

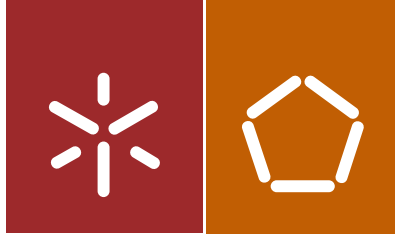


Luís Paulo Veloso de Oliveira Granja

Desempenho comparado entre argamassas geopoliméricas correntes e monofásicas com condutibilidade térmica melhorada

Universidade do Minho
Escola de Engenharia





Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Luís Paulo Veloso de Oliveira Granja

Desempenho comparado entre argamassas
geopoliméricas correntes e monofásicas com
condutibilidade térmica melhorada

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

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

Coorientador:
Doutor Fernando M. Alves S. Pacheco Torgal

Agradecimentos

A realização desta dissertação não seria possível sem o contributo de todos os que me apoiaram e de todos os meios que me foram disponibilizados.

Primeiramente gostaria de agradecer ao Professor Doutor Barroso de Aguiar e ao Doutor Fernando Pacheco Torgal por todo o apoio, disponibilidade, paciência e tempo despendido para que fosse possível a realização desta dissertação.

Agradeço a todo o Departamento de Engenharia Civil, em especial ao Engenheiro Carlos Jesus, por me disponibilizarem todos os meios, conselhos necessários e também paciência para a realização desta dissertação.

Agradeço à minha colega Arquiteta Zahra Tolu Abdollahnejad pelo tempo despendido, pelos conselhos para a realização de todas as misturas e ensaios realizados no Laboratório de Materiais de Engenharia Civil.

Um especial agradecimento aos meus pais, ao meu irmão, à minha namorada e aos meus amigos pelo amor e carinho demonstrado no decorrer de todo o meu percurso académico e pela motivação positiva quando as coisas pareciam menos boas.

Resumo

A redução do consumo de energia em edifícios é uma forma inequívoca de contribuir para uma construção mais sustentável. A utilização de geopolímeros porosos na produção de isolantes térmicos é uma linha de investigação recente e com elevado potencial. A presente dissertação procede a uma análise comparativa entre o desempenho de argamassas geopoliméricas correntes e monofásicas com baixa condutibilidade térmica.

Foram estudadas 60 misturas geopoliméricas, das quais 4 são misturas de geopolímeros monofásicos e as restantes 56 misturas de geopolímeros correntes, com o intuito de analisar de que forma as diferentes percentagens dos diferentes constituintes podem alterar a condutibilidade térmica dos materiais. Para as misturas geopoliméricas correntes, foram analisadas 3 razões entre ativador e ligante, uma primeira com uma razão de 1, uma segunda de 0,8 e uma terceira de 0,6. No entanto, a razão entre o hidróxido de sódio e o silicato de sódio foi sempre constante para todas as misturas, tendo o valor de 2,5. Foi usado também um agente indutor de porosidade, neste caso, o pó de alumínio. O agente indutor de porosidade foi utilizado em todas as 60 misturas, com as percentagens de 0,8%, 1%, 1,2% e 1,5% do peso total das misturas.

Os resultados obtidos mostram que para as argamassas geopoliméricas correntes a absorção de água variou entre um máximo de 58% e um mínimo de 34%. Enquanto que nas argamassas geopoliméricas monofásicas encontrou-se um máximo de 39% e um mínimo de 34%. Relativamente à densidade, esta variou entre um máximo de 1734 kg/m³ e um mínimo de 354 kg/m³ para as argamassas geopoliméricas correntes enquanto nas argamassas geopoliméricas monofásicas a densidade variou entre um máximo de 1035 kg/m³ e um mínimo de 812 kg/m³. Os resultados mostram ainda que a resistência à compressão das argamassas geopoliméricas correntes varia entre um máximo de 7 MPa e um mínimo de 1 MPa. Já nas argamassas geopoliméricas monofásicas os valores obtidos variaram entre 6.9 MPa e 3.4 MPa. Relativamente à condutibilidade térmica constatou-se que para as argamassas geopoliméricas correntes a influência da adição do pó de alumínio depende da razão ativador ligante. O melhor desempenho nestas foi de 0,12 W/m.°C obtido com uma razão ativador ligante de 0.6 e 0.8% de pó de alumínio. Relativamente às argamassas geopoliméricas monofásicas o melhor desempenho foi de 0,13 W/m.°C obtido com 1.2% de pó de alumínio estando em linha com o melhor desempenho das argamassas geopoliméricas correntes.

Palavras-Chave: Eficiência energética, materiais isolantes térmicos, toxicidade, geopolímeros correntes, geopolímeros monofásicos, condutibilidade térmica

Abstract

The reduction of energy consumption in buildings is an unambiguous way to contribute to a more sustainable building. The use of geopolymers in the production of porous thermal insulation is a recent line of research and high potential. This dissertation provides a comparative analysis of the performance of current and monophasic geopoliméricas mortars with low thermal conductivity.

Sixty geopolymeric mixtures were studied, of which 4 are one-part geopolymeric mixtures and the remaining 56 current geopolymeric mixtures, in order to analyze how the different percentages of the various constituents may alter the thermal conductivity of the materials that were studied. For the current geopolymeric mixtures were analyzed 3 activator and binder ratios, with a first ratio of 1, a second of 0,8 and a third of 0.6. The ratio between sodium hydroxide and sodium silicate was always constant for all mixes, and the value was 2.5. Aluminum powder was used as porosity agent in this case. The porosity inducing agent was used in all mixtures 60, with percentages of 0.8%, 1%, 1.2% and 1.5% of the total weight of the mixtures.

The results show that for current geopolymeric mortars, water absorption varied from a maximum of 58% and a minimum of 34% while in the one-part geopolymeric mortars was found a maximum of 39% and a minimum of 34%. Regarding the bulk density, it varied from a maximum of 1734 kg/m³ and a minimum of 354 kg/m³ for current mortars while in one-part geopolymeric mortars the bulk density ranged from a maximum of 1035 kg/m³ and a minimum of 812 kg/m³. The results also show that the compressive strength of current geopolymeric mortars varies between a maximum of 7 MPa and a minimum of 1 MPa while on one-part geopolymeric mortars the results varied between 6.9 MPa and 3.4 MPa. For the thermal conductivity was found that for current geopolymeric mortars the influence of the addition of aluminum powder depends on the ratio of activator/binder. The best performance of these was 0.12 W / m.°C obtained with activator binder ratio 0.6 and 0.8% of aluminum powder. Regarding one-part geopolymeric mortars, the best performance was 0.13 W / m.°C obtained with 1.2% of aluminum powder which is in line with the improved performance of current geopolymeric mortars.

Keywords: Energy efficiency, thermal insulating materials, toxicity, current geopolymers, one-part geopolymers, thermal conductivity

Índice

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Enquadramento	1
1.2	Objetivos e Metodologia.....	2
1.3	Organização da dissertação.....	2
2	ESTADO DE ARTE	5
2.1	Sustentabilidade	5
2.1.1	Substituição do Cimento Portland	5
2.2	Geopolímeros.....	7
2.2.1	Enquadramento	7
2.2.2	Aspectos estruturais dos geopolímeros.....	11
2.2.3	Propriedades dos geopolímeros	13
2.2.4	Vantagens dos geopolímeros	15
2.2.5	Desvantagens dos geopolímeros	16
2.2.6	Aplicações dos geopolímeros	16
2.2.7	Geopolímeros monofásicos	18
2.3	Aplicação do geopolímero estudada	19
2.3.1	Isolamentos térmicos	19
2.3.2	Toxicidade dos isolamentos térmicos	22
3	MATERIAIS, COMPOSIÇÕES E ENSAIOS.....	25
3.1	Introdução.....	25
3.2	Materiais	26
3.2.1	Agregados	26
3.2.1.1	Areia fina.....	26
3.2.2	Ligantes.....	28
3.2.2.1	Cimento.....	28
3.2.2.2	Cinzas Volantes	30
3.2.2.3	Hidróxido de Cálcio	31
3.2.2.4	Metacaulino Aditivado com Hidróxido de Sódio	32
3.2.3	Ativadores	36
3.2.5.1	Silicato de Sódio	37
3.2.5.2	Hidróxio de Sódio	38
3.2.4	Pó de Alumínio	39
3.2.5	Água.....	41
3.2.6	Superplastificante.....	41
3.3	Composições	43
3.4	Ensaio com argamassas	45
3.4.1	Amassaduras	45
3.4.2	Moldagem e conservação	48
3.4.3	Densidade aparente por imersão	51
3.4.4	Absorção de água por imersão	53
3.4.5	Resistência à Compressão	53
3.4.6	Condutibilidade Térmica.....	55
4.	APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	59
4.1	Densidade aparente	59
4.1.1	Densidade aparente nas argamassas geopoliméricas monofásicas.....	60
4.1.2	Densidade aparente nas argamassas geopoliméricas correntes.....	60
4.1.3	Análise	62

4.2	Absorção de água por imersão.....	62
4.2.1	Absorção de água por imersão nas argamassas geopoliméricas monofásicas.....	63
4.2.2	Absorção de água por imersão nas argamassas geopoliméricas correntes.....	63
4.2.3	Análise.....	65
4.3	Condutibilidade térmica.....	66
4.3.1	Condutibilidade térmica nas argamassas geopoliméricas monofásicas.....	67
4.3.2	Condutibilidade térmica nas argamassas geopoliméricas correntes.....	68
4.3.3	Análise.....	69
4.4	Resistência à compressão.....	70
4.4.1	Resistência à compressão nas argamassas geopoliméricas monofásicas.....	70
4.4.2	Resistência à compressão nas argamassas geopoliméricas correntes.....	71
4.4.3	Análise.....	72
4.5	Considerações económicas.....	74
5.	CONCLUSÕES.....	79
5.1	Trabalhos futuros.....	83
6.	REFERÊNCIAS.....	85
ANEXOS.....		89

Índice de figuras

Capítulo 2

Figura 1- Desagregação do consumo de energia na produção de betão pronto.....	5
Figura 2 - Previsão do consumo de cimento Portland	6
Figura 3 - Formação de geopolimeros	12
Figura 4 – Estrutura do Poli(sialato)	12
Figura 5 - Estrutura do Poli(sialato-siloxo).....	12
Figura 6 - Estrutura do Poli(sialato-di-siloxo)	13
Figura 7 - Aspetos estruturais e nomenclatura	13
Figura 8 - Quadro geral de aplicação dos geopolímeros	17
Figura 9- Valor médio do índice de toxicidade para diferentes isolamentos térmicos	23

Capítulo 3

Figura 10 - Materiais utilizados	26
Figura 11 - Areia fina	27
Figura 12 - Cimento utilizado.....	29
Figura 13 - Cinzas volantes	31
Figura 14 - Hidróxido de cálcio	32
Figura 15 - Moinho de trituração	35
Figura 16 - Forno usado na obtenção do metacaulino aditivado	35
Figura 17 - Metacaulino aditivado saído do forno	36
Figura 18 - Silicato de sódio	37
Figura 19 - Hidróxido de sódio	38
Figura 20 - Pó de alumínio	40
Figura 21 - Superplastificante	42
Figura 22 - Balança	46

Figura 23 - Misturadora (Cap. máxima de 3L)	46
Figura 24 - Recipiente metálico usado para fazer a solução de hidróxido de sódio	47
Figura 25 - Molde cúbico metálico para 3 provetes	48
Figura 26 - Molde cúbico metálico para 3 provetes	49
Figura 27 - Molde cúbico metálico para 9 provetes	50
Figura 28 - Moldes utilizados para os provetes utilizados no ensaio de condutibilidade térmica.....	51
Figura 29 - Prensa de compressão ELE Autotest usada no ensaio.....	54
Figura 30 - Alambeta	55
Figura 31 - Provede cilíndrico pouco poroso	56
Figura 32 - Provede cilíndrico muito poroso	56
Figura 33 - Aparelho Alambeta durante um ensaio	58

Capítulo 4

Figura 34 - Densidade aparente para as misturas com razão água/ligante de 35%	60
Figura 35 - Densidade aparente para as misturas com razão ativador/ligante de 1 com SS/SH =2,5	60
Figura 36 - Densidade aparente para as misturas com razão ativador/ligante de 0,8 com SS/SH=2,5	61
Figura 37 - Densidade aparente para as misturas com razão ativador/ligante de 0,6 com SS/SH=2,5	61
Figura 38 - Média dos valores da percentagem de água absorvida por imersão para uma razão de água/ligante de 35%	63
Figura 39 - Média dos valores da percentagem de água absorvida por imersão para uma razão de ativador/ligante de 1 com SS/SH = 2.5	63
Figura 40 - Média dos valores da percentagem de água absorvida por imersão para uma razão de ativador/ligante de 0.8 com SS/SH = 2.5	64

Figura 41 - Média dos valores da percentagem de água absorvida por imersão para uma razão de ativador/ligante de 0.6 com SS/SH = 2.5	64
Figura 42 - Exemplo de provete usado no ensaio de condutibilidade térmica	66
Figura 43 - Valor da condutibilidade térmica das misturas com uma razão água/ligante de 35% com razão de SS/SH de 2.5	67
Figura 44 - Valor da condutibilidade térmica das misturas com uma razão ativador/ligante de 0,8 com razão de SS/SH de 2.5	68
Figura 45 - Valor da condutibilidade térmica das misturas com uma razão ativador/ligante de 0,6 com razão de SS/SH de 2.5	68
Figura 46 - Resistência à compressão das misturas com uma razão água/ligante de 35%	70
Figura 47 - Resistência à compressão das misturas com uma razão de ativador/ligante de 1	71
Figura 48 - Resistência à compressão das misturas com uma razão de ativador/ligante de 0,8	71
Figura 49 - Resistência à compressão das misturas com uma razão ativador/ligante de 0,6	72
Figura 50 - Custo por quilograma de cada mistura geopolimérica com razão a/l=1	75
Figura 51 - Custo por quilograma de cada mistura geopolimérica com razão a/l=0,8	76
Figura 52 - Custo por quilograma de cada mistura geopolimérica com razão a/l=0,6	77
Figura 53 - Peso dos constituintes da mistura mais cara	78
Figura 54 - Peso dos constituintes da mistura mais barata	78

