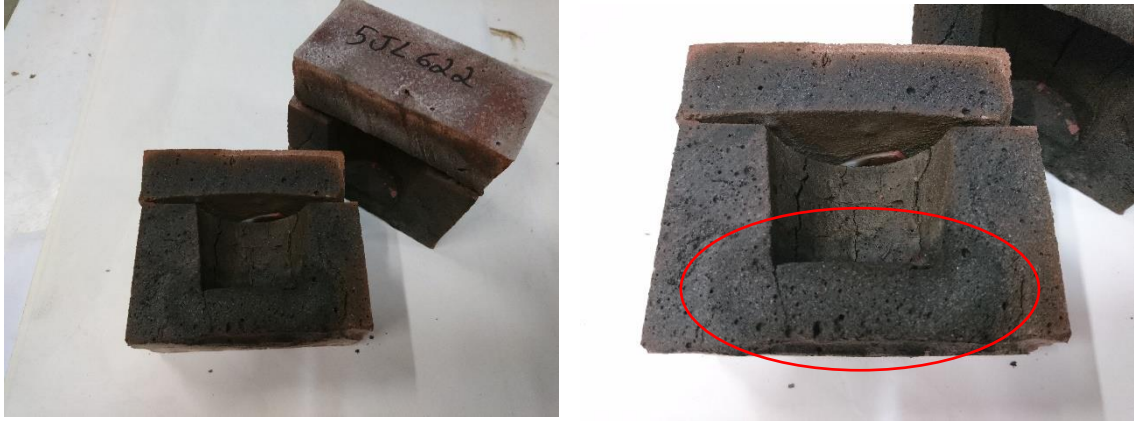


Figura 4.29 - Cup test da mistura 60MD-20GL-20MK

60MD-20GL-20MK-10C

Apresenta uma visível zona afeta pela presença do carbonato de potássio, o que deu origem a fissuração interna e destruição interior do provete. Observou-se também um ligeiro aumento do volume exterior.



Figura 4.30 - Cup test da mistura 60MD-20GL-20MK-10C

55MD-27GL-18MK-10C

Apresenta uma visível zona afeta pela presença do carbonato de potássio, o que deu origem a fissuração interna e destruição interior do provete. Observou-se também um ligeiro aumento do volume exterior.

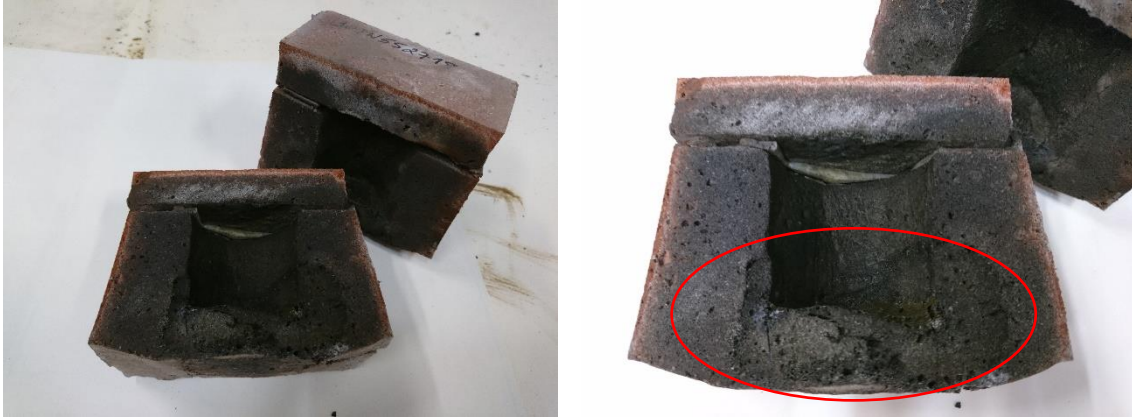


Figura 4.31 - Cup test mistura 55MD-27GL-18MK-10C

55MD-27GL-18MK

Apresenta uma visível zona afeta pela presença do carbonato de potássio, o que deu origem a fissuração interna bem notória e destruição interior do provete. Observou-se também um ligeiro aumento do volume exterior.



Figura 4.32 - Cup test mistura 55MD-27GL-18MK

50MD-25GL-25MK

Apresenta uma visível zona afeta pela presença do carbonato de potássio, o que deu origem a fissuração interna e destruição interior do provete.



Figura 4.33 - Cup test da mistura 50MD-25GL-25MK

80MD-10GL-10MK-10C

Apresenta uma visível zona afeta pela presença do carbonato de potássio. Apresenta uma fissuração ligeira do provete. Observou-se também um ligeiro aumento do volume exterior.



Figura 4.34 - Cup test mistura 80MD-10GL-10MK-10C

80MD-20MK

Apresenta uma bem visível zona afeta pela presença do carbonato de potássio, o que deu origem a fissuração interna bem notória do provete. Observou-se também um ligeiro aumento do volume exterior.

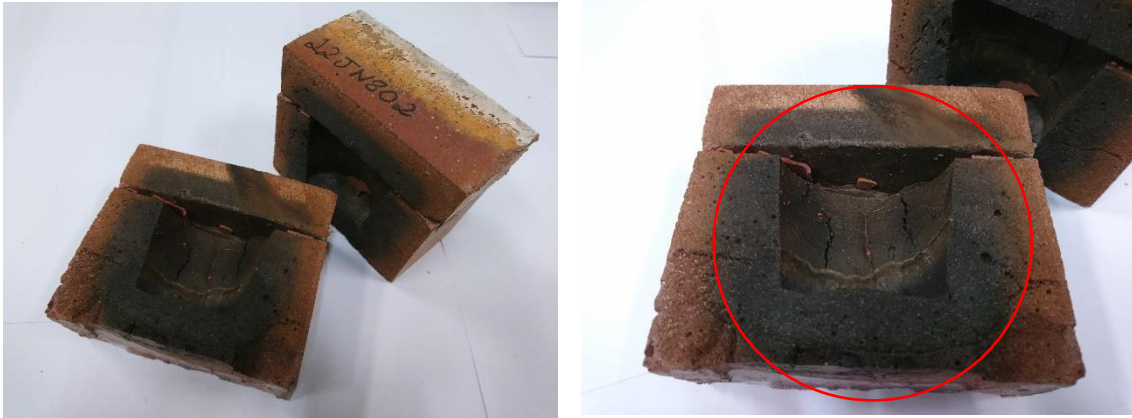


Figura 4.35 - Cup test da mistura 80MD-20MK

Misturas desintegradas

50GL-50MK

Apresenta uma zona afetada pelo carbonato de potássio bem visível. E deu-se a destruição quase completa do provete.



Figura 4.36 - Cup test da mistura 50GL-50MK

100MK

Completa destruição do provete, mas ainda assim é bem visível a zona de atuação do carbonato de potássio.

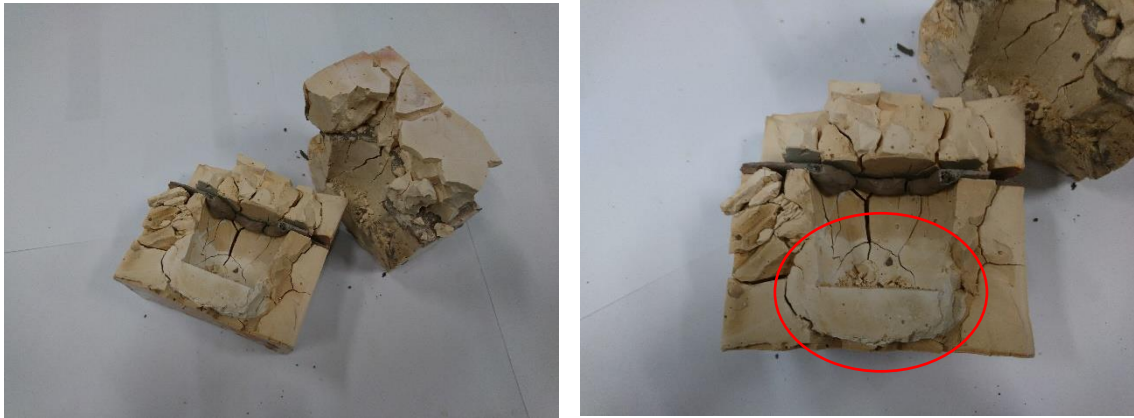


Figura 4.37 - Cup test mistura 100MK

100GL

No caso desta mistura, tal como já tinha sido referido no subcapítulo 4.2, houve uma total alteração das características físicas da amostra. Pode observar-se na figura 4.31 que o provete teve um grande aumento de volume e uma mudança radical de coloração, sendo que a sua cor inicia era preto tal como foi demonstrado anteriormente.



Figura 4.38 - Cup test da mistura 100GL

4.4.1 Síntese de resultados

Na tabela 4.2 são apresentados os resultados resumidos do *cup test*.

Tabela 4.2 - Resumo do ensaio *cup test*

<i>Mistura</i>	Não afetado	Ligeiramente fissurado	Fissurado	Desintegrado
100MD	-	-	-	-
100GL				X
100MK				X
80MD-10GL-10MK		X		
80MD-20GL		X		
80MD-20MK			X	
60MD-20GL-20MK			X	
55MD-27GL-18MK			X	
50MD-25GL-25MK			X	
50GL-50MK				X
80MD-10GL-10MK-10C			X	
80MD-10GL-10MK-20C		X		
60MD-20GL-20MK-10C			X	
55MD-27GL-18MK-10C			X	
55MD-27GL-18MK-20C		X		
C25/30.S3.XC1(P).D22.CL0,4	-	-	-	-

5 Discussão e conclusões

No que diz respeito à resistência à compressão, e ignorando os resultados nulos da mistura 100MD aos 7 dias e da mistura 100GL após a exposição a 800 °C, foram obtidos resultados de resistência entre 3,70 MPa e 41,54 MPa, comparáveis ao betão convencional.

Analisando os resultados da resistência à compressão aos 7 dias e após da exposição a 800 °C, observou-se que houve um aumento em todas as misturas à exceção das misturas 100MK e 50MD-25GL-25MK que tiveram um ligeiro decréscimo de resistência de 13% e 16%, respetivamente.

Esta redução de resistência, pode ser explicada pela presença de maiores quantidades de metacaulino comparativamente com as outras misturas. Luna-Galiano, verificou também que a presença de metacaulino nas misturas reduz a resistência dos geopolímeros expostos a altas temperaturas ou ao fogo [44].

Recorrendo aos resultados de termogravimetria, observou-se que a amostra com maior perda de massa foi a mistura composta por 100% de metacaulino (100MK) com 13,67%. Este resultado pode ser explicado segundo Kong *et al.*, pelo facto de os geopolímeros produzidos com metacaulino apresentarem maior porosidade, o que faz com que contenham mais água livre e água quimicamente ligada aos elementos Ca e Al, ou outros, no seu interior. Pelo que, quando expostos a altas temperaturas, existe uma maior libertação de água que resulta em maiores perdas de massa [45].

Segundo o autor, esta maior libertação de água faz também que haja maiores alterações da matriz da mistura e conseqüentemente maiores lesões internas das amostras, o que se veio a confirmar, já que as únicas amostras que apresentaram um decréscimo da resistência após a exposição a 800 °C foram também aquelas que apresentaram as maiores perdas de massa, sendo que uma delas foi mesmo a que apresentou a maior perda de massa.

Por outro lado, a presença de vidro moído revelou ser benéfica para o aumento de resistência, já que a mistura 80MD-20GL cuja composição era somente lamas residuais (80%) e vidro moído (20%), foi aquela que apresentou um maior aumento da resistência à compressão após ser exposto a altas temperaturas, com um aumento de 724% em relação à resistência obtida aos 7 dias de cura. Este aumento de resistência, mesmo na mistura 50GL-50MK, cuja composição é de 50% vidro moído e 50% metacaulino (ou seja, que contém um volume grande deste material), verificou-se também um aumento da resistência à compressão após a exposição ao regime de temperatura. Embora, neste caso, o aumento tenha sido apenas de 60%. Como tal, pode concluir-se que a adição de vidro na composição das misturas tem um efeito positivo no aumento da resistência à compressão dos materiais ativados alcalinamente, após exposição a altas temperaturas (neste caso de 800°C).

Através do *cup test* observou-se que as misturas mais afetadas pela presença do carbonato de potássio foram, mais uma vez, aquelas cujas composições continham maior quantidade de metacaulino, - casos das misturas 100MK e 50GL-50MK. As amostras menos afetadas, segundo a análise visual, foram as misturas 80MD-10GL-10MK-20C, 55MD-27GL-18MK-20C, 80MD-20GL e, por fim, a mistura 80MD-10GL-10MK, onde a presença do metacaulino foi inferior. Curiosamente as misturas com maior quantidade de aglomerado de cortiça, apresentaram menor deterioração de fissuração causada pela presença do carbonato de potássio.

Foi também testado à resistência à compressão um betão produzido com cimento Portland, com objetivo de comparar o comportamento de betões de cimento convencional, com betões de ativação alcalina. O betão testado foi um betão da classe de resistência C25/30.S3.XC1(P).D22.CL0,4 e, registou-se, uma perda de resistência de 69% após a exposição a 800 °C. Foi ainda registada, através da termogravimetria, uma perda de 9,60% da massa quando exposto a altas temperaturas.

Comparando este resultado com os resultados obtidos para os betões de ativação alcalina, pode afirmar-se que não existe uma grande diferença nas perdas de massa finais, mas existe uma perda muito grande da massa a partir dos 480 °C no betão com cimento Portland, resultado do excesso de cal, o que não acontece nos betões de ativação alcalina que na sua maioria apresentam maiores perdas de massa numa fase inicial que é atribuída à perda de água livre e quimicamente ligada aos elementos Ca, Al e outros. Este resultado ajuda a perceber o porquê do decréscimo da resistência à compressão após a exposição a altas temperaturas, onde a perda de resistência é 4 vezes superior no betão de cimento Portland comparada com as ligeiras perdas registadas em apenas duas misturas de materiais de ativação alcalina.