Índice de tabelas

Capítulo 2

Tabela 1 - Acontecimentos relevantes sobre ligantes obtidos por ativação alcalina e ligantes alcalinos	8
Tabela 2 - Coeficiente de condutibilidade térmica de isolamentos térmicos	20
Tabela 3 - Coeficiente de condutibilidade térmica de diversos materiais	21

Capítulo 3

Tabela 4 - Características químicas	28
Tabela 5 - Características mecânicas	29
Tabela 6 - Características físicas	29
Tabela 7 - Propriedades do hidróxido de sódio	33
Tabela 8 - Análise química do caulino	33
Tabela 9 - Distribuição granulométrica do caulino	34
Tabela 10 - Outras propriedades do caulino	34
Tabela 11 - Propriedades do silicato de sódio	38
Tabela 12 - Propriedades do hidróxido de sódio	39
Tabela 13 - Características técnicas do superplastificante	42
Tabela 14 - Composições e razões das 4 misturas geopoliméricas monofásicas	44
Tabela 15 - Composições e razões das 56 misturas geopoliméricas correntes	44

Capítulo 4

Tabela 16 - Valores introduzidos na ELE Autotest	70
Tabela 17 - Preço por quilograma de todos os materiais usados	74

Anexos

Tabela A1 - Percentagens dos constituintes de cada mistura estudada	90
Tabela A2 - Valores relativos ao peso de todos os materiais sólidos utilizados em cada uma das 60 misturas geopoliméricas.....	98
Tabela A3 - Valores de ativadores e agentes de porosidade de cada mistura	99
Tabela A4 - Ligantes e agregados presentes em cada mistura	101
Tabela A5 - Densidade aparente	103
Tabela A6 - Média dos valores da densidade aparente para a razão água/ligante de 35%	106
Tabela A7 - Média dos valores da densidade aparente para a razão ativador/ligante de 1....	106
Tabela A8 - Média dos valores da densidade aparente para a razão ativador/ligante de 0,8.....	107
Tabela A9 - Média dos valores da densidade aparente para a razão ativador/ligante de 0,6.....	108
Tabela A10 - Média dos valores da percentagem de água absorvida por imersão para uma razão de água/ligante de 35%	109
Tabela A11 - Média dos valores da percentagem da água absorvida por imersão para uma razão ativador/ligante de 1	109
Tabela A12 - Média dos valores da percentagem da água absorvida por imersão para uma razão ativador/ligante de 0,8	110
Tabela A13 - Média dos valores da percentagem da água absorvida por imersão para uma razão ativador/ligante de 0,6	111
Tabela A14 - Absorção de água por imersão (%)	112
Tabela A15 - Condutibilidade Térmica	114
Tabela A16 - Valores da resistência à compressão	116
Tabela A17 - Quadro-resumo dos resultados dos ensaios de todas as misturas	117

1 INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento

No âmbito desta dissertação do Mestrado Integrado em Engenharia Civil da Universidade do Minho, foi proposta a realização de ensaios de forma a fazer uma análise comparativa entre geopolímeros correntes e geopolímeros monofásicos com baixa condutibilidade térmica.

Geopolímeros são polímeros inorgânicos cuja obtenção se dá pela polimerização de matérias-primas naturais de origem geológica contendo aluminossilicatos. É assim, um polímero que é obtido através da ativação alcalina de aluminossilicatos em determinadas condições de pressão e temperatura.

Geopolímeros monofásicos é a designação que se dá para um novo tipo de geopolímeros que na sua constituição não contém adição de silicatos de sódio, constituinte esse que é responsável por uma grande pegada carbónica.

Devido às elevadas emissões de dióxido de carbono (CO_2) libertadas na produção de Cimento Portland, é necessário procurar alternativas que tenham um impacto ambiental menor. Estas emissões provêm, em grande parte, da produção de clínquer de cimento e estão associadas ao elevado nível de emissões provenientes da descarbonização do calcário.

Uma das alternativas que tem estado a ser estudada é a do ligante geopolimérico, por estar associado a baixas emissões de dióxido de carbono. Segundo estudos realizados com recurso a materiais de ativação alcalina, ou geopolímeros, foi verificado que estes possuem maiores resistências do ponto de vista mecânico, maior durabilidade e estabilidade, atingindo certos comportamentos mais rapidamente do que os materiais realizados com utilização de cimento Portland.

1.2 Objetivos e Metodologia

Nesta dissertação será desenvolvida uma análise de desempenho comparativa entre argamassas geopoliméricas correntes e monofásicas com baixa condutibilidade térmica. Posteriormente, irão ser efetuados ensaios para determinar a densidade aparente, a percentagem de absorção de água por imersão, a resistência à compressão e a condutibilidade térmica.

De maneira a facilitar o cumprimento dos objetivos a que me propus, esta dissertação foi dividida em três diferentes fases:

→ 1º Fase – Nesta primeira fase foi realizado um estudo bibliográfico o mais aprofundado possível sobre geopolímeros, a partir de publicações e artigos científicos. Foi também nesta fase que foram definidas as composições que iriam ser efetuadas.

→ 2º Fase – Nesta segunda fase foram efetuados três provetes para cada mistura geopolimérica e após os 28 dias de cura foram determinadas as densidades aparentes e as percentagens de absorção de água por imersão.

→ 3º Fase – Na última fase foram selecionadas algumas das misturas geopoliméricas que tiveram resultados mais interessantes de forma a submetê-las a novos testes, nomeadamente ao ensaio de compressão e de condutibilidade térmica.

1.3 Organização da dissertação

A presente dissertação está dividida em 6 capítulos e um anexo.

→ Capítulo 1 – Neste capítulo introdutório é apresentado um enquadramento geral do tema da presente dissertação, os objetivos e metodologias usados e a organização da mesma.

- Capítulo 2 – É apresentado o Estado de Arte desta dissertação.

- Capítulo 3 – Neste capítulo são referidos os materiais utilizados nas misturas geopoliméricas referidas, as composições das misturas elaboradas e os ensaios efetuados.

- Capítulo 4 – Este capítulo refere-se à apresentação e análise dos resultados obtidos em cada ensaio.

- Capítulo 5 – São apresentadas as conclusões retiradas dos ensaios que foram efetuados.

- Capítulo 6 – São apresentadas as referências bibliográficas que foram utilizadas no decorrer da realização desta dissertação.

2 ESTADO DE ARTE

2.1 Sustentabilidade

2.1.1 Substituição do Cimento Portland

Segundo Pacheco-Torgal & Jalali [2010] os materiais mais consumidos na construção civil e que mais impacto ambiental causam são os agregados, os ligantes e os betões. Estes estão associados à extração de recursos não renováveis, ao consumo de energia e à emissão de gases responsáveis por o efeito de estufa [1].

Na figura 1, é apresentada uma análise do consumo energético na preparação do betão. Verifica-se que o maior responsável pelo elevado impacto ambiental é o cimento Portland [2].

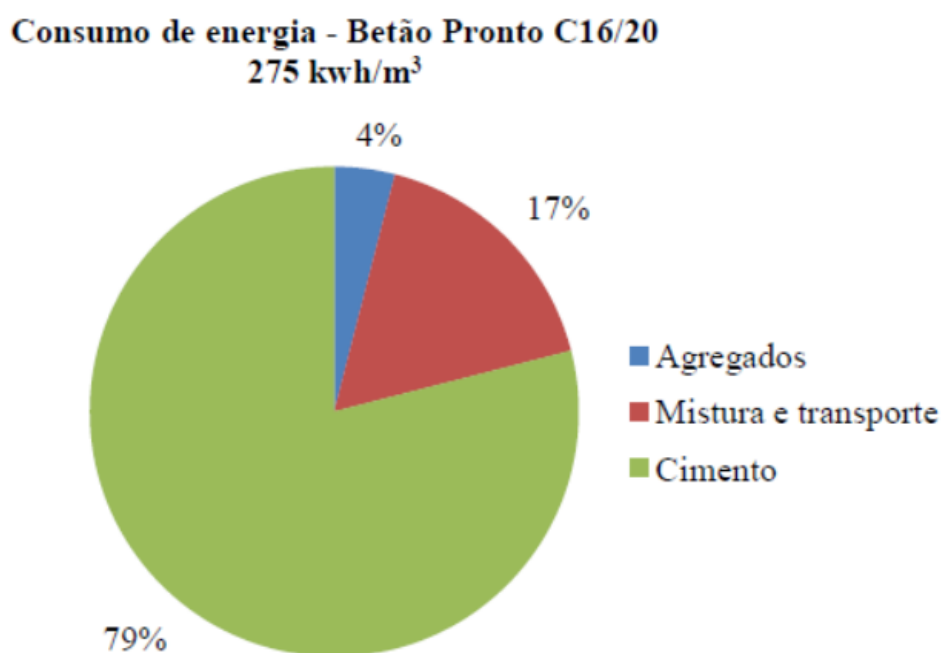


Figura 1- Desagregação do consumo de energia na produção de betão pronto [2].

O cimento Portland é constituído por 60-67% de Cal (CaO), 17-25% de Sílica (SiO₂), 3-8% de Alumina (Al₂O₃) e 0,5-6% de Óxido de Ferro [3].

O clínquer, cimento numa fase inicial de fabrico, tem visto a sua produção a nível mundial aumentar significativamente. Na figura 2, é apresentada uma projecção mundial do consumo do Cimento Portland durante um período de 60 anos [4].

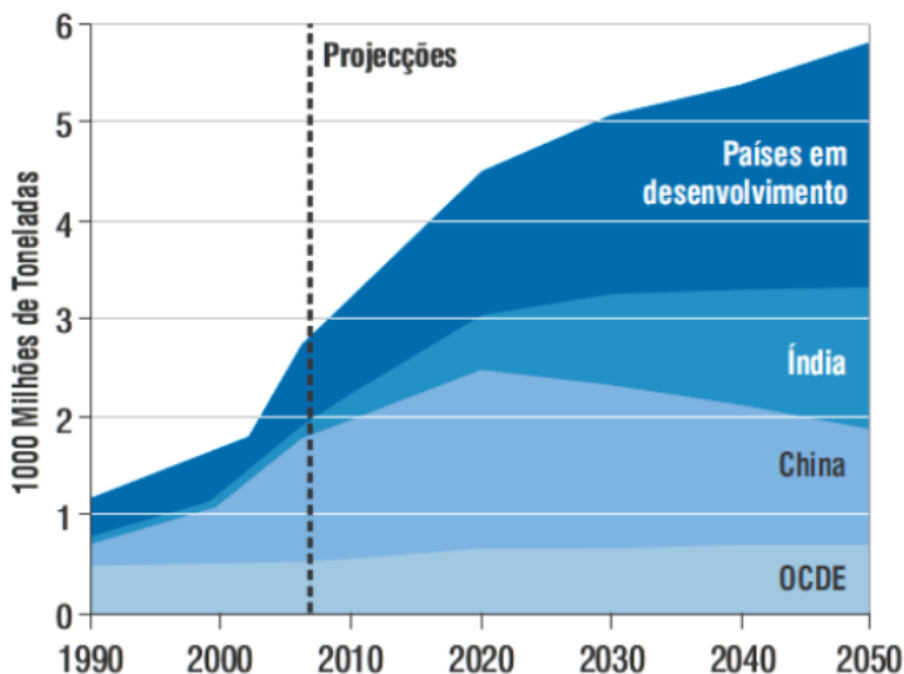


Figura 2 - Previsão do consumo de cimento Portland [4]

Devido às emissões de dióxido de carbono (CO_2) provocadas pela descarbonização do calcário ($CaCO_3$) aquando da crescente produção de cimento Portland, é necessário ter em conta o seu impacto ambiental uma vez que, segundo estudos [4], por cada tonelada de clínquer produzido é libertado para a atmosfera cerca de 580 kg de dióxido de carbono (CO_2) ao que é necessário adicionar cerca de 390 kg de dióxido de carbono (CO_2) derivado da utilização de combustíveis fósseis necessários para a produção de clínquer. Somado, verifica-se que por cada tonelada produzida de clínquer, cerca de 970 kg de dióxido de carbono são libertados para atmosfera. Como se sabe, o fator do impacto ambiental provoca severas alterações climáticas, ao que advém muitas para os países de onde as emissões de dióxido de carbono (CO_2) são emitidas [4].

As indústrias cimenteiras, de modo a reduzir as emissões de dióxido de carbono (CO_2), começaram a produzir cimentos com substituição parcial por filler (pó de pedra), subprodutos de características cimentícias (escórias) e pozolânicas (cinzas volantes). Após análise de estudos, verificou-se que o potencial de redução de emissões de dióxido de carbono (CO_2) através deste processo era limitado e não apresentavam o mesmo tipo de resistência e durabilidade do cimento Portland [4].

Segundo Sousa Coutinho [4], "a elevada alcalinidade do cimento Portland torna-o um material instável ... pelo que a sua duração não será muito longa". O cimento Portland apresenta grandes quantidades de cal, material com uma permeabilidade elevada e susceptível ao ataque químico, o que permite uma maior e mais rápida penetração de agentes agressivos provocando fenómenos de carbonatação e corrosão das armaduras no betão armado.

Devido a todos estes fatores, investigadores por todo o mundo procuram alternativas viáveis e com menor impacto ambiental, para o cimento Portland na produção de betão. Os principais objetivos são a diminuição das emissões prejudiciais à atmosfera mas também o custo de fabrico.

No âmbito desta dissertação, vai ser estudada uma nova família de ligantes mais sustentáveis, ligantes obtidos por ativação alcalina, conhecidos como geopolímeros.

2.2 Geopolímeros

2.2.1 Enquadramento

Os ligantes obtidos por ativação alcalina ou geopoliméricos, remontam à década de 40 com trabalhos realizados por Feret e Purdon [11], que utilizaram escórias ativadas alcalinamente com hidróxido de sódio (NaOH).

Glukhovsky [12], foi o primeiro investigador a estudar ligantes utilizados em construções históricas através de análises efetuadas em templos romanos e nas pirâmides egípcias, ao que concluiu que estas eram compostas por aluminosilicatos cálcicos hidratados, à semelhança do que acontece no cimento Portland.

Em termos históricos, o engenheiro químico francês Davidovits foi o primeiro a utilizar o termo geopolímero em 1978 tendo patenteado investigações sobre a polimerização do metacaulino e ligantes obtidos por ativação alcalina de caulino e metacaulino. A partir deste momento, a temática dos ligantes alcalinos viu aumentar o seu nível de investigação produzida e de divulgação mediática tornando mais vulgar nos dias de hoje o termo geopolímero [13].