Comparando o resultado obtido deste betão com os betões de ativação alcalina, é notória a diferença de comportamento. A maior perda registada nos betões de ativação alcalina é cerca quatro vezes menor que a perda registada no betão de cimento Portland, deixando bem evidente a vantagem dos geopolímeros no que diz respeito à resistência a altas temperaturas.

5.1 Conclusões finais

Os resultados obtidos ao longo deste estudo, permitiram concluir que os betões de ativação alcalina possuem um bom comportamento térmico, até 800°C. As lamas residuais das Minas da Panasqueira apresentam uma boa ativação alcalina quando incorporadas com vidro e/ou metacaulino, no entanto, nas misturas produzidas apenas com lamas não se verifica reação alcalina o que fez com que a sua resistência aos 7 dias fosse nula, apesar disso, obteve uma resistência após exposição a 800 °C de 21,40 MPa que foi superior ao resultado obtido para um betão convencional de cimento Portland, 16,16 MPa.

De uma forma geral, os materiais ativados alcalinamente (AAC) apresentaram um excelente comportamento às altas temperaturas, onde se registou um aumento média de 140% da resistência após a exposição a 800 °C.

Apesar de terem sido registadas 2 diminuições de resistência após a exposição a altas temperaturas (-13% e -16%), essas perdas não são significativas quando comparadas com os 69% de perda de resistência (cerca de 4 vezes superior) do betão de cimento Portland. Esta grande diferença de comportamento pode ser atribuída ao facto do betão de cimento Portland apresentar uma grande quantidade de cal na sua estrutura, que é decomposta por volta dos 480 °C e representa uma grande perda de massa e conseqüente fragilização da sua estrutura interna.

No conjunto dos resultados, a mistura que apresentou um melhor comportamento no geral, foi a mistura 80MD-20GL, composta por 80% de lamas residuais e 20% de vidro moído.

Desta forma pode afirmar-se que os ligantes de ativação alcalina apresentam um excelente comportamento a altas temperaturas sendo bem notória a vantagem destes ligantes em relação aos betões convencionais de cimento Portland.

5.2 Propostas de trabalhos futuros

No geral os objetivos deste estudo foram alcançados e foram obtidos resultados interessantes acerca do comportamento a altas temperaturas dos AAC produzidos a partir de lamas residuais das Minas da Panasqueira, no entanto existe muito a investigar nesta área, assim, entre muitos outros aspetos a investigar, apresenta-se a seguinte lista principal para trabalhos futuros, mais relacionados com o estudo realizado:

- Complementar este estudo, com a análise aprofundado da porosidade dos materiais quando expostas a regimes de altas temperaturas;
- Estudar os efeitos da temperatura nos materiais que desenvolveram maior resistência à compressão, em amostras com maior tempo de cura/maturidade;
- Complementar este estudo, com a observação da microestrutura dos geopolímeros, antes e depois de exposição, através de raio-X e microscópio eletrónico de varrimento;
- Estudar a durabilidade em ambientes agressivos a altas temperaturas, nomeadamente para maiores tempos de exposição, da mistura com 80% de lamas residuais e 20% de vidro;
- E, finalmente, desenvolver novas misturas de lamas residuais, vidro moído e outros possíveis precursores e ativadores, cuja resistência e aumento de resistência a altas temperaturas seja ainda superior.

Bibliografia

- [1] European Commission, “Causes of climate change | Ação climática.” [Online]. Available: https://ec.europa.eu/clima/change/causes_pt. [Accessed: 23-Sep-2017].
- [2] “Ambientalismo,” 2017. [Online]. Available: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Ambientalismo>. [Accessed: 01-Sep-2017].
- [3] G. H. Brundtland, “Our Common Future—Call for Action,” *Environ. Conserv.*, vol. 14, no. 4, pp. 291-294, 1987.
- [4] “KYOTO PROTOCOL TO THE UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE,” 1998.
- [5] “THE EUROPEAN ENVIRONMENT STATE AND OUTLOOK 2010.”
- [6] B. Killeen, “EEA Annual report 2010 and Environmental statement 2011,” pp. 1-100, 2011.
- [7] M. Taylor, C. Tam, and D. Gielen, “Energy Efficiency and CO₂ Emissions from the Global Cement Industry,” *IEA-WBCSD Work.*, no. September, pp. 4-5, 2006.
- [8] K. Flaga, “Advances in materials applied in civil engineering,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 106, no. 1-3, pp. 173-183, Oct. 2000.
- [9] J. Davidovits, “PROPERTIES OF GEOPOLYMER CEMENTS,” in *Frist International Conference on Alkaline Cements*, 1994, pp. 131-150.
- [10] D. Khale and R. Chaudhary, *Mechanism of Geopolymerization and Factors Influencing Its Development: A Review*, vol. 42. 2007.
- [11] F. Torgal, “DESENVOLVIMENTO DE LIGANTES OBTIDOS POR ATIVAÇÃO ALCALINA DE LAMAS RESIDUAIS DAS MINAS DA PANASQUEIRA,” Universidade da Biera Interior, 2006.
- [12] F. Pacheco Torgal, J. P. Castro-Gomes, and S. Jalali, “Ligantes obtidos por activação alcalina de lamas residuais das Minas da Panasqueira. Resistência ao desgaste e ao ataque de soluções ácidas,” 2008.
- [13] V. D. Glukhovsky, “Soil Silicates,” *Gostroiizdat Publ. Kiev, USSR*, 1959.
- [14] J. Davidovits, “Geopolymers: inorganic polymeric new materials,” *J Therm Anal*, 1991.
- [15] P. D. Æ. A. Ferna and G. C. L. Æ. A. P. Æ. J. S. J. Van Deventer, “Geopolymer technology : the current state of the art,” no. 4, pp. 2917-2933, 2007.
- [16] A. Palomo, M. W. Grutzeck, and M. T. Blanco, “Alkali-activated fly ashes A cement for the future,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 29, pp. 1323-1329, 1999.
- [17] J. Illston, “CONSTRUCTION MATERIALS. THEIR NATURE AND BEHAVIOR,” in *Chapman & Hall, London*, 1994, pp. 95-98-192.
- [18] I. G. Richardson and G. W. Groves, “Microstructure and microanalysis of hardened ordinary Portland cement pastes,” *J. Mater. Sci.*, vol. 28, pp. 265-277, 1993.
- [19] K. Scrivener, “THE MICROSTRUTURE OF CONCRETE,” in *The American Ceramic Society, USA*, 1989, pp. 127-161.
- [20] K. Scrivener, “THE EDVELOPMENT OF MICROSTRUTURE DURING THE HYDRATATION OF