Segundo Davidovits, o prefixo “Geo” de geopolímero advém do facto de este material ser inorgânico, duro e estável até temperaturas de cerca 1250°C. O termo "polímero" deve-se ao facto de este material se transformar, policondensar e ganhar forma aquando do seu endurecimento a baixas temperaturas [14].

De maneira geral, um geopolímero apresenta as características de rigidez, resistência mecânica, inércia química e estabilidade, similares a outros materiais sólidos naturais [15].

Na tabela 1 está descrita cronologicamente a evolução do conhecimento relativo a ligantes obtidos por ativação alcalina e ligantes alcalinos [16].

Tabela 1 - Acontecimentos relevantes sobre ligantes obtidos por ativação alcalina e ligantes alcalinos [16].

Autor	Ano	Descrição
Feret	1939	Cimentos com escórias
Purdon	1940	Combinações alcalis-escórias
Glukhovsky	1959	Bases teóricas e desenvolvimento de cimentos alcalinos
Glukhovsky	1965	Primeiros cimentos alcalinos
Davidovits	1979	Termo "Geopolímero"
Malinowski	1979	Caracterização de aquedutos milenares

Tabela 1 (continuação) - Acontecimentos relevantes sobre ligantes obtidos por ativação alcalina e ligantes alcalinos [16].

Autor	Ano	Descrição
Forss	1983	Cimento tipo F
Langton e Roy	1984	Caracterização de materiais em edifícios milenares
Davidovits e Sawyer	1985	Patente do cimento "Pyrament"
Krivenko	1986	Sistemas R2O-RO-SiO2-H2O
Malolepsy e Petri	1986	Ativação de escórias sintéticas
Malek et al.	1986	Cimentos de escórias com resíduos radioativos
Davidovits	1987	Comparação entre betões correntes e betões milenares
Deja e Malolepsy	1989	Resistência ao ataque de cloretos
Kaushal et al.	1989	Cura adiabática de ligantes alcalinos com resíduos nucleares
Roy e Langton	1989	Analogias dos betões milenares
Majundar et al.	1989	Ativação de escórias - C12A7
Talling e brandstetr	1989	Ativação alcalina de escórias
Wu et al.	1990	Ativação de cimento de escórias
Roy et al.	1991	Presença rápida de cimentos ativados alcalinamente
Roy e Silsbee	1992	Revisão sobre cimentos ativados alcalinamente
Palomo e Glasser	1992	Metacaulino com CBC

Tabela 1 (continuação) - Acontecimentos relevantes sobre ligantes obtidos por ativação alcalina e ligantes alcalinos [16].

Autor	Ano	Descrição
Glukhovsky	1994	Betões milenares, modernos e futuros
Krivenko	1994	Cimentos alcalinos
Wang e Scrivener	1995	Microestrutura de escórias ativadas alcalinamente
Shi	1996	Força, estrutura dos poros e permeabilidade das escórias de ativação alcalina
Fernández-Jiménez e Puertas	1997	Estudos cinéticos de cimentos de escórias ativados alcalinamente
Katz	1998	Microestrutura de cinzas volantes ativadas alcalinamente
Davidovits	1999	Aspetos químicos dos sistemas geopoliméricos, tecnologia
Roy	1999	Oportunidades e desafios dos cimentos ativados alcalinamente
Palomo	1999	Cinzas volantes ativadas alcalinamente - um cimento para o futuro
Gong e Yang	2000	Cimento de escória-lama vermelha ativada alcalinamente
Puertas	2000	Cimento de escórias/cinzas volantes ativados alcalinamente
Bakharev	2001-2002	Betão de escórias ativados alcalinamente
Palomo e Palacios	2003	Imobilização de resíduos perigosos

Tabela 1 (continuação) - Acontecimentos relevantes sobre ligantes obtidos por ativação alcalina e ligantes alcalinos [16].

Autor	Ano	Descrição
Grutzeck	2004	Formação de Zeólitos
Sun	2006	Tecnologia dos Sialitos
Duxson	2007	Tecnologia dos Geopolímeros: Estado de Arte
Hajimohammadi, Provis e Deventer	2008	Geopolímeros monofásicos
Provis e Deventer	2009	Geopolímeros: Estrutura, propriedades e aplicações industriais

2.2.2 Aspectos Estruturais dos Geopolímeros

Geopolimerização é o termo atribuído por Davidovits à ativação alcalina devido à sua semelhança com a síntese de polímeros orgânicos de condensação relativamente a condições hidrotérmicas de partida [17].

Ainda de acordo com Davidovits, os geopolímeros são constituídos por uma malha tridimensional em que os átomos de silício intercalam com os átomos de alumínio em coordenação tetraédrica, compartilhando todos os átomos de oxigénio (Figura 3) [17].

Quimicamente, os geopolímeros são associados com o equivalente amorfo de zeólitos sintéticos. Apesar das semelhanças na sua composição química com os zeólitos aluminosilicatos hidratados, diferem destes através da estrutura não alcalina sendo, no entanto, quase totalmente amorfa. Este facto relaciona-se com a velocidade do processo da reação que se desenvolve lentamente e em abundante fase aquosa (favorecendo a formação de cristais) nos zeólitos, rápida e com a fase líquida apenas indispensável à hidratação dos vetores de reação nos geopolímeros [17].

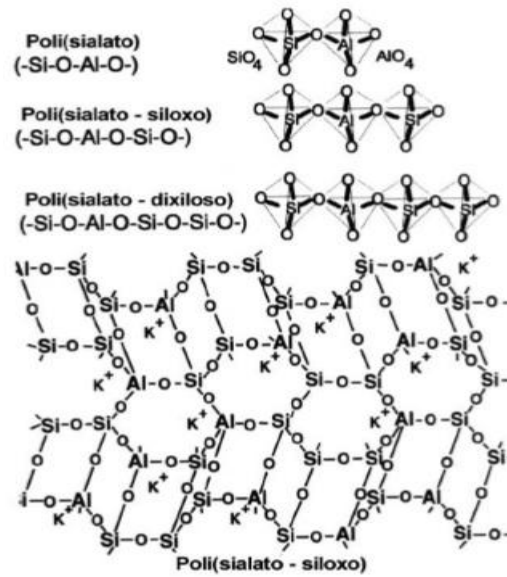


Figura 3 – Formação dos geopolímeros [17].

Os três tipos básicos de estruturas geopoliméricas são propostas tendo em conta o monómero de repetição, como se verifica na Figura 4 a 6:

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



Figura 4 - Estrutura do Poli(sialato) [17]

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



Figura 5 - Estrutura do Poli(sialato-siloxo) [17]

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

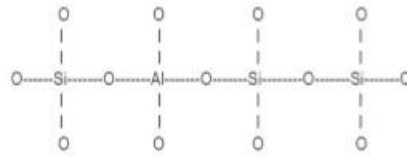


Figura 6 - Estrutura do Poli(sialato-di-siloxo) [17]

Na Figura 7, representa-se a organização espacial correspondente a estas estruturas, similares com os zeólitos de síntese.

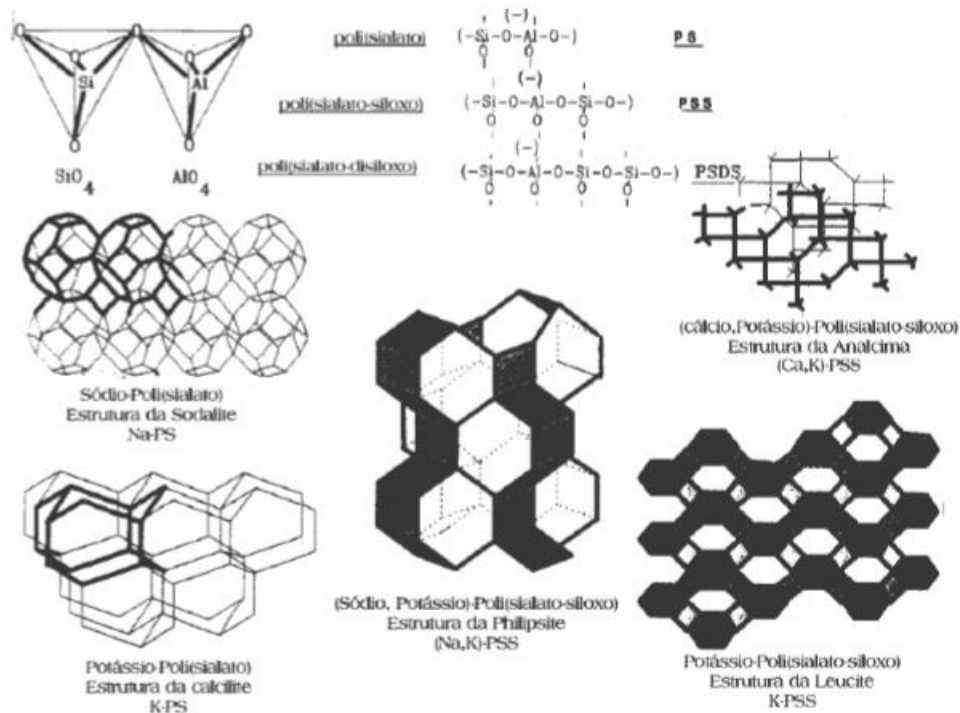


Figura 7 - Aspectos estruturais e nomenclatura [18]

2.2.3 Propriedades dos geopolímeros

Os ligantes geopoliméricos podem ser apresentados sob distintas formas devido à existência de vários precursores geopoliméricos como os ativadores à base de potássio ou sódio e, entre outras, as cinzas volantes, o metacaulino e as escórias.

Teoricamente qualquer material composto por sílica e alumina pode ser ativado alcalinamente e as investigações realizadas até ao momento abrangem matérias de partida como [19] :

- Argilas caulíníficas [20];
- Cinzas volantes [21];
- Escórias de alto-forno [22];
- Metacaulino [23];
- Misturas de cinzas e escórias [24];
- Misturas de cinzas e metacaulino [25];
- Mistura de escórias e metacaulino [26];
- Mistura de escórias e lamas vermelhas [27];
- Mistura de cinzas e materiais não calcinados como caulite e albite [28].

Pode concluir-se que, a partir do componente utilizado no fabrico de ligantes ativados alcalinamente podem ser obtidos distintos comportamentos finais dos geopolímeros.

Em resumo, pode dizer-se que dependendo da composição do ligante geopolimérico, são possíveis as seguintes propriedades [29]:

- Para a resistência à compressão tem se obtido produtos com resistências até os 150 MPa;
- Para a resistência à tração tem se obtido valores até 16 MPa;
- Geopolímetros com resistências a altas temperaturas até aos 1000°C;
- Boa resistência ao desgaste por abrasão (perda de massa máxima inferior a 25%);
- Resistência química elevada;
- Não reagem com os sulfatos;
- Não permitem reações do tipo álcalis-agregado;
- Resistência ao ataque de ácidos em elevadas concentrações.

A resistência dos geopolímeros está dependente do estado do material de partida obtendo-se as menores resistências em aluminosilicatos e maiores resistências em ligantes à base de materiais que sofreram um tratamento térmico como as cinzas volantes, as escórias e o metacaulino [30].

2.2.4 Vantagens dos Geopolímeros

As vantagens dos ligantes geopoliméricos relativamente ao cimento Portland são [31]:

→ Uso de matéria-prima abundante na sua produção: pode ser criado um geopolímero através de uma vulgar pozolana ou através de produtos que contenham na sua composição sílica e alumina;

→ Economia de energia e menor impacto ambiental: a produção de geopolímeros não requer grandes quantidades de energia. A energia utilizada é necessária apenas para obter temperaturas de 600 °C para a obtenção de certas pozolanas. As emissões de dióxido de carbono (CO_2) para a atmosfera são insignificantes, comparando com as emissões na produção de cimento Portland;

→ Produção simples: basta realizar uma mistura de pozolana com o fluido alcalino. O processo de mistura assemelha-se à produção do vulgar betão que utiliza como ligante o cimento Portland;

→ Ganhos de resistência rápidos: os geopolímeros adquirem cerca de 70% da sua resistência à compressão em 4 horas;

→ Excelentes propriedades de durabilidade: possuem uma resistência a ataques de ácidos claramente superiores à resistência de betões convencionais;

→ Elevada resistência ao fogo: os geopolímeros resistem a temperaturas elevadas mantendo propriedades satisfatórias;

→ Baixa condutibilidade térmica;

→ Devido a não possuírem hidróxidos de cálcio livres, não ocorrem fenómenos de carbonatação;

→ Excelente comportamento ao ataque de sulfatos;

2.2.5 Desvantagens dos Geopolímeros

As principais desvantagens são:

- Eflorescência do material;
- Retração;
- Libertação de dióxido de carbono (CO₂) no processo produtivo, relacionado com a produção de metacaulino e silicato de sódio;
- Alta toxicidade de alguns constituintes dos geopolímeros através dos ativadores.

2.2.6 Aplicações dos Geopolímeros

Derivado ao facto de ser ainda um material de utilização recente, encontra-se em grande expansão de utilização uma vez que as suas propriedades se têm mostrado mais vantajosas relativamente a outras alternativas existentes no mercado.

O geopolímero pode ser aplicado na maior parte dos domínios da indústria como construção, indústria automóvel e aeronáutica, entre outras, uma vez que apresentam valores muito satisfatórios no que diz respeito à resistência mecânica, resistência ao gelo-degelo e ao comportamento ao fogo.

Como potenciais aplicações dos geopolímeros podem ser referidos os materiais refratários, os materiais para aplicações balísticas, cimentos para ambientes agressivos e reparações estruturais, retenção de resíduos tóxicos e radioativos, estabilização de solos contaminados, moldes para vários tipos de indústrias, entre outros.

O desenvolvimento dos ligantes geopoliméricos apresenta duas linhas distintas de atuação:

- Uma linha que tem como campo de atuação os materiais de construção, baixo custo e utilização em massa. Nesta linha, os materiais mais usuais como matéria prima são o metacaulino, as cinzas volantes e todos os aluminossilicatos em que a razão atómica de Si/Al esteja compreendida entre 1 e 3 [18].

→ Uma outra linha que tem como campo de atuação a obtenção de materiais mais sofisticados e conseqüentemente mais dispendiosos. Neste caso, a razão atômica pode alcançar valores de 35, podendo mesmo admitir incorporar fibras de diferentes tipos (amianto, carbono, vidro, etc). Segundo Davidovits, estes materiais plásticos podem substituir certos metais e até mesmo produtos cerâmicos. Neste modo de atuação, o material básico é o metacaulino [18].

A Figura 9 mostra uma diversidade de aplicações em função da razão de Si/Al, que variando desde 1 até 35 permite a obtenção de matérias com maior caráter polimérico [18].

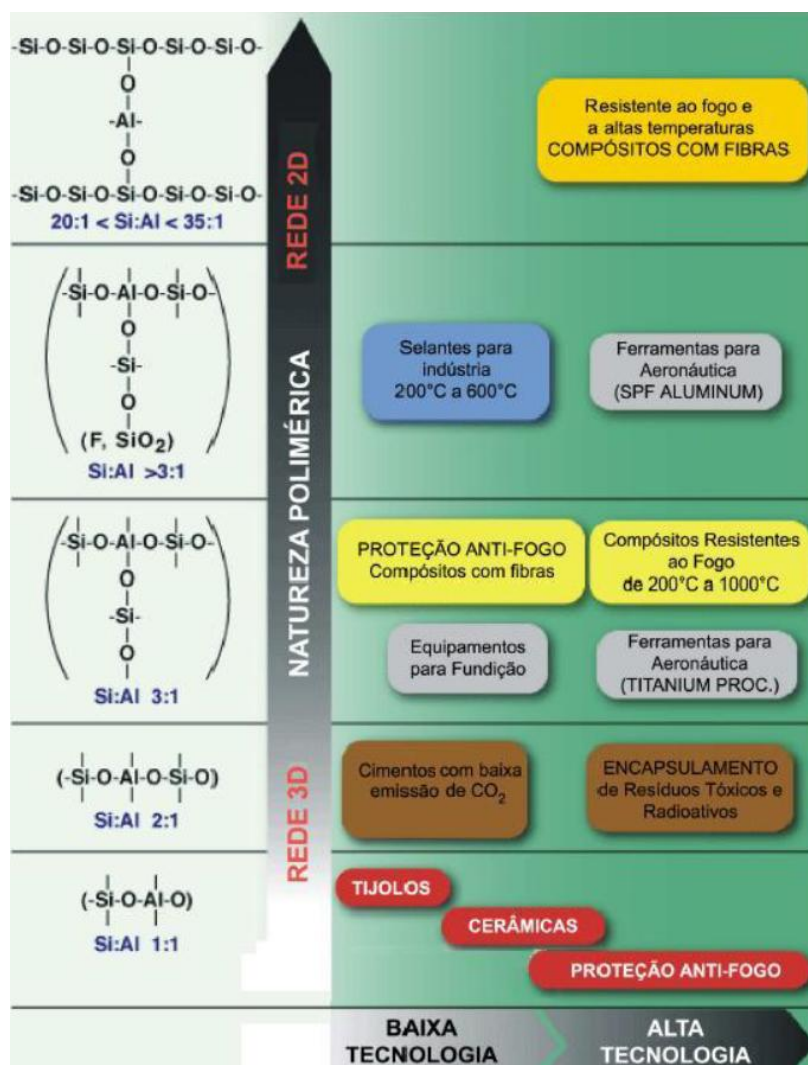


Figura 8- Quadro geral de aplicação dos geopolímeros [18].

2.2.7 Geopolímeros monofásicos

Geopolímeros monofásicos são ligantes ativados alcalinamente sem a adição do ativador silicato de sódio, composto este que é responsável por uma elevada pegada carbônica. Os geopolímeros monofásicos foram relatados pela primeira vez por Hajimohammadi, Provis e Deventer [2008]. Devido ao facto de ser muito recente as investigações e publicações são ainda muito poucas.

Investigações no campo dos ligantes geopoliméricos, declaram que este novo material tem potencial para ser uma alternativa válida ao cimento Portland. De acordo com a Análise de Ciclo de Vida (ACV), os geopolímeros têm um menor impacto no aquecimento global do que o cimento Portland.

Segundo estudos de durabilidade de Abdollahnejad et al. [2011], substituindo 70% de cimento Portland por 58,3% de cinzas volantes, 4% de metacaulino aditivado com hidróxido de sódio e 7,7% de hidróxido de cálcio obtém-se resultados satisfatórios nos ensaios de durabilidade.

Neste mesmo estudo de Abdollahnejad et al. [2011], a durabilidade das argamassas de cimento Portland e a durabilidade de argamassas geopoliméricas monofásicas, foram avaliadas utilizando três ensaios diferentes (absorção de água por imersão, a absorção de água por capilaridade e resistência ao ataque ácido). Os resultados da resistência à compressão revelam que reduzindo a percentagem de cimento Portland das argamassas provoca uma grande redução na resistência à compressão. A adição de cinzas volantes não é suficiente para compensar a redução de cimento Portland devido às suas características de hidratação lenta. Nas misturas geopoliméricos com 4% de metacaulino aditivado com hidróxido de sódio parece corresponder a um bom compromisso entre um baixo teor de cimento Portland e uma resistência à compressão aceitável. Nos resultados de absorção de água por imersão os resultados são muito semelhantes para todas as misturas com maior ou menor percentagem de cimento Portland devido a terem todas a mesma relação água/ligante. A absorção de água por capilaridade é muito alta para misturas geopoliméricas monofásicas com 8% de metacaulino aditivado com hidróxido de sódio o que indica uma microestrutura com alta quantidade de poros capilares. Os resultados da resistência ao ataque ácido mostram que a perda de peso é proporcional ao teor de cimento Portland nas misturas.

2.3 Aplicação do geopolímero estudada

2.3.1 Isolamentos térmicos

Define-se isolantes térmicos tecnicamente como *"os materiais e produtos que apresentam uma condutibilidade térmica inferior a 0,065 W/(m.°C) e uma resistência térmica superior a 0,30 (m².°C)/W"*[5].

A definição teórica de isolante térmico diz-nos que se trata de um material ou estrutura que dificulta a dissipação de calor. São usados na construção devido à sua elevada resistência térmica.

O grande objetivo dos isolamentos térmicos é diminuir ao máximo a transmissão de calor entre diferentes locais. Desempenham hoje em dia um papel crucial na sustentabilidade e conforto das construções. Estão associados à eficiência energética e permitem grandes poupanças energéticas, o que na ótica do utilizador equivale a menores encargos financeiros a nível energético.

Com um correto e adequado isolamento térmico é possível aumentar a resistência térmica das paredes, pavimentos, tetos e coberturas de uma edificação. Alguns dos materiais mais utilizados na construção como revestimentos térmicos são, entre outros, a fibra de vidro, lã de rocha, cortiça, poliestireno e poliuretano.

As matérias-primas utilizadas nos isolantes térmicos dividem-se em quatro categorias tendo em conta a sua natureza;

- Minerais;
- Vegetais;
- Sintéticos;
- Mistos.

No que diz respeito aos isolantes de origem mineral são exemplos as lãs minerais, como a lã de rocha e lã de vidro, a espuma de vidro, perlite expandida, vermiculite expandida, argila expandida e betões leves isolantes como betões com agregados leves com argila, xisto expandido, perlite, entre outros.

No caso dos isolantes de origem vegetal existem, entre outros, os aglomerados de cortiça expandida (ou aglomerado negro de cortiça), os aglomerados de fibras de madeira, lãs de madeira (aglomerados de aparas de madeira mineralizada com cimento), isolantes com base em fibras vegetais (sisal, fibras de coco) .

Relativamente aos isolantes de origem sintética, os mais conhecidos são o poliestireno expandido, o poliestireno expandido extrudido, a espuma rígida de poliuretano, a espuma rígida à base de PVC (policloreto de vinil), a espuma fenólica, entre outros.

Na tabela 2 estão apresentados os valores dos coeficientes de condutibilidade térmica de alguns isolamentos térmicos usados na construção civil.

Tabela 2 - Coeficiente de condutibilidade térmica de isolamentos térmicos [5]

Material	Massa volúmica aparente seca ρ (kg/m³)	Condutibilidade térmica λ W/(m. °C)
EPS – Poliestireno expandido moldado	>20	0,037
MW - Lã mineral - rocha	100 - 180	0,042
MW - Lã mineral - vidro	15 - 100	0,04
XPS – Poliestireno expandido extrudido	25 - 40	0,037
ICB - Aglomerado de cortiça expandido	90 - 140	0,045
PIR – Espuma rígida de poliuretano	20-50	0,04

Na tabela 3 estão apresentados os coeficientes de condutibilidade térmica de outros materiais utilizados no setor da construção.

Tabela 3 - Coeficiente de condutibilidade térmica de diversos materiais [5]

Material	Massa volúmica aparente seca ρ (kg/m³)	Condutibilidade térmica λ W/(m. °C)
Alumínio	2700	230
Aço	7800	50
Granito	2500 - 2700	3,5
Pedra calcária macia	1600 - 1790	1,1
Material cerâmico	2200-2400	1,04
	<1000	0,34
Betão corrente	2300-2600	2
Betão de agregados leves	400-600	0,24
Estuque tradicional	1000 - 1300	0,57
Madeira muito leve	200-435	0,13
Adobe, taipa ou BTC	1770-2000	1,1
Vidro de quartzo	2200	1,4

2.3.2 Toxicidade dos Isolamentos Térmicos

A indústria da construção é, em termos ambientais, responsável por 30% das emissões de carbono, sendo que o parque edificado consome 42% da energia produzida. Muitos dos edifícios existentes sofrem de problemas de humidade exagerada com formação de bolores ou apresentam, em determinados ambientes, humidade relativa abaixo de 40%, o que origina doenças do foro respiratório.

Outro grande problema que afeta a qualidade do ambiente interior dos edifícios, resulta do uso de materiais com algum nível de toxicidade que mesmo respeitando as normas regulamentares, pode afetar a saúde dos utilizadores [6].

Alguns estudos indicam que em caso de incêndio, a maior parte das mortes ocorrem devido à inalação de gases tóxicos relacionados com a rápida combustão de alguns constituintes dos isolamentos térmicos [7].

Três acontecimentos trágicos relacionados com esta questão marcaram os últimos 30 anos. Em 1984, em Bopal na Índia, um complexo industrial de produtos químicos libertou, devido a um desastre químico que deu origem a um incêndio, uma nuvem de isocinato de metilo, material que é obtido a partir da polimerização do estireno e que posteriormente origina o poliestireno, que provocou cerca de 15000 mortos e afetou outras 200000 pessoas [8].

“O fogo é uma ação, considerada normalmente como acidental, com grande influência nos materiais de construção, os quais apresentam comportamentos diferentes à sua ação” [9].

Em 2013 na discoteca "Kiss", localizada na cidade de Santa Maria no estado do Rio Grande do Sul, Brasil, aconteceu outro trágico acidente relacionado com a libertação de gases tóxicos durante um incêndio. Após análise do local do incêndio, peritos concluíram que o poliuretano, material utilizado como isolante na discoteca, foi o responsável pela morte de 242 pessoas.

Outro caso em condições semelhantes ocorreu no país vizinho, Argentina, com a libertação de gases tóxicos durante a combustão do poliuretano ser responsabilizada pela morte de 194 pessoas durante um incêndio na discoteca "República Cromañon".

Apesar destes acontecimentos mencionados estarem relacionados com a libertação de gases tóxicos durante a combustão de poliestireno e poliuretano, Liang & Ho [2007] afirmam que o isolante térmico mais tóxico utilizado atualmente é o polietileno. Como é possível verificar na figura 3, o polietileno tem um índice de toxicidade três vezes superior à fibra de vidro e lã mineral e quase duas vezes superior ao poliuretano. Através do gráfico da figura 9, verifica-se também que as emissões de dióxido de carbono são responsáveis por mais de 50% do nível de toxicidade dos isolamentos térmicos [10].

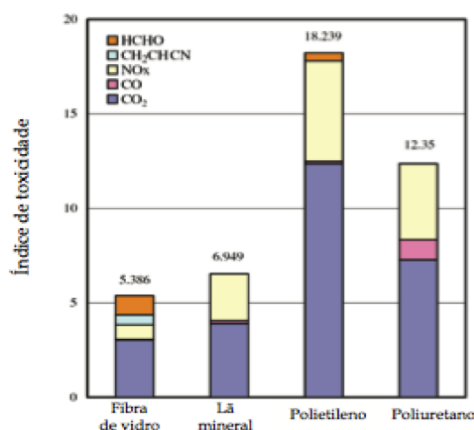


Figura 9 - Valor médio do índice de toxicidade para diferentes isolamentos térmicos.

Torna-se assim importante investigar no sentido de obter materiais isolantes térmicos que tenham um desempenho similar aos já existentes no mercado mas que não possuam as suas desvantagens em termos de toxicidade. Nesta área iniciaram-se recentemente investigações sobre isolantes térmicos obtidos a partir de geopolímeros contudo estes materiais apresentam como desvantagem um preço relativamente elevado pelo que a presente investigação pretende contribuir para perceber se geopolímeros sem silicato de sódio (monofásicos) podem constituir uma alternativa aos geopolímeros correntes como materiais de baixa condutibilidade térmica.

3 MATERIAIS, COMPOSIÇÕES E ENSAIOS

3.1 Introdução

Este capítulo será subdividido em três distintas fases. Nesta primeira fase serão apresentados todos os materiais utilizados ao longo desta dissertação, assim como as suas principais características. Na segunda fase serão analisadas as diferentes composições geopoliméricas usadas ao longo deste trabalho laboratorial. Na terceira e última fase, serão descritos e analisados os diferentes ensaios a que foram submetidas as composições geopoliméricas.

Relativamente aos ensaios efetuados, serão mencionados os equipamentos utilizados assim como as técnicas de ensaio recomendadas pelas normas utilizadas.

Todos os materiais usados e todos os ensaios realizados no âmbito desta dissertação foram obtidos e executados no Laboratório de Materiais de Construção do Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho.

Nesta dissertação são estudadas dois tipos de argamassas geopoliméricas, as misturas geopoliméricas correntes e as monofásicas. As primeiras são activadas com uma solução alcalina (silicato e hidróxido de sódio) enquanto as segundas são apenas misturadas com água. Os segundos no entanto levam caulino que foi misturado com hidróxido de sódio e submetido a tratamento térmico.