- PORTLAND CEMENT,” Imperial College of Science and Tchnology, London, UK, 1984.
- [21] A. Fernández-Jiménez, A. Palomo, and M. Criado, “Microstructure development of alkali-activated fly ash cement: a descriptive model.”
- [22] R. E. Lyon, P. N. Balaguru, and A. Foden, “Fire Resistant Aluminosilicate Composites,” *Fire Mater.*, vol. 21, pp. 67-73, 1997.
- [23] W. K. W. Lee and J. S. J. Van Deventer, “The effect of ionic contaminants on the early-age properties of alkali-activated fly ash-based cements.”
- [24] H. Wang, H. Li, and F. Yan, “Reduction in wear of metakaolinite-based geopolymer composite through filling of PTFE,” *Wear*, vol. 258, pp. 1562-1566, 2005.
- [25] P. Duxson, G. C. Lukey, and J. S. J. Van Deventer, “Thermal conductivity of metakaolin geopolymers used as a first approximation for determining gel interconnectivity,” *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 45, no. 23, pp. 7781-7788, 2006.
- [26] A. Palomo, M. T. Blanco-Varela, M. L. Granizo, F. Puertas, T. Vazquez, and M. W. Grutzeck, “Chemical stability of cementitious materials based on metakaolin,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 29, pp. 997-1004, 1999.
- [27] J. L. Bell, M. Gordon, and W. Kriven, *Use of Geopolymeric Cements as a Refractory Adhesive for Metal and Ceramic Joins*, vol. 26. 2005.
- [28] J. Davidovits, *Geopolymer Chemistry and Applications*. Institute Geopolymère, 2008.
- [29] J. G. S. Van Jaarsveld, J. S. J. Van Deventer, and L. Lorenzeni, “THE POTENTIAL USE OF GEOPOLYMERIC MATERIALS TO IMMOBILISE TOXIC METALS: PART I. THEORY AND APPLICATIONS,” *Miner. Eng.*, vol. 10, no. 7, pp. 659-669, 1997.
- [30] T. Pinto, “SISTEMAS LIGANTES OBTIDOS POR ATIVAÇÃO ALCALINADO METACAULINO,” Universidade do Minho, 2004.
- [31] G. Habert, J. B. D’Espinoze De Lacaille, and N. Roussel, “An environmental evaluation of geopolymer based concrete production: Reviewing current research trends,” *J. Clean. Prod.*, vol. 19, no. 11, pp. 1229-1238, 2011.
- [32] J. M. Miranda, A. Fernández-Jiménez, J. A. González, and A. Palomo, “Corrosion resistance in activated fly ash mortars.”
- [33] P. Chindapasirt, T. Chareerat, and V. Sirivivatnanon, “Workability and strength of coarse high calcium fly ash geopolymer,” 2006.
- [34] H. W. Nugteren, V. C. L. Butselaar-Orthlieb, and M. Izquierdo, “HIGH STRENGTH GEOPOLYMERS PRODUCED FROM COAL COMBUSTION FLY ASH,” *Glob. NEST J.*, vol. 11, no. 2, pp. 155-161, 2009.
- [35] A. Silva De Vargas, D. C. C. Dal Molin, Â. B. Masuero, A. C. F. Vilela, J. Castro-Gomes, and R. M. De Gutierrez, “Strength development of alkali-activated fly ash produced with combined NaOH and Ca(OH) 2 activators,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 53, pp. 341-349, 2014.
- [36] H. Xu and J. S. J. Van Deventer, “The geopolymerisation of alumino-silicate minerals,” *Int. J. Miner. Process*, vol. 59, pp. 247-266, 2000.
- [37] D. L. Y. Kong, J. Sanjayan, and K. Sagoe-Crentsil, *Factors Affecting the Performance of*

- Metakaolin Geopolymers Exposed to Elevated Temperatures*, vol. 43. 2008.
- [38] D. Hardjito and B. V. Rangan, "Development of Fly Ash-Based Geopolymer Concrete : Progress and Research Needs," 2006.
- [39] A. R. Brough and A. Atkinson, "Sodium silicate-based, alkali-activated slag mortars Part I. Strength, hydration and microstructure."
- [40] R. N. Thakur and S. Ghosh, "EFFECT OF MIX COMPOSITION ON COMPRESSIVE STRENGTH AND MICROSTRUCTURE OF FLY ASH BASED GEOPOLYMER COMPOSITES," vol. 4, no. 4, 2009.
- [41] D. Hardjito, S. Wallah, Sumajouw, and A. Rangan, *On The Development of Fly Ash-based Geopolymer Concrete*. 2004.
- [42] F. Pacheco-torgal, "Properties of tungsten mine waste geopolymeric binder," vol. 22, pp. 1201-1211, 2008.
- [43] "Minas, mineiros e guerras: as "corridas ao volfrâmio" - PÚBLICO." [Online]. Available: <https://www.publico.pt/historia/jornal/minas-mineiros-e-guerras-as-corridas-ao-volframio-23357897>. [Accessed: 13-Jun-2017].
- [44] Y. Luna, A. Cornejo, C. Leiva, L. F. Vilches Arenas, and C. Fernández Pereira, "Properties of fly ash and metakaolín based geopolymer panels under fire resistance tests," *Mater. construcción*, ISSN 0465-2746, N^o. 319, 2015, vol. 65, no. 319, p. 3, 2015.
- [45] D. L. Y. Kong, J. G. Sanjayan, and K. Sagoe-crentsil, "Comparative performance of geopolymers made with metakaolin and fly ash after exposure to elevated temperatures," vol. 37, pp. 1583-1589, 2007.
- [46] L. Vaz, "Estudo do efeito de adjuvantes em geopolímeros obtidos de resíduos de minas," Universidade da Beira Interior, 2011.
- [47] J. Filipe, "Ativação alcalina de lamas residuais das minas da Panasqueira incorporando vidro moído," Universidade da Beira Interior, 2013.
- [48] E. Mohammed, "FORMULATION ET TENUE AU FEU DES MATÉRIAUX CIMENTAIRES RENFORCÉS DE FIBRES DE DIFFÉRENTES NATURES," Université Abdelhamid Ibn Badis - Mostaganem, 2012.
- [49] W. Gustavo, V. Saavedra, and R. Mejía De Gutiérrez, "Performance of geopolymer concrete composed of fly ash after exposure to elevated temperatures," 2017.

Anexos

Anexo I - Composição das misturas e resultados obtidos dos ensaios de compressão e TGA

TGA	100MD		Nota: a lama não reage completamente		
7,99%	Lamas residuais	4437,85 g	Antes		
	Vidro moído	0,00 g	0,00	0,00	Mpa
	Metacaulino	0,00 g	0,00	0,00	Mpa
	Agredado	0,00 g	0,00	0,00	Mpa
	Silicato de sódio	1167,86 g	Depois		
	Hidróxido de sódio	389,29 g	16,30	31,60	Mpa
	Agente A	0,00 g	28,50	22,60	Mpa
	Cortiça	0,00 g	23,00	24,40	Mpa

#DIV/0!