3.2 Materiais

Na figura 10 apresentam-se todos os materiais utilizados nesta dissertação.

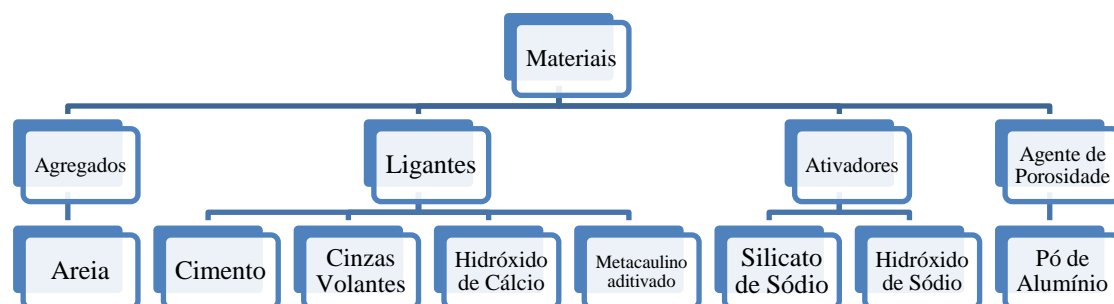


Figura 10 - Materiais utilizados

3.2.1 Agregados

Agregados são materiais com forma e volume variáveis e detentores de dimensões e propriedades adequadas para a elaboração de betão e argamassas. Têm um custo relativamente reduzido, sendo esta uma das principais razões para a sua utilização. Os agregados mais utilizados na construção civil são a areia e a brita.

A denominação agregado tem substituído o termo inerte, anteriormente utilizado por se acreditar que estes materiais não tinham influência no endurecimento do cimento. Atualmente, já se sabe que eles podem influenciar estas transformações, embora sua reatividade seja, geralmente, praticamente nula.

3.2.1.1. Areia Fina

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

As propriedades da areia, como a dureza, a forma dos grãos, a granulometria e a porosidade, alteram as características da argamassa. Outro dos fatores que influencia as características da argamassa é a origem da areia e o seu estado de limpeza. Para a obtenção de uma boa argamassa, o ideal é a utilização de uma areia bem graduada com um menor número de vazios. As areias com maior volume de vazios prejudicam a estrutura porosa da argamassa e exigem traços mais ricos em ligante.

Para este trabalho experimental, foi utilizada uma areia adquirida em Aveiro com a designação de S50, que possui um tamanho médio de partícula de 439,9 μm , com uma granulometria compreendida entre 0,5 mm e 0,063 mm, e com uma massa volúmica de 2600 kg/m^3 (Figura 11).



Figura 11 - Areia fina.

3.2.2 Ligantes

Um ligante é um material que tem como função a aglutinação de outros materiais, como os agregados, influenciando desta forma a resistência do material resultante. Um ligante, em contacto com a água forma uma pasta moldável e maleável, permitindo um fácil manuseamento do material. Ao juntar areia a essa pasta, forma-se uma argamassa que depois de endurecida se torna rígida e resistente. Se à argamassa se juntar brita, obtemos o material chamado betão.

3.2.2.1 Cimento

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

Para esta dissertação laboratorial foi utilizado o cimento Portland CEM I 42,5 R, certificado segundo a NP EN 197-1 e oferecido à Universidade do Minho pela empresa SECIL - Companhia Geral de Cal e Cimento, S.A., sendo este um produto de elevada qualidade e desempenho muito utilizado em obras de Engenharia Civil (Figura 12).

Este cimento possui um conjunto de características químicas, físicas e mecânicas fornecidas em catálogo pela empresa, apresentadas nas Tabelas 4 a 6.

Tabela 4 Características químicas.

Propriedades	Método de Ensaio	Valor Especificado (1)
Perda de fogo	NP EN 196-2	≤ 5,0%
Resíduo insolúvel	NP EN 196-2	≤ 5,0%
Teor de sulfatos (em SO ₃)	NP EN 196-2	≤ 4,0%
Teor de Cloretos	NP EN 196-21	≤ 0,10%

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

Tabela 5 Características mecânicas.

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

Tabela 6 Características físicas.

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

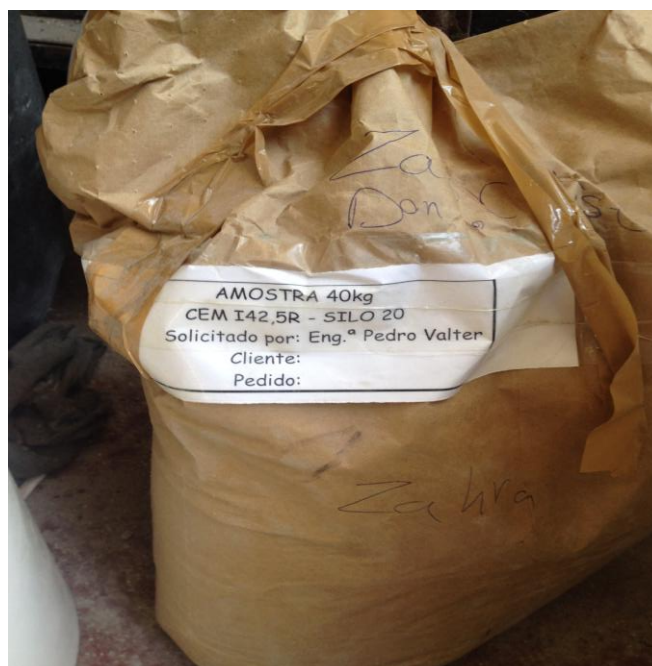


Figura 12 - Cimento utilizado.

3.2.2.2. Cinzas Volantes

De acordo com a norma NP EN 450-1 (2006), cinzas volantes são consideradas como "um pó fino constituído essencialmente por partículas vítreas de forma esférica resultante da queima de carvão pulverizado, com ou sem materiais de co-combustão, com propriedades pozolânicas e constituído essencialmente por SiO_2 e Al_2O_3 ."

As cinzas volantes ou cinzas de combustível pulverizadas, é a designação dada ao material obtido pela precipitação eletrostática ou captação mecânica em filtros de saco, ou dispositivos semelhantes, das poeiras contidas no fumo produzido pela queima de combustível nas centrais termoelétricas a carvão pulverizado. A designação de volantes resulta da leveza das partículas.

Para este projeto, as cinzas volantes utilizadas foram cedidas pelo centro de produção de Sines (Figura 13).

São compostas em grande parte por dióxido de silício (SiO_2 , entre 20% a 60%), óxido de alumínio (Al_2O_3 , 5% a 35%) e óxido de ferro (Fe_2O_3 , 10% a 40%), sendo assim uma excelente fonte de alumina e sílica para os geopolímeros.

O uso de cinzas volantes juntamente com o cimento tem os seus benefícios como o facto de ser mais fácil trabalhar e concluir obras em betão com cinzas volantes devido ao facto de ele poder ser misturado em proporções que tornam o acabamento do betão no verão mais fácil e não afetam o acabamento no inverno. O betão misturado com as cinzas volantes precisa de menos água o que significa que há menos retração e fissuras. As cinzas volantes criam um betão com uma resistência à compressão superior ao longo do tempo à do betão sem cinzas volantes. Como as cinzas volantes têm um menor custo do que o cimento, o uso de cinzas volantes na mistura reduz o custo do betão.



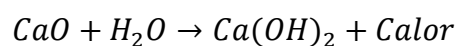
Figura 13 - Cinzas volantes.

3.2.2.3. Hidróxido de Cálcio

No decorrer deste projeto laboratorial foi usada uma cal hidratada proveniente da empresa CALCIDRATA, Indústrias de Cal, S.A. (Figura 14).

No seu estado puro o hidróxido de cálcio apresenta-se como um pó branco inodoro.

O hidróxido de cálcio, também conhecido como cal apagada ou cal hidratada é obtido através de uma reação entre o óxido de cálcio e a água. Este é um processo onde se verifica um elevado desprendimento de calor, pois trata-se de uma reação exotérmica.



A cal é largamente utilizada na engenharia civil, em áreas tão variadas como em acabamentos rugosos, rebocos interiores, revestimentos exteriores, estuques, assentamentos interiores, entre outros e tem como principais vantagens o desenvolvimento gradual de resistência mecânica, a excelente trabalhabilidade, a elevada permeabilidade ao vapor de água e a boa elasticidade.



Figura 14 - Hidróxido de cálcio

3.2.2.4. Metacaulino aditivado com hidróxido de sódio

O metacaulino é obtido num processo de desidroxilação quase total do caulino em que se verifica uma determinada perda de água da sua constituição, havendo alterações do processo da coordenação do alumínio com o oxigénio [32].

No âmbito desta dissertação a obtenção do metacaulino foi através de um processo de calcinação do caulino aditivado com hidróxido de sódio de acordo com a patente internacional WO 2007/109862 A1 [33].

Misturado caulino com hidróxido de sódio, que após de uma cozedura a 600°C durante 2 horas, é moído e se torna num material homogéneo.

A preparação do metacaulino aditivado foi feita no Laboratório de Materiais de Construção da Universidade do Minho.

O hidróxido de sódio (NaOH), vulgarmente conhecido como soda cáustica, é um material de cor branca, sólido, reativo e corrosivo que tem a capacidade de absorver as partículas de água contidas no ar. É um material que é necessário ser manuseado com precaução, é obrigatório o uso de luvas protetoras, pois pode causar queimaduras.

O hidróxido de sódio utilizado para este trabalho foi fornecido pela empresa PCC Rokita e possui as propriedades que constam no Tabela 7.

Tabela 7 - Propriedades do hidróxido de sódio.

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

O caulino que foi utilizado para este projeto laboratorial era proveniente da empresa MIBAL, Minas de Barqueiros, S.A., com as características que constam das Tabelas 8 a 10:

Tabela 8 - Análise química do caulino.

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

Tabela 9 - Distribuição granulométrica do caulino

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

Tabela 10 - Outras propriedades do caulino

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

(1) Seco a 110°C

O processo da obtenção do metacaulino aditivado com hidróxido de sódio surgiu da seguinte forma:

→ Usando o moinho de trituração do Laboratório de Materiais de Construção da Universidade do Minho, triturar o hidróxido de sódio tornando-o num pó fino (Figura 15);

→ Misturar 600 gramas de hidróxido de sódio em pó fino com 1000 gramas de caulino, com ajuda de um misturador, até homogeneizarem;

→ Colocar a mistura num recipiente metálico e colocar num forno a uma temperatura de 650°C durante duas horas (Figura 16);



Figura 15 - Moinho de trituração.

→ Depois de retirar do forno voltar a moer o metacaulino aditivado já produzido, tornando o material num pó fino novamente de forma a evitar materiais de dimensões maiores (Figura 17);



Figura 16 - Forno usado na obtenção do metacaulino aditivado.



Figura 17 - Metacaulino aditivado saído do forno.

→ Por fim vedar o metacaulino aditivado, de forma a não receber a humidade contida no ar e abrir apenas quando for necessário ser utilizado.

3.2.3. Ativadores

A principal função dos ativadores é a de acelerar a reação dos ligantes.

Os ativadores mais utilizados na obtenção de ligantes geopoliméricos são os hidróxidos de sódio ou de potássio, o carbonato de sódio, os silicatos de sódio ou de potássio, e sobretudo misturas estruturadas destes compostos.

Os ativadores que foram usados nesta dissertação são o hidróxido de sódio e o silicato de sódio.

3.2.3.1. Silicato de Sódio (Na_2SiO_3)

O silicato de sódio, também conhecido como vidro líquido ou água de vidro, pode ser encontrado como solução aquosa ou em estado sólido.

A reação entre o carbonato de sódio e o dióxido de silício produz silicato de sódio e dióxido de carbono.

No âmbito deste projeto experimental o silicato de sódio foi utilizado em solução aquosa. Trata-se de uma solução alcalina que reage com soluções ácidas, em que o ião silicato reage com o ião de hidrogénio.

O seu manuseamento exige algum cuidado e o uso de luvas protectoras, já que em contacto com a pele este material pode provocar irritação cutânea.

O silicato de sódio usado neste trabalho laboratorial foi proveniente da empresa Marcande, Produtos Químicos, Lda (Figura 18 e Tabela 11).



Figura 18 - Silicato de sódio

Tabela 11 - Propriedades do silicato de sódio

Propriedades do Silicato de Sódio	
Fórmula molecular	Na_2SiO_3
Massa molar	122,06 g/mol
Aparência	Sólido incolor
Densidade	$2,6 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$
Ponto de Fusão	1089 °C
Solubilidade em água	$200 \text{ g}\cdot\text{l}^{-1}$

3.2.3.2. Hidróxido de Sódio (NaOH)

Hidróxido de sódio, vulgarmente conhecido como soda cáustica, é um ativador extremamente corrosivo, bastante tóxico e muito solúvel em água. No manuseamento deste material, é aconselhado o uso de luvas protetoras.

Pode ser encontrado na sua forma sólida ou líquida, sendo que neste trabalho experimental, foi utilizado em estado sólido (Figura 19 e Tabela 12).

De cor branca, é um material cristalino com ponto de fusão igual a 318°C, com a propriedade de absorver água do ar, tornando-se um líquido incolor quando exposto ao ambiente por tempo suficiente.



Figura 19 - Hidróxido de sódio

O hidróxido de sódio não se encontra na natureza, sendo produzido industrialmente por meio de reações de eletrólise de soluções aquosas de cloreto de sódio.

Neste trabalho experimental, este material foi utilizado com uma molaridade de 12M, isto é, para cada uma quantidade de 2,5 litros de água foram dissolvidas 1200 gramas de hidróxido de sódio. A solução depois de preparada tem de repousar tapada durante 24h.

Tabela 12 - Propriedades do hidróxido de sódio.

Propriedades do Hidróxido de Sódio	
Fórmula molecular	NaOH
Massa molar	39,9971 g/mol
Aparência	Sólido branco
Densidade	2,13 g·cm ⁻³
Ponto de Fusão	322 °C
Ponto de Ebulição	1388 °C
Solubilidade em água	1090 g.l ⁻¹
Solubilidade em etanol	13,9 g/100mL
Solubilidade em metanol	23,8 g/100mL
Solubilidade em glicerol	Solúvel
Pressão de vapor	13 Pa (618 °C)
Índice de refração	1,412

3.2.4 Pó de Alumínio (Al)

O pó de alumínio foi usado como agente indutor de porosidade que vai conferir as características de porosidade e baixa densidade às misturas que irão ser realizadas (Figura 20).