TGA	80MD-10GL-10MK				
11,08%	Lamas residuais	2144,69 g	Antes		
	Vidro moído	219,09 g	11,20	10,10	Mpa
	Metacaulino	227,80 g	10,00	11,20	Mpa
	Agredado	0,00 g	10,40	10,58	Mpa
	Silicato de sódio	682,00 g	Depois		
	Hidróxido de sódio	227,33 g	29,30	28,10	Mpa
	Agente A	0,00 g	27,40	29,10	Mpa
	Cortiça	0,00 g	31,40	29,06	Mpa

175%

TGA	80MD-20GL				
8,71%	Lamas residuais	2309,66 g	Antes		
	Vidro moído	471,89 g	5,40	3,20	Mpa
	Metacaulino	0,00 g	3,20	3,20	Mpa
	Agredado	0,00 g	3,50	3,70	Mpa
	Silicato de sódio	731,99 g	Depois		
	Hidróxido de sódio	244,00 g	33,50	25,80	Mpa
	Agente A	0,00 g	27,60	28,90	Mpa
	Cortiça	0,00 g	36,60	30,48	Mpa

724%

TGA	50MD-25GL-25MK					
8,67%	Lamas residuais	1391,99	g	Antes		
	Vidro moído	568,80	g	29,20	31,60	Mpa
	Metacaulino	591,41	g	30,90	19,40	Mpa
	Agredado	0,00	g	31,90	30,90	Mpa
	Silicato de sódio	671,63	g	Depois		
	Hidróxido de sódio	223,88	g	21,60	26,60	Mpa
	Agente A	0,00	g	30,30	24,50	Mpa
	Cortiça	0,00	g	26,90	25,98	Mpa

-16%

TGA	50GL-50MK			Nota: Foi necessário aumentar os activadores		
10,03%	Lamas residuais	0,00	g	Antes		
	Vidro moído	1137,60	g	20,90	22,60	Mpa
	Metacaulino	1182,83	g	20,80	21,10	Mpa
	Agredado	0,00	g	21,60	21,40	Mpa
	Silicato de sódio	812,33	g	Depois		
	Hidróxido de sódio	255,93	g	30,00	35,40	Mpa
	Agente A	0,00	g	34,90	38,80	Mpa
	Cortiça	0,00	g	32,60	34,34	Mpa

60%

TGA	55MD-27GL-18MK-10C					
10,68%	Lamas residuais	1347,44	g	Antes		
	Vidro moído	540,59	g	21,20	19,10	Mpa
	Metacaulino	374,72	g	19,40	18,90	Mpa
	Agredado	0,00	g	20,40	19,80	Mpa
	Silicato de sódio	595,46	g	Depois		
	Hidróxido de sódio	198,49	g	29,10	21,30	Mpa
	Agente A	0,00	g	23,30	28,70	Mpa
	Cortiça	11,09	g	28,20	26,12	Mpa

32%

TGA	60MD-20GL-20MK						
9,93%	Lamas residuais	1633,26	g	Antes			33%
	Vidro moído	444,93	g	18,70	17,90	Mpa	
	Metacaulino	462,62	g	16,00	18,90	Mpa	
	Agredado	0,00	g	18,00	17,90	Mpa	
	Silicato de sódio	668,63	g	Depois			
	Hidróxido de sódio	222,88	g	20,80	18,70	Mpa	
	Agente A	0,00	g	19,20	35,70	Mpa	
	Cortiça	0,00	g	24,60	23,80	Mpa	

TGA	60MD-20GL-20MK-10C						
8,59%	Lamas residuais	1469,94	g	Antes			36%
	Vidro moído	400,44	g	19,70	18,00	Mpa	
	Metacaulino	416,35	g	16,10	15,70	Mpa	
	Agredado	0,00	g	17,40	17,38	Mpa	
	Silicato de sódio	601,77	g	Depois			
	Hidróxido de sódio	200,59	g	25,00	24,80	Mpa	
	Agente A	0,00	g	18,20	23,30	Mpa	
	Cortiça	11,09	g	26,50	23,56	Mpa	

TGA	100MK			Razão	1,1		
13,67%	Lamas residuais	0,00	g	Antes			-13%
	Vidro moído	0,00	g	19,40	18,70	Mpa	
	Metacaulino	2278,03	g	23,50	21,10	Mpa	
	Areia	0,00	g	19,40	20,42	Mpa	
	Silicato de sódio	1553,20	g	Depois			
	Hidróxido de sódio	517,73	g	19,30	15,20	Mpa	
	Agente A	0,00	g	17,90	20,60	Mpa	
	Cortiça	0,00	g	16,20	17,84	Mpa	

TGA	100GL			Nota:	o vidro não reage completamente		
7,45%	Lamas residuais	0,00	g	Antes			-100%
	Vidro moído	2190,93	g	17,50	15,80	Mpa	
	Metacaulino	0,00	g	16,20	14,50	Mpa	
	Areia	0,00	g	17,80	16,36	Mpa	
	Silicato de sódio	576,56	g	Depois			
	Hidróxido de sódio	192,19	g	0,00	0,00	Mpa	
	Agente A	0,00	g	0,00	0,00	Mpa	
	Cortiça	0,00	g	0,00	0,00	Mpa	

TGA	80MD-20MK					
8,82%	Lamas residuais	2309,66	g	Antes		
	Vidro moído	0,00	g	18,10	19,30	Mpa
	Metacaulino	490,65	g	18,90	16,90	Mpa
	Areia	0,00	g	19,00	18,44	Mpa
	Silicato de sódio	736,93	g	Depois		
	Hidróxido de sódio	245,64	g	25,20	25,30	Mpa
	Agente A	0,00	g	23,80	24,00	Mpa
	Cortiça	0,00	g	25,30	24,72	Mpa

34%

TGA	80MD-10GL-10MK-10C					
8,69%	Lamas residuais	2004,46	g	Antes		
	Vidro moído	204,77	g	12,10	10,30	Mpa
	Metacaulino	212,91	g	10,00	10,90	Mpa
	Areia	0,00	g	8,90	10,44	Mpa
	Silicato de sódio	637,40	g	Depois		
	Hidróxido de sódio	212,47	g	31,70	25,20	Mpa
	Agente A	0,00	g	28,70	19,20	Mpa
	Cortiça	11,34	g	27,80	26,52	Mpa

154%

TGA	55MD-27GL-18MK					
10,92%	Lamas residuais	1497,16	g	Antes		
	Vidro moído	600,65	g	21,90	20,40	Mpa
	Metacaulino	416,35	g	21,60	20,50	Mpa
	Areia	0,00	g	20,80	21,04	Mpa
	Silicato de sódio	661,62	g	Depois		
	Hidróxido de sódio	220,54	g	38,80	25,30	Mpa
	Agente A	0,00	g	22,00	20,80	Mpa
	Cortiça	0,00	g	44,40	30,26	Mpa

44%

TGA	80MD-10GL-10MK-20C					
8,86%	Lamas residuais	1742,15	g	Antes		
	Vidro moído	177,97	g	7,90		Mpa
	Metacaulino	185,05	g	7,30		Mpa
	Areia	0,00	g	7,70	7,63	Mpa
	Silicato de sódio	553,99	g	Depois		
	Hidróxido de sódio	184,66	g	31,10	28,20	Mpa
	Agente A	0,00	g	29,70		Mpa
	Cortiça	22,18	g	26,90	28,98	Mpa