O pó de alumínio foi produzido originalmente por meios mecânicos, utilizando um moinho de selo para criar flocos. Subsequentemente, um processo de pulverização de alumínio fundido para criar um pó de gotículas foi desenvolvido por EJ Municipal na década de 1920.

O pó de alumínio é produzido a partir da atomização do alumínio em estado líquido. Aspirado para uma câmara onde se introduz um jato de ar pressurizado, o alumínio líquido desintegra-se em pequenas partículas de formato semiesférico que depois é peneirado e classificado de acordo com a sua granulação. Existem vários tipos de pó de alumínio sendo eles o fino, fino-recoberto, médio e grosso.

Apresenta várias faixas granulométricas (padronizadas ou sob consulta específica) e purezas (percentual de alumínio e outros metais), o que possibilita versatilidade em sua utilização, como refratários, pigmentos para indústria automobilística, metalurgia, produtos químicos, aluminotermia, explosivos, combustíveis sólidos para mísseis e naves espaciais, entre outros.



Figura 20 - Pó de alumínio.

O pó pode também ser caracterizado quanto à morfologia - em pó nodular ou esférico – e ser recoberto ou classificado.

Caso o pó entre em contacto com os olhos, a lavagem com água deve começar imediatamente e continuar por pelo menos 15 minutos.

3.2.5. Água

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

Neste trabalho laboratorial, toda a água utilizada foi fornecida da rede pública de abastecimento de Guimarães. Neste projeto não foram analisadas as características da água, visto que a norma EN 1008 (2005) não exige tal análise na utilização de água potável.

3.2.6. Superplastificante

O uso de superplastificante tem como função principal a redução da razão água/ligante. A sua utilização permite o aumento da fluidez da pasta e a redução da viscosidade [23]. Em contrapartida, com o uso do superplastificante podemos garantir betões ou argamassas com melhor trabalhabilidade e maior durabilidade.

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

Na tabela 13 apresentam-se as principais características deste produto, certificadas segundo a NP EN 934-2. Na Figura 21 apresenta-se o rótulo da embalagem do GLENIUM SKY 617 da marca BASF, The Chemical Company.

Tabela 13 - Características técnicas do superplastificante

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



Figura 21 - Superplastificante.

3.3 Composições

No âmbito desta dissertação, foram elaboradas 60 composições geopoliméricas em que 4 das quais correspondem a misturas geopoliméricas monofásicas e as restantes 56 misturas geopoliméricas correntes. A diferença entre estes dois tipos de argamassas geopoliméricas está no fato de as correntes usarem silicato de sódio e hidróxido de sódio como ativadores, enquanto que nas monofásicas, apenas são ativadas com água. Estas composições foram obtidas com a colaboração da aluna de doutoramento Abdollahnejad, com projeto iniciado nesta área. Estas composições estão descritas nas tabelas 14 e 15.

Nas tabelas A1, A2, A3 e A4 apresentadas em anexo estão descritos os valores relativos às pesagens de todos os materiais utilizados no fabrico das 60 misturas geopoliméricas.

A quantidade de materiais sólidos utilizados nestas composições varia consoante a mistura em consideração. O cimento está presente em 51 composições, as cinzas volantes em 48 composições, o hidróxido de sódio em 13 composições, o metacaulino aditivado com hidróxido de sódio em 16 composições, areia em 4 composições e naturalmente o pó de alumínio, sendo o agente de porosidade, é utilizado em todas as 60 composições.

Nas misturas geopoliméricas correntes, que são 56 das 60 composições, são usados os ativadores silicato de sódio e hidróxido de sódio. Nas misturas geopoliméricas monofásicas, os ativadores são substituídos pela água que, juntamente com a areia e o superplastificante formam as composições monofásicas.

Optou-se por estudar três diferentes razões de ativador/ligante. Uma de 1, outra de 0,8 e por fim de 0,6. Em cada uma destas três razões de ativador/ligante, apenas foi utilizada uma razão entre silicato de sódio e hidróxido de sódio de 2,5. Todas estas misturas têm na sua composição 0,8, 1, 1,2 ou 1,5% de pó de alumínio, como está demonstrado na tabela 15.

Em anexo encontram-se todas as composições, bem como discriminadamente todas as quantidades de material usado assim como a sua percentagem na mistura.

Tabela 14 - Composições e razões das 4 misturas geopoliméricas monofásicas.

Mistura	Água/Ligante	Agente de Porosidade
A1	35%	0,80%
A2		1%
A3		1,20%
A4		1,50%

Tabela 15 - Composições e razões das 56 misturas geopoliméricas correntes.

Mistura	Ativador/Ligante	Silicato Sódio/Hidróxido Sódio	Agente de Porosidade		
B5	1	2,5	0,80%		
B6			1%		
B7			1,20%		
B8			1,50%		
C9			0,80%		
C10			1%		
C11			1,20%		
C12			1,50%		
D13			0,80%		
D14			1%		
D15			1,20%		
D16			1,50%		
E17			0,80%		
E18			1%		
E19			1,20%		
E20			1,50%		
F21			0,80%		
F22			1%		
F23			1,50%		
B24			0,8	2,5	0,80%
B25					1%
B26					1,20%
B27					1,50%
C28	0,80%				
C29	1%				
C30	1,20%				
C31	1,50%				
D32	0,80%				
D33	1%				
D34	1,20%				

Tabela 15 (continuação) - Composições e razões das 56 misturas geopoliméricas correntes.

D35		1,50%
E36		0,80%
E37		1%
E38		1,20%
E39		1,50%
F40		0,80%
F41		1%
F42		1,50%
B43	0,6	0,80%
B44		1%
B45		1,20%
B46		1,50%
C47		0,80%
C48		1%
C49		1,20%
D50		0,80%
D51		1%
D52		1,20%
D53		1,50%
E54		0,80%
E55		1%
E56		1,20%
E57		1,50%
F58		0,80%
F59		1%
F60		1,50%

3.4 Ensaios em argamassas

3.4.1 Amassadura

Após definição de todas as composições, foi iniciado o processo de produção das misturas geopoliméricas. Este processo é iniciado com a pesagem e a mistura de todos os componentes sólidos e consequente homogeneização (Figura 22).



Figura 22 - Balança.

Todas as misturas geopoliméricas foram realizadas com recurso a uma misturadora com uma capacidade máxima de 3 litros (Figura 23).



Figura 23 - Misturadora (Cap. máxima de 3L).

O procedimento usado para a produção de todas as 60 misturas geopoliméricas foi o seguinte :

- Preparação com 24 horas de antecedência de uma solução de hidróxido de sódio com 2,5 litros de água e 1200 gramas de hidróxido de sódio. Devido ao facto de ser uma reação exotérmica é recomendado usar um recipiente de preferência metálico, que seja adequado (Figura 24). Após a mistura e consequente homogeneização da solução, é recomendado tapar o recipiente para proteger da claridade e de outros componentes (no caso de argamassas geopoliméricas correntes). Não se verifica este passo nas argamassas geopoliméricas monofásicas devido ao seu ativador ser a água;



Figura 24 - Recipiente metálico usado para fazer a solução de hidróxido de sódio.

- Introdução de todos os materiais líquidos no balde da misturadora durante 5 minutos na velocidade 1;
- Após a conclusão dos 5 minutos necessários para os materiais líquidos, introduz-se os materiais sólidos e secos e volta-se a ligar a misturadora na velocidade 1 desta vez durante 2 minutos. No caso das argamassas geopoliméricas monofásicas junta-se a água ao mesmo tempo que os materiais sólidos, uma vez que a água é o único material líquido usado;

- Concluídos estes 7 minutos, a mistura está terminada e pronta para ser colocada nos moldes.

Após estes 7 minutos, em geral, as misturas apresentavam-se líquidas e após 60-90 segundos iniciava-se uma expansão do material bastante significativa, tornando-se tremendamente porosas quando sólidas. Devido ao facto de o material expandir durante cerca de 60 segundos, tornava a tarefa de colocação nos moldes difícil.

3.4.2 Moldagem e Conservação

No decorrer deste projeto experimental, foram usados 2 tipos de provetes, e consequentemente, 2 tipos de moldes. Os provetes de forma cúbica com área de face de 50 x 50 (mm) que foram utilizados para os ensaios de resistência à compressão, densidade aparente por imersão e absorção de água por imersão. O provete de forma cilíndrica com cerca de 10 mm de espessura e 11,5 cm de diâmetro, foi utilizado apenas para o ensaio de condutibilidade térmica.

Relativamente a moldes, foram usados moldes metálicos cúbicos 50 x 50 x 50 (mm), como os apresentados nas figuras 25, 26 e 27 para os provetes cúbicos e moldes cilíndricos de PVC cerca de 10 mm de espessura e 11,5 cm de diâmetro para os provetes cilíndricos como os apresentados na figura 28.



Figura 25 - Molde cúbico metálico para 3 provetes.



Figura 26 - Molde cúbico metálico para 3 provetes.

Para facilitar a preparação dos provetes, foram satisfeitos alguns procedimentos :

- Devido a usos anteriores dos moldes, estes foram limpos e desinfetados com álcool para posteriormente ser aplicada fita adesiva nas faces dos moldes que estarão em contacto com a mistura, processo que torna o desmolde mais fácil;
- Após cada desmolde, os moldes devem ser limpos com cautela para evitar o desprendimento ou rotura da fita adesiva;
- Após a limpeza dos moldes metálicos, era pincelado óleo de descofragem de modo a facilitar o desmolde dos provetes sólidos sem os deteriorar;
- Preenchimento dos moldes com a mistura geopolimérica;
- Devido à elevada expansão e conseqüente transborde do material após colocado dentro do molde, por vezes era necessário adicionar mais material para cobrir todo o espaço necessário no molde;
- Colocação dos moldes em locais seguros e adequados para o seu armazenamento;
- Após 24 horas da realização da moldagem, é efetuado o desmolde;
- Após o desmolde, os provetes eram devidamente identificados e acondicionados à temperatura ambiente para que passados 28 dias fosse possível proceder à realização dos ensaios.



Figura 27 - Molde cúbico metálico para 9 provetes

Relativamente aos provetes para o ensaio de condutibilidade térmica o procedimento para a realização destes caracterizou-se pelos seguintes passos:

- Numa fase inicial foi necessário arranjar um tubo de PVC com um diâmetro de 11,5cm;
- Posteriormente recorrendo a uma serra o tubo foi cortado de forma a criar rodela de PVC com 1cm de altura;
- De seguida revestiu-se o interior destas rodela com fita cola, com o objectivo de retirar os futuros provetes mais facilmente;
- Posteriormente, as rodela de PVC, com a fita cola no seu interior, foram coladas a tabua previamente revestidas com plástico aderente para facilitar a futura remoção dos provetes (Figura 28);
- Aplica-se óleo de descofragem nas rodela de PVC assim como nas tábuas para facilitar a futura remoção dos provetes;
- Assim que as misturas geopoliméricas são colocadas no interior das rodela de PVC é colocada uma segunda tábu também revestida com plástico e untada no topo destes, para que a face superior fique o mais lisa possível;



Figura 28 - Moldes utilizados para os provetes utilizados no ensaio de condutibilidade térmica.

- Passado 24h é efectuado o desmolde;
- Os provetes são devidamente identificados e armazenados à temperatura ambiente para que sejam testados passados os 28 dias de cura necessários.

3.4.3 Densidade aparente por imersão

Para a realização do ensaio de densidade aparente por imersão, foram utilizados 3 provetes cúbicos $50 \times 50 \times 50$ (mm^3) para que fosse possível obter um valor médio final correspondente à densidade aparente de cada mistura. Ainda no âmbito deste ensaio foi necessário calcular a razão entre a massa do provete seco e o seu volume.

Para a execução deste ensaio foi necessário recorrer à norma EN 1015-10:1999 [36], norma que se caracteriza da seguinte maneira :

- Secagem dos provetes numa estufa com a temperatura de $70^{\circ}C \pm 5^{\circ}C$ com pesagens espaçadas de 2 horas até que se verifique uma variação da massa não superior a 0,2% do total. Após ser verificada esta condição, a massa obtida é correspondente à massa dos provetes secos (m_{dry}).

- Em relação a este parâmetro e após alguns testes, verificou-se que a temperatura ideal para os provetes seria de 60°C. Em temperaturas mais elevadas, os provetes apresentavam-se bastante fissurados ou até mesmo desagregados;
- Após a retirada dos provetes da estufa, era necessária esperar cerca de 30 minutos para que os provetes atingissem a temperatura ambiente de modo a não provocar choque térmico quando colocados em imersão;
- Após atingirem a temperatura ambiente, os provetes foram submersos num recipiente com água à temperatura de 20°C±2°C com pesagens espaçadas 15 minutos até que se verifique uma variação da massa não superior a 0,1% do total desta;
- Antes de efetuar a pesagem dos provetes saturados (m_{sat}) na balança, utilizou-se um pano absorvente para remover o excesso de água das faces dos provetes;
- Posteriormente, com recurso a um balde e um fio preso por baixo da balança, efetua-se a pesagem hidrostática dos provetes (m_{Im}) de forma a obter a massa hidrostática dos provetes após a saturação destes;
- Para se obter o valor da densidade aparente irá ser necessário calcular a seguinte expressão:

$$\rho = \frac{m_{dry}}{V_s} \quad (1)$$

- Através da seguinte fórmula obtém-se o valor correspondente ao volume:

$$V_s = \frac{m_{Sat} - m_{Im}}{\rho_w} \quad (2)$$

Devido ao elevado nível de porosidade de alguns provetes, durante o ensaio de densidade aparente por imersão, foi necessário usar uma peça de aço no topo do provete que o permitisse chegar ao fundo do balde imerso e conseguir ser pesado. A peça apresentava um peso saturado de 253g, um peso seco de 253g e um peso imerso de 225g.

Devido à força de impulso da água, os valores imersos desses provetes são negativos. Retirando o peso do topo do provete ele flutuaria pelo que se conclui que a força do impulso da água é superior à força do peso do provete, logo o valor negativo.

3.4.4 Absorção de água por imersão

Para calcular o valor da água absorvida por imersão, é necessário usar uma fórmula que requer a diferença entre a massa do provete saturado (m_{sat}) e a massa do provete seco (m_{dry}) é dividida pela diferença entre a massa do provete saturado (m_{sat}) e a massa do provete imerso (m_{im}). Se o valor obtido for multiplicado por 100, obtemos a percentagem de absorção de água por imersão.

$$Absorção\ de\ água\ (\%) = \frac{m_{sat} - m_{Dry}}{m_{sat} - m_{Im}} \times 100 \quad (3)$$

Recorreu-se aos valores obtidos no ensaio do cálculo da densidade aparente. Recorreu-se à norma EN 1015-10:1999 [37] que se caracteriza pelas especificações anteriormente apresentadas.

3.4.5 Resistência à Compressão

Para o ensaio de resistência à compressão, foram utilizados os provetes cúbicos 50 x 50 x 50 (mm^3), à semelhança dos ensaios de densidade aparente por imersão e de absorção de água por imersão.

A argamassa fresca foi colocada nos moldes metálicos durante 24 horas até ser realizada a desmoldagem dos provetes e colocadas num local à temperatura ambiente durante 28 dias de cura para a realização do ensaio. Para cada mistura foram utilizados 3 provetes cúbicos.

A norma que foi utilizada para o ensaio de compressão foi a EN 1015- 11:1999. Esta norma segue o seguinte procedimento:

- Inicialmente deve garantir-se que a superfície a colocar o provete esteja devidamente limpa;
- Após a superfície se encontrar limpa, coloca-se o provete de forma devidamente alinhada com as ranhuras da superfície da máquina (Figura 29) de forma que a carga seja aplicada numa das suas faces;
- Aplica-se uma força de 350 N/s até atingir o valor de resistência máxima à compressão;
- Por fim determina-se a resistência à compressão através da seguinte equação:

$$f_c = \frac{F}{A} \quad (4)$$

Em que:

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

F – Carga máxima de rotura, expressa em N;

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



Figura 29 - Prensa de compressão ELE Autotest usada no ensaio.

3.4.6 Condutibilidade Térmica

De forma a determinar o valor da condutibilidade térmica, fisicamente apresentado como λ , de cada uma das misturas realizadas, foi utilizado um aparelho adequado a esse fim, o Alambeta, ao qual foi necessário recorrer ao Laboratório de Física Têxtil da Universidade do Minho (Figura 30).



Figura 30 - Alambeta

Os provetes utilizados eram de forma cilíndrica, com cerca de 1 cm de espessura e 11,5 cm de diâmetro (Figuras 31 e 32).

Com o auxílio da Técnica Responsável pelo Laboratório de Física Têxtil da Universidade do Minho, foram respeitados os procedimentos para a execução do ensaio de condutibilidade térmica.



Figura 31 - Provete cilíndrico pouco poroso (Mistura A3).



Figura 32 - Provete cilíndrico muito poroso (Mistura F41).

O procedimento de uso do aparelho Alambeta caracteriza-se pelos seguintes parâmetros que foram transcritos do manual de utilização do aparelho do Laboratório de Física Têxtil da Universidade do Minho:

- Premir botão “ON” e aguardar alguns minutos para estabilização do aparelho;
- Verificar que no visor esteja a informação PRL;
- Após alguns minutos aparece no visor a informação RDL;
- Neste momento, o equipamento está pronto a realizar o ensaio;
- Verificar com a placa de calibração (o valor deve estar entre os 33 e os 35);
- Colocar a amostra de forma a cobrir toda a área do sensor térmico;
- Premir o botão "ST" (o tempo de medição alterna conforme o material e a espessura);
- Quando a cabeça de medição subir, deve pressionar-se o botão RL, “n” vezes para obter todos os parâmetros necessários.

O aparelho Alambeta calcula as propriedades térmicas estacionárias como a resistência, a condutibilidade e as propriedades dinâmicas, assim como a absorvidade térmica e a difusividade térmica.

O Alambeta é composto por um bloco metálico com temperatura constante (32°C) que difere da temperatura da amostra (20°C). No início da medição, a cabeça de medição baixa e toca na superfície plana da amostra a medir. Nesse instante, a temperatura da superfície da amostra sofre uma variação elevada e o aparelho regista a evolução do fluxo de calor assim como a espessura da amostra (Figura 33).

Este aparelho Alambeta avalia os seguintes parâmetros:

- λ (10^{-3}) – Condutividade térmica (propriedade estacionária ou dinâmica – W/mK).
- A (10^{-6}) – difusão térmica (m^2/s). Descreve a velocidade de propagação da temperatura (calor) no material: impulso térmico.
- B – absorvidade térmica (propriedade transitória – $Ws^{1/2}/mK$).
- R (10^{-3})- resistência térmica (propriedade estacionária – $m^2 K/W$).
- h(mm) – espessura do material.



Figura 33 - Aparelho Alambeta durante um ensaio.

4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo serão analisadas todas as misturas quando sujeitas a determinados ensaios. Vai ser realizada uma comparação entre as misturas dando respectivo destaque à comparação entre as argamassas geopoliméricas correntes e as monofásicas.

Foram realizados vários ensaios para as argamassas, nomeadamente os ensaios de densidade aparente por imersão e absorção de água por imersão, ensaios de compressão e ensaios de condutibilidade térmica.

Os resultados serão apresentados na forma de figuras, gráficos e tabelas. Todos os valores apresentados são referentes à média dos três provetes de cada uma das 60 misturas.

4.1 Densidade aparente

Nas tabelas A5, A6, A7, A8 e A9 apresentadas em anexo estão referidos os valores relativos à densidade aparente das 60 misturas ensaiadas, assim como nos gráficos das figuras 35 a 38.

Para este ensaio foram utilizados provetes cúbicos 50x50x50 (mm^3) de todas as 60 misturas geopoliméricas.

Um dos grandes objectivos desta dissertação laboratorial passava por averiguar quais das misturas possuíam menor densidade aparente, idealmente abaixo dos 1000 kg/m^3 . Concluiu se que das 60 misturas estudadas, 36 delas apresentam uma densidade aparente inferior a 1000kg/m^3 , ou seja, mais de 50% das misturas. Em anexo na tabela A5 é possível visualizar os valores da densidade aparente de todas as misturas ensaiadas.

Através da fórmula (1) é possível calcular o valor da densidade aparente dos provetes. A resultado é obtido através do quociente entre a massa do provete seco e o seu volume saturado.

4.1.1 Densidade aparente nas argamassas geopoliméricas monofásicas

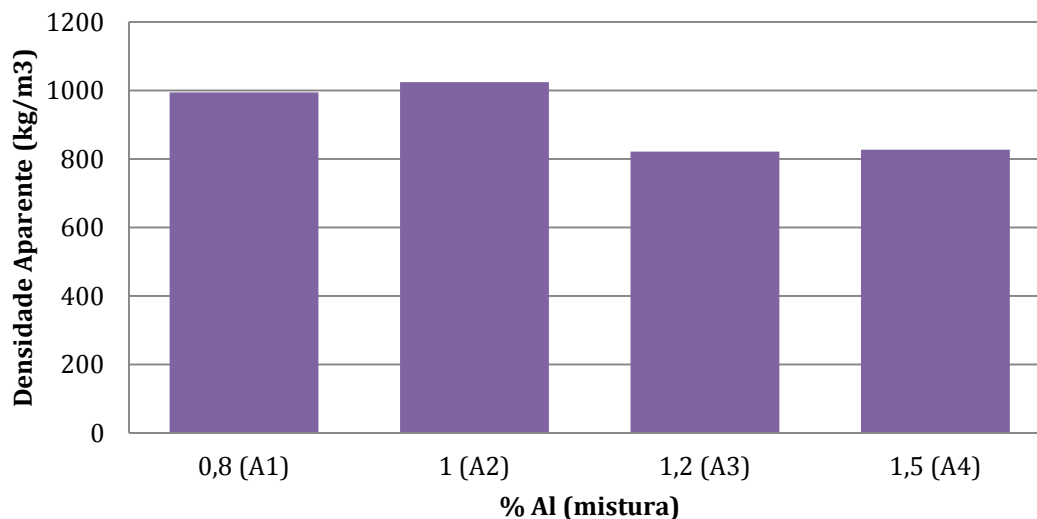


Figura 34 - Densidade aparente para os geopolímeros monofásicos com razão água/ligante de 35%.

4.1.2 Densidade aparente nas argamassas geopoliméricas correntes

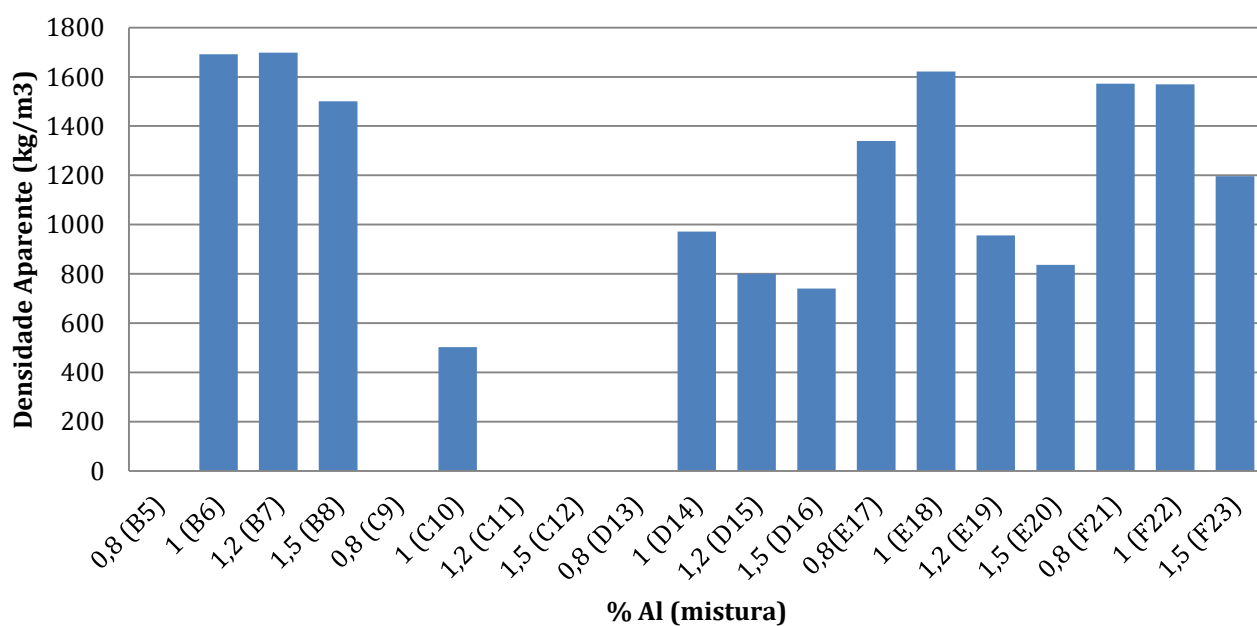


Figura 35 - Densidade aparente para os geopolímeros correntes com razão ativador/ligante de 1 e SS/SH =2,5.

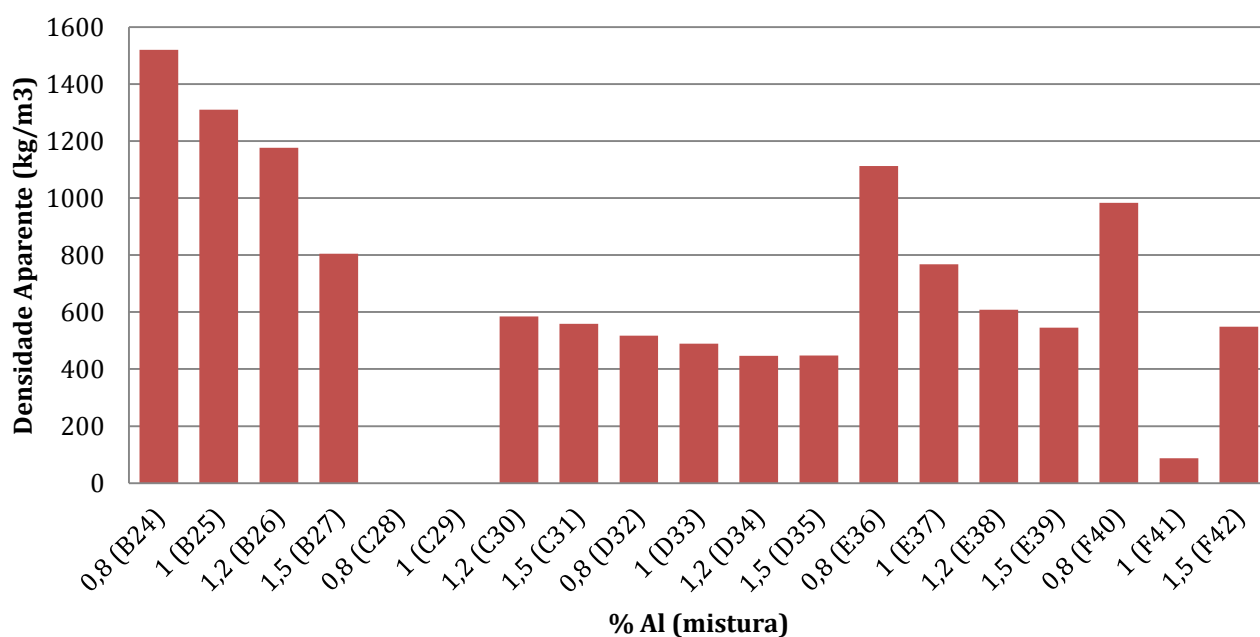


Figura 36 - Densidade aparente para os geopolímeros correntes com razão ativador/ligante de 0,8 e SS/SH=2,5.