280%

TGA	55MD-27GL-18MK-20C					
11,07%	Lamas residuais	1197,73	g	Antes		
	Vidro moído	480,52	g	11,50	11,40	Mpa
	Metacaulino	333,08	g	10,90	10,10	Mpa
	Areia	0,00	g	10,80	10,94	Mpa
	Silicato de sódio	529,30	g	Depois		
	Hidróxido de sódio	176,43	g	42,50	28,80	Mpa
	Agente A	0,00	g	44,40	52,00	Mpa
	Cortiça	22,18	g	40,00	41,54	Mpa

280%

TGA	C25/30 S3 XC1(P) D22 CL0,4					
9,60%	Lamas residuais	0,00	g	Antes		
	Vidro moído	0,00	g	46,20	51,40	Mpa
	Metacaulino	0,00	g	49,80	45,70	Mpa
	Areia	0,00	g	53,00	49,22	Mpa
	Silicato de sódio	0,00	g	Depois		
	Hidróxido de sódio	0,00	g	12,50	19,10	Mpa
	Agente A	0,00	g	15,40	16,90	Mpa
	Cortiça	0,00	g	11,90	15,16	Mpa

-69%

Anexo II - Folha de cálculo da composição das misturas

Composição da Mistura Geopolimérica																																																											
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">NaOH - Hidróxido</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Concentração</td> <td>10 M</td> </tr> <tr> <td>Densidade</td> <td>1,3242 g/cm³</td> </tr> <tr> <td>Massa NaOH em função da razão Silicato/NaOH</td> <td>498,38 g</td> </tr> <tr> <td>Volume NaOH em função da razão Silicato/Na₂O</td> <td>376,36 cm³</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Para Massa de Na₂O (B6)</td> </tr> <tr> <td>NaOH (g)</td> <td>148,82 g</td> </tr> <tr> <td>H₂O (g)</td> <td>349,56 g</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Para 100g de NaOH</td> </tr> <tr> <td>NaOH (g)</td> <td>29,86 g</td> </tr> <tr> <td>H₂O (g)</td> <td>70,14 g</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Número de moles para a Massa de Na₂O (B6)</td> </tr> <tr> <td>NaOH</td> <td>3,7205 mol</td> </tr> <tr> <td>H₂O</td> <td>19,4202 mol</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Número de moles/massas totais</td> </tr> <tr> <td>H₂O</td> <td>21,2804 mol</td> </tr> <tr> <td>Massa (H₂O)</td> <td>383,05 g</td> </tr> <tr> <td>Massa (Na₂O)</td> <td>115,30 g</td> </tr> </tbody> </table>			NaOH - Hidróxido		Concentração	10 M	Densidade	1,3242 g/cm ³	Massa NaOH em função da razão Silicato/NaOH	498,38 g	Volume NaOH em função da razão Silicato/Na ₂ O	376,36 cm ³	Para Massa de Na ₂ O (B6)		NaOH (g)	148,82 g	H ₂ O (g)	349,56 g	Para 100g de NaOH		NaOH (g)	29,86 g	H ₂ O (g)	70,14 g	Número de moles para a Massa de Na ₂ O (B6)		NaOH	3,7205 mol	H ₂ O	19,4202 mol	Número de moles/massas totais		H ₂ O	21,2804 mol	Massa (H ₂ O)	383,05 g	Massa (Na ₂ O)	115,30 g																					
NaOH - Hidróxido																																																											
Concentração	10 M																																																										
Densidade	1,3242 g/cm ³																																																										
Massa NaOH em função da razão Silicato/NaOH	498,38 g																																																										
Volume NaOH em função da razão Silicato/Na ₂ O	376,36 cm ³																																																										
Para Massa de Na ₂ O (B6)																																																											
NaOH (g)	148,82 g																																																										
H ₂ O (g)	349,56 g																																																										
Para 100g de NaOH																																																											
NaOH (g)	29,86 g																																																										
H ₂ O (g)	70,14 g																																																										
Número de moles para a Massa de Na ₂ O (B6)																																																											
NaOH	3,7205 mol																																																										
H ₂ O	19,4202 mol																																																										
Número de moles/massas totais																																																											
H ₂ O	21,2804 mol																																																										
Massa (H ₂ O)	383,05 g																																																										
Massa (Na ₂ O)	115,30 g																																																										
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Precusores</th> <th colspan="2">%</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Lamas residuais</td> <td>80</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Vidro moído</td> <td>10</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Metacaulino</td> <td>10</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>			Precusores		%		Lamas residuais	80			Vidro moído	10			Metacaulino	10																																											
Precusores		%																																																									
Lamas residuais	80																																																										
Vidro moído	10																																																										
Metacaulino	10																																																										
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Composição Química dos Precusores (%)</th> <th rowspan="2">Densidade [g/cm³]</th> </tr> <tr> <th>Na₂O</th> <th>SiO₂</th> <th>Al₂O₃</th> <th>H₂O</th> <th>K₂O</th> <th>CaO</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Lamas residuais</td> <td>1,41</td> <td>47,42</td> <td>21,27</td> <td>0,00</td> <td>4,38</td> <td>0,92</td> <td>3,0933</td> </tr> <tr> <td>Vidro moído</td> <td>9,72</td> <td>73,93</td> <td>0,00</td> <td>0,00</td> <td>0,69</td> <td>12,83</td> <td>2,5280</td> </tr> <tr> <td>Metacaulino</td> <td>0,10</td> <td>61,26</td> <td>27,00</td> <td>0,00</td> <td>0,05</td> <td>6,62</td> <td>2,6285</td> </tr> <tr> <td>HARSCO</td> <td>0,09</td> <td>15,72</td> <td>5,77</td> <td>0,00</td> <td>0,05</td> <td>35,21</td> <td>2,9400</td> </tr> <tr> <td colspan="7">argex</td> <td>1,2000</td> </tr> <tr> <td>Total</td> <td>2,11</td> <td>51,46</td> <td>19,72</td> <td>0,00</td> <td>3,58</td> <td>2,68</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>			Composição Química dos Precusores (%)		Densidade [g/cm ³]	Na ₂ O	SiO ₂	Al ₂ O ₃	H ₂ O	K ₂ O	CaO	Lamas residuais	1,41	47,42	21,27	0,00	4,38	0,92	3,0933	Vidro moído	9,72	73,93	0,00	0,00	0,69	12,83	2,5280	Metacaulino	0,10	61,26	27,00	0,00	0,05	6,62	2,6285	HARSCO	0,09	15,72	5,77	0,00	0,05	35,21	2,9400	argex							1,2000	Total	2,11	51,46	19,72	0,00	3,58	2,68	
Composição Química dos Precusores (%)		Densidade [g/cm ³]																																																									
Na ₂ O	SiO ₂		Al ₂ O ₃	H ₂ O	K ₂ O	CaO																																																					
Lamas residuais	1,41	47,42	21,27	0,00	4,38	0,92	3,0933																																																				
Vidro moído	9,72	73,93	0,00	0,00	0,69	12,83	2,5280																																																				
Metacaulino	0,10	61,26	27,00	0,00	0,05	6,62	2,6285																																																				
HARSCO	0,09	15,72	5,77	0,00	0,05	35,21	2,9400																																																				
argex							1,2000																																																				
Total	2,11	51,46	19,72	0,00	3,58	2,68																																																					
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Nº de amostras</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td></td> <td>1</td> </tr> </tbody> </table>			Nº de amostras			1																																																					
Nº de amostras																																																											
	1																																																										
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Massa dos Precusores</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td></td> <td>1993,53 g</td> </tr> </tbody> </table>			Massa dos Precusores			1993,53 g																																																					
Massa dos Precusores																																																											
	1993,53 g																																																										
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Na₂O/Si / NaOH</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td></td> <td>4,0</td> </tr> </tbody> </table>			Na ₂ O/Si / NaOH			4,0																																																					
Na ₂ O/Si / NaOH																																																											
	4,0																																																										
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Precursor / Na₂O₂Si</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td></td> <td>1,0</td> </tr> </tbody> </table>			Precursor / Na ₂ O ₂ Si			1,0																																																					
Precursor / Na ₂ O ₂ Si																																																											
	1,0																																																										
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Volume Total da Amostra</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td></td> <td>1000,00 cm³</td> </tr> </tbody> </table>			Volume Total da Amostra			1000,00 cm ³																																																					
Volume Total da Amostra																																																											
	1000,00 cm ³																																																										
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Volume Real da Amostra</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td></td> <td>2310,77 cm³</td> </tr> </tbody> </table>			Volume Real da Amostra			2310,77 cm ³																																																					
Volume Real da Amostra																																																											
	2310,77 cm ³																																																										
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Densidade Na₂O₂Si</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td></td> <td>1,5725 [g/cm³]</td> </tr> </tbody> </table>			Densidade Na ₂ O ₂ Si			1,5725 [g/cm ³]																																																					
Densidade Na ₂ O ₂ Si																																																											
	1,5725 [g/cm ³]																																																										
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">SP</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>2%</td> <td>39,87053333</td> </tr> <tr> <td>1%</td> <td>19,93526667</td> </tr> <tr> <td>0,50%</td> <td>9,967633333</td> </tr> </tbody> </table>			SP		2%	39,87053333	1%	19,93526667	0,50%	9,967633333																																																	
SP																																																											
2%	39,87053333																																																										
1%	19,93526667																																																										
0,50%	9,967633333																																																										
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Massas Finais para a Mistura</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Lamas residuais</td> <td>1649,76 g</td> </tr> <tr> <td>Vidro moído</td> <td>168,53 g</td> </tr> <tr> <td>Metacaulino</td> <td>175,23 g</td> </tr> <tr> <td>HARSCO</td> <td>0,00 g</td> </tr> <tr> <td>Silicato de sódio</td> <td>1993,53 g</td> </tr> <tr> <td>Hidróxido de sódio</td> <td>498,38 g</td> </tr> <tr> <td>ARGEX</td> <td>0,00 g</td> </tr> <tr> <td>precursor/activator</td> <td>2,85</td> </tr> <tr> <td>activator</td> <td>699,48 g</td> </tr> <tr> <td>sodium silicate</td> <td>3</td> </tr> <tr> <td>sodium hydroxide</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>sodium silicate</td> <td>524,61228 g</td> </tr> <tr> <td>sodium hydroxide</td> <td>174,87 g</td> </tr> </tbody> </table>			Massas Finais para a Mistura		Lamas residuais	1649,76 g	Vidro moído	168,53 g	Metacaulino	175,23 g	HARSCO	0,00 g	Silicato de sódio	1993,53 g	Hidróxido de sódio	498,38 g	ARGEX	0,00 g	precursor/activator	2,85	activator	699,48 g	sodium silicate	3	sodium hydroxide	1	sodium silicate	524,61228 g	sodium hydroxide	174,87 g																													
Massas Finais para a Mistura																																																											
Lamas residuais	1649,76 g																																																										
Vidro moído	168,53 g																																																										
Metacaulino	175,23 g																																																										
HARSCO	0,00 g																																																										
Silicato de sódio	1993,53 g																																																										
Hidróxido de sódio	498,38 g																																																										
ARGEX	0,00 g																																																										
precursor/activator	2,85																																																										
activator	699,48 g																																																										
sodium silicate	3																																																										
sodium hydroxide	1																																																										
sodium silicate	524,61228 g																																																										
sodium hydroxide	174,87 g																																																										
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Composição Química do Activador Composto (g)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td></td> <td>Na₂O</td> <td>SiO₂</td> <td>Al₂O₃</td> <td>H₂O</td> <td>K₂O</td> <td>CaO</td> </tr> <tr> <td>Silicato</td> <td>171,443</td> <td>554,200</td> <td>7,974</td> <td>1259,909</td> <td>0,000</td> <td>0,000</td> </tr> <tr> <td>Hidróxido</td> <td>115,297</td> <td>0,000</td> <td>0,000</td> <td>383,047</td> <td>0,000</td> <td>0,000</td> </tr> <tr> <td>Precusores</td> <td>42,055</td> <td>1025,769</td> <td>393,044</td> <td>15,000</td> <td>71,324</td> <td>53,450</td> </tr> <tr> <td>Total</td> <td>328,796</td> <td>1579,970</td> <td>401,018</td> <td>1657,956</td> <td>71,324</td> <td>53,450</td> </tr> <tr> <td>Total (mol)</td> <td>5,305</td> <td>26,293</td> <td>3,933</td> <td>92,109</td> <td>0,757</td> <td>1,026</td> </tr> </tbody> </table>			Composição Química do Activador Composto (g)			Na ₂ O	SiO ₂	Al ₂ O ₃	H ₂ O	K ₂ O	CaO	Silicato	171,443	554,200	7,974	1259,909	0,000	0,000	Hidróxido	115,297	0,000	0,000	383,047	0,000	0,000	Precusores	42,055	1025,769	393,044	15,000	71,324	53,450	Total	328,796	1579,970	401,018	1657,956	71,324	53,450	Total (mol)	5,305	26,293	3,933	92,109	0,757	1,026													