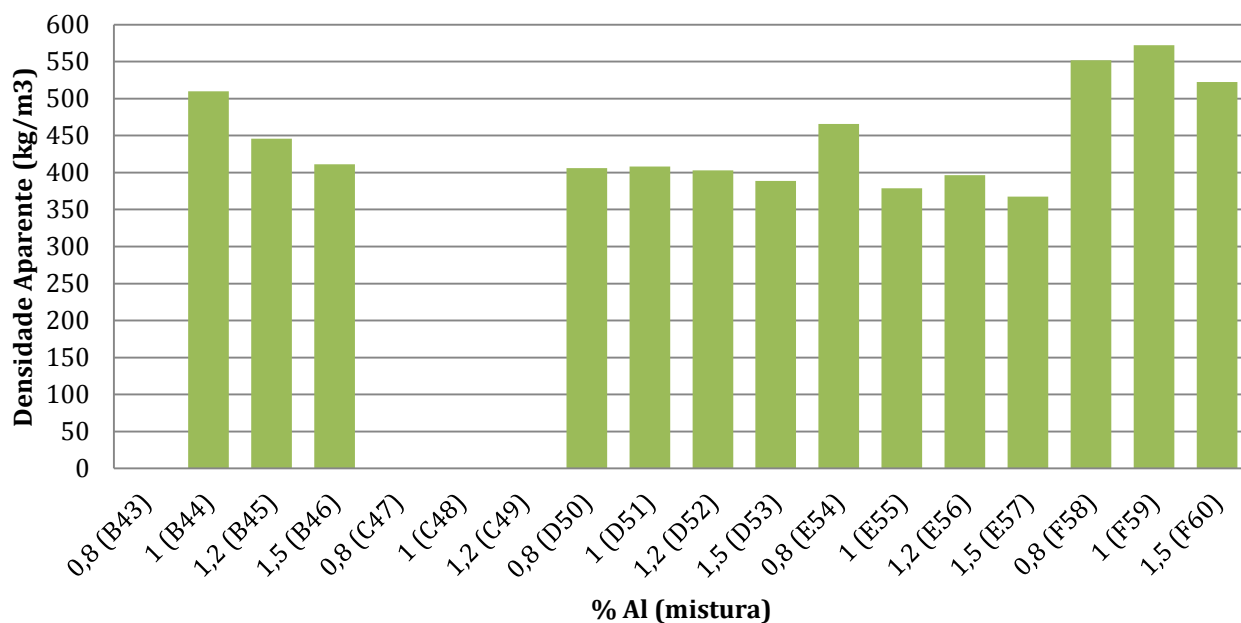


Figura 37 - Densidade aparente para os geopolímeros correntes com razão ativador/ligante de 0,6 e SS/SH=2,5.

4.1.3 Análise

Nas misturas geopoliméricas monofásicas (1, 2, 3 e 4) a densidade aparente está compreendida entre os 800 e os 1000 kg/m³.

Através da análise dos gráficos, é possível verificar que as misturas com razão ativador/ligante de 1 apresentam resultados de densidade aparente superiores às misturas com razão ativador/ligante de 0,8 e ainda estas, possuem densidade aparente superiores às misturas com razão ativador/ligante de 0,6.

Também foi possível verificar que, de maneira geral, quanto maior for a percentagem de agente indutor de porosidade, menor seria a densidade.

Cunha [2014], estudou misturas geopoliméricas usando agentes indutores de porosidade como o peróxido de hidrogénio (H₂O₂) e o perborato de sódio (NaBO₃) ao invés do usado nesta dissertação, o pó de alumínio (Al). Cunha [2014] concluiu que os melhores resultados estão associados a uma razão de ativador/ligante de 0,6, enquanto que os piores estão relacionados com a razão de 0,8. Verifica-se que com o agente indutor de porosidade usado nesta dissertação, confere valores menores de densidade aparente quando relacionados com os valores usando o peróxido de hidrogénio e o perborato de sódio como agentes indutores de porosidade. Os provetes que se apresentam nulos, não foram ensaiados devido a fissuras durante o aquecimento no forno.

4.2 Absorção de água por imersão

Tal como no ensaio de densidade aparente por imersão, foram ensaiadas 60 misturas geopoliméricas com os mesmos provetes cúbicos 50x50x50 (mm³).

Através das tabelas em anexo A10, A11, A12, A13 e A14 é possível analisar os resultados completos das misturas ensaiadas.

A percentagem de água absorvida é obtida através da fórmula (3) calculada em função da massa seca do provete (M_{dry}), da massa hidrostática do provete após a saturação deste em água à pressão atmosférica (M_{Im}) e a massa do provete saturado em água à pressão atmosférica (M_{Sat}).

4.2.1 Absorção de água por imersão nas argamassas geopoliméricas monofásicas

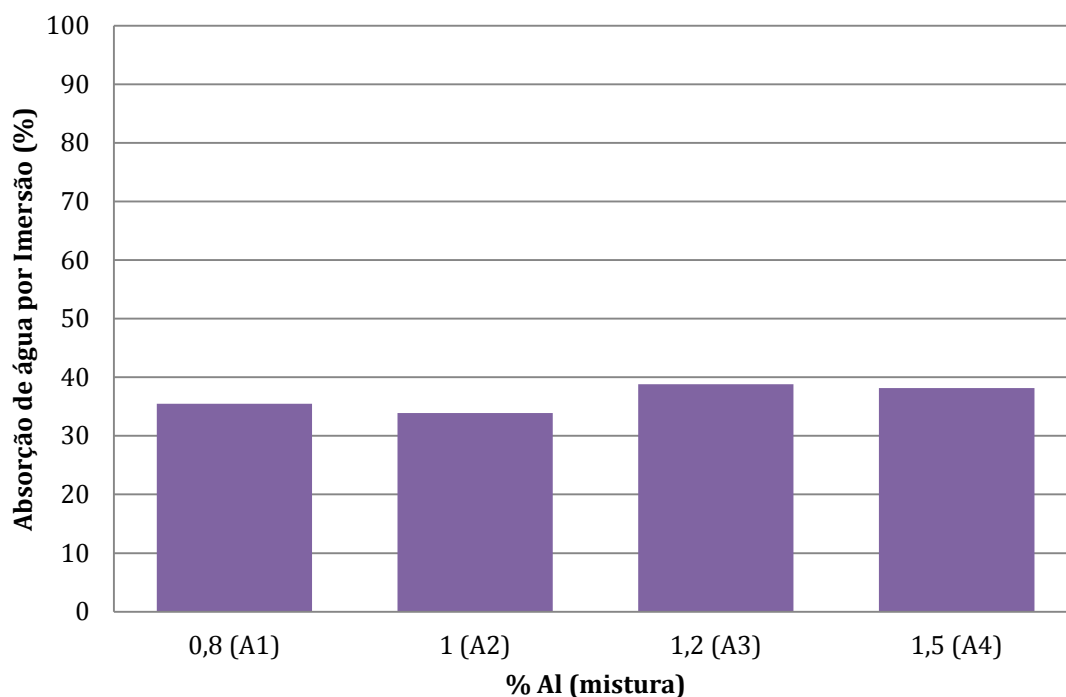


Figura 38 - Média dos valores da percentagem de água absorvida por imersão para os geopolímeros monofásicos uma razão de água/ligante de 35%.

4.2.2 Absorção de água por imersão nas argamassas geopoliméricas correntes

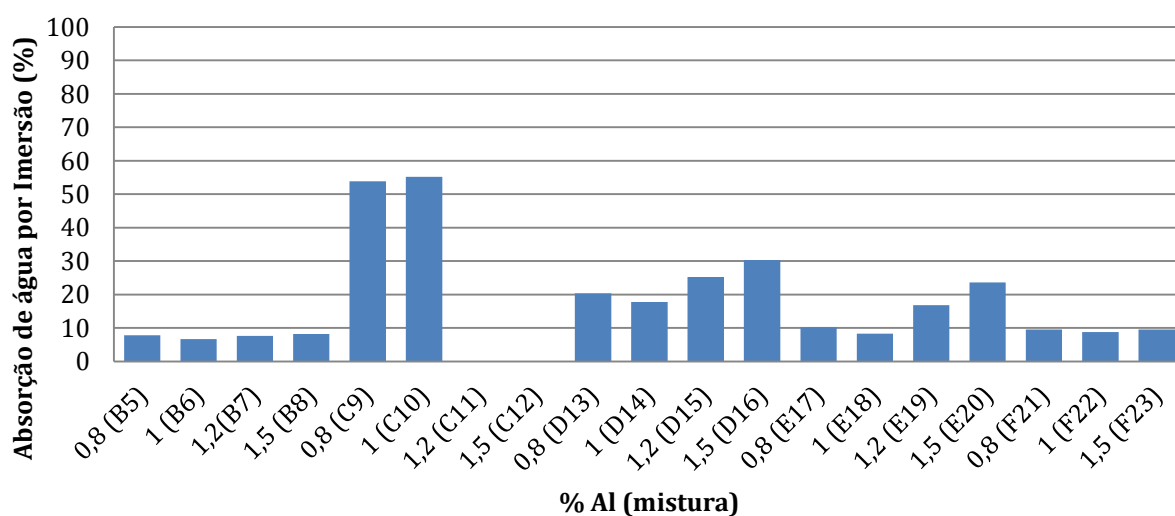


Figura 39 - Média dos valores da percentagem de água absorvida por imersão para os geopolímeros correntes com uma razão de ativador/ligante de 1 e SS/SH = 2.5

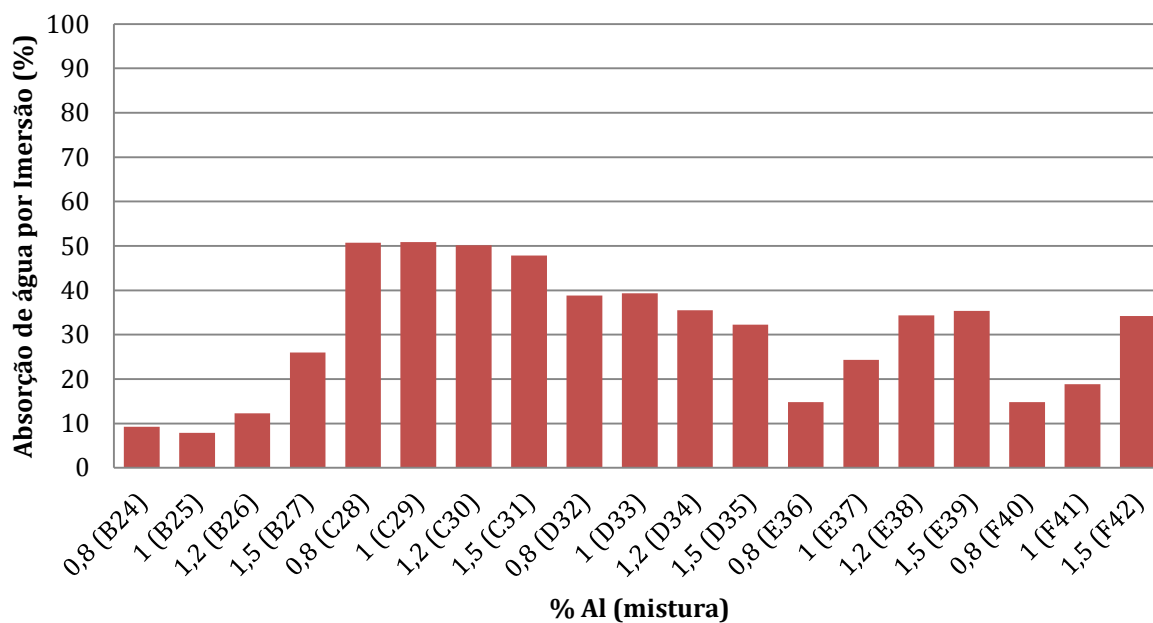


Figura 40 - Média dos valores da percentagem de água absorvida por imersão para os geopolímeros correntes uma razão de ativador/ligante de 0.8 e SS/SH = 2.5.

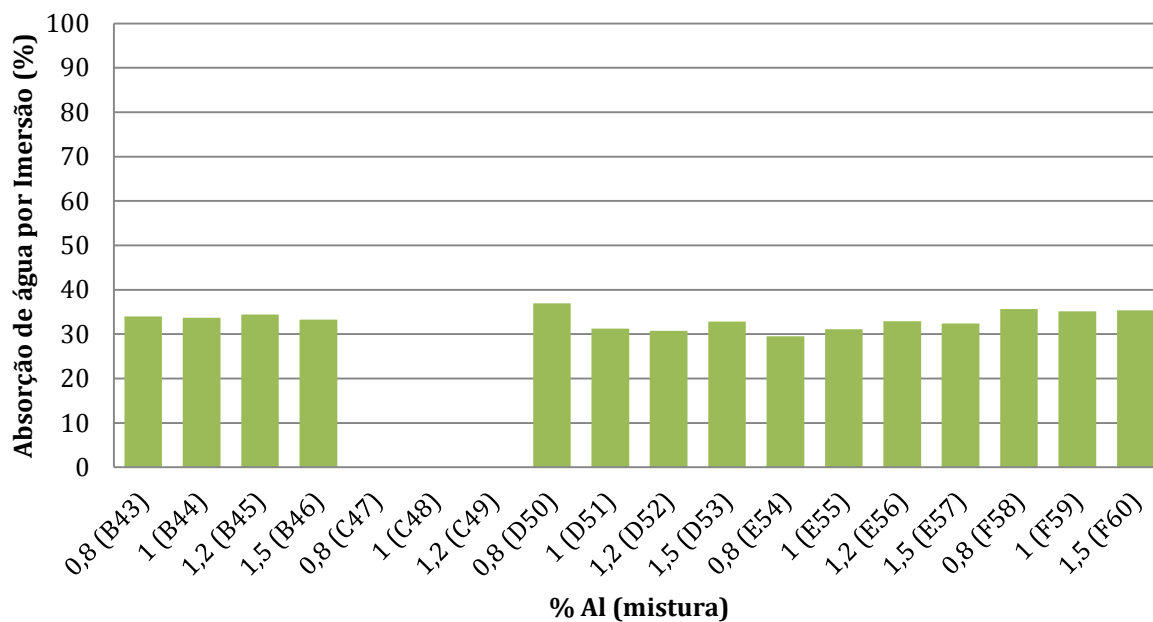


Figura 41 - Média dos valores da percentagem de água absorvida por imersão para os geopolimeros correntes uma razão de ativador/ligante de 0.6 e SS/SH = 2.5.

4.2.3 Análise

Através da análise dos gráficos das figuras 38 a 41, podemos concluir que para os geopolímeros monofásicos com razão de água/ligante de 35%, a percentagem de água absorvida está entre os 33 e os 38%.

Nos geopolímeros correntes com razão de ativador/ligante de 1, a