Composição Química do Activador Composto (g)																																																											
	Na ₂ O	SiO ₂	Al ₂ O ₃	H ₂ O	K ₂ O	CaO																																																					
Silicato	171,443	554,200	7,974	1259,909	0,000	0,000																																																					
Hidróxido	115,297	0,000	0,000	383,047	0,000	0,000																																																					
Precusores	42,055	1025,769	393,044	15,000	71,324	53,450																																																					
Total	328,796	1579,970	401,018	1657,956	71,324	53,450																																																					
Total (mol)	5,305	26,293	3,933	92,109	0,757	1,026																																																					
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Composição Precursor + Activador (g)</th> <th rowspan="2">KAMALLOO ET AL.</th> </tr> <tr> <th>Na₂O</th> <th>SiO₂</th> <th>Al₂O₃</th> <th>H₂O</th> <th>K₂O</th> <th>CaO</th> <th>Ra₂O*</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Silicato</td> <td>171,443</td> <td>554,200</td> <td>7,974</td> <td>1259,909</td> <td>0,000</td> <td>0,000</td> <td>171,443</td> </tr> <tr> <td>Hidróxido</td> <td>115,297</td> <td>0,000</td> <td>0,000</td> <td>383,047</td> <td>0,000</td> <td>0,000</td> <td>115,297</td> </tr> <tr> <td>Precusores</td> <td>42,055</td> <td>1025,769</td> <td>393,044</td> <td>15,000</td> <td>71,324</td> <td>53,450</td> <td>113,380</td> </tr> <tr> <td>Total</td> <td>328,796</td> <td>1579,970</td> <td>401,018</td> <td>1657,956</td> <td>71,324</td> <td>53,450</td> <td>400,120</td> </tr> <tr> <td>Total (mol)</td> <td>5,305</td> <td>26,293</td> <td>3,933</td> <td>92,109</td> <td>0,757</td> <td>1,026</td> <td>6,062</td> </tr> </tbody> </table>			Composição Precursor + Activador (g)		KAMALLOO ET AL.	Na ₂ O	SiO ₂	Al ₂ O ₃	H ₂ O	K ₂ O	CaO	Ra ₂ O*	Silicato	171,443	554,200	7,974	1259,909	0,000	0,000	171,443	Hidróxido	115,297	0,000	0,000	383,047	0,000	0,000	115,297	Precusores	42,055	1025,769	393,044	15,000	71,324	53,450	113,380	Total	328,796	1579,970	401,018	1657,956	71,324	53,450	400,120	Total (mol)	5,305	26,293	3,933	92,109	0,757	1,026	6,062							
Composição Precursor + Activador (g)		KAMALLOO ET AL.																																																									
Na ₂ O	SiO ₂		Al ₂ O ₃	H ₂ O	K ₂ O	CaO	Ra ₂ O*																																																				
Silicato	171,443	554,200	7,974	1259,909	0,000	0,000	171,443																																																				
Hidróxido	115,297	0,000	0,000	383,047	0,000	0,000	115,297																																																				
Precusores	42,055	1025,769	393,044	15,000	71,324	53,450	113,380																																																				
Total	328,796	1579,970	401,018	1657,956	71,324	53,450	400,120																																																				
Total (mol)	5,305	26,293	3,933	92,109	0,757	1,026	6,062																																																				
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Composição Precursor + Activador (g)</th> <th rowspan="2">KAMALLOO ET AL.</th> </tr> <tr> <th>Ra₂O/SiO₂</th> <th>Ra₂O/Al₂O₃</th> <th>SiO₂/Al₂O₃</th> <th>H₂O/Ra₂O</th> <th>Na₂O/K₂O</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0,231</td> <td>1,541</td> <td>6,685</td> <td>15,194</td> <td>7,006</td> </tr> <tr> <td>0,31≤X≤0,41</td> <td>1,0≤X≤1,2</td> <td>3,6≤X≤3,8</td> <td>10≤X≤11</td> <td>0,6≤X≤1,0</td> </tr> <tr> <td>FALSO</td> <td>FALSO</td> <td>FALSO</td> <td>FALSO</td> <td>FALSO</td> </tr> </tbody> </table>			Composição Precursor + Activador (g)		KAMALLOO ET AL.	Ra ₂ O/SiO ₂	Ra ₂ O/Al ₂ O ₃	SiO ₂ /Al ₂ O ₃	H ₂ O/Ra ₂ O	Na ₂ O/K ₂ O	0,231	1,541	6,685	15,194	7,006	0,31≤X≤0,41	1,0≤X≤1,2	3,6≤X≤3,8	10≤X≤11	0,6≤X≤1,0	FALSO	FALSO	FALSO	FALSO	FALSO																																		
Composição Precursor + Activador (g)		KAMALLOO ET AL.																																																									
Ra ₂ O/SiO ₂	Ra ₂ O/Al ₂ O ₃		SiO ₂ /Al ₂ O ₃	H ₂ O/Ra ₂ O	Na ₂ O/K ₂ O																																																						
0,231	1,541	6,685	15,194	7,006																																																							
0,31≤X≤0,41	1,0≤X≤1,2	3,6≤X≤3,8	10≤X≤11	0,6≤X≤1,0																																																							
FALSO	FALSO	FALSO	FALSO	FALSO																																																							
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">DAVIDOVITS:</th> <th colspan="6"></th> </tr> <tr> <th>2%</th> <th>1%</th> <th>0,50%</th> <th>Na₂O/SiO₂</th> <th>Na₂O/Al₂O₃</th> <th>SiO₂/Al₂O₃</th> <th>H₂O/Na₂O</th> <th>CaO/Ra₂O</th> <th>CaO/Na₂O</th> <th>SiO₂/CaO</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> <td>0,202</td> <td>1,349</td> <td>6,685</td> <td>17,363</td> <td>0,169</td> <td>0,193</td> <td>25,618</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> <td>0,31≤X≤0,41</td> <td>1,5≤X≤2,42</td> <td>4,86≤X≤5,9</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> <td>FALSO</td> <td>FALSO</td> <td>FALSO</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>			DAVIDOVITS:								2%	1%	0,50%	Na ₂ O/SiO ₂	Na ₂ O/Al ₂ O ₃	SiO ₂ /Al ₂ O ₃	H ₂ O/Na ₂ O	CaO/Ra ₂ O	CaO/Na ₂ O	SiO ₂ /CaO				0,202	1,349	6,685	17,363	0,169	0,193	25,618				0,31≤X≤0,41	1,5≤X≤2,42	4,86≤X≤5,9								FALSO	FALSO	FALSO													
DAVIDOVITS:																																																											
2%	1%	0,50%	Na ₂ O/SiO ₂	Na ₂ O/Al ₂ O ₃	SiO ₂ /Al ₂ O ₃	H ₂ O/Na ₂ O	CaO/Ra ₂ O	CaO/Na ₂ O	SiO ₂ /CaO																																																		
			0,202	1,349	6,685	17,363	0,169	0,193	25,618																																																		
			0,31≤X≤0,41	1,5≤X≤2,42	4,86≤X≤5,9																																																						
			FALSO	FALSO	FALSO																																																						
<table border="1"> <tbody> <tr> <td>total mix</td> <td>2693,01 g</td> </tr> <tr> <td>total water</td> <td>61,56516827 %</td> </tr> <tr> <td>extra water</td> <td>0 g</td> </tr> </tbody> </table>			total mix	2693,01 g	total water	61,56516827 %	extra water	0 g																																																			
total mix	2693,01 g																																																										
total water	61,56516827 %																																																										
extra water	0 g																																																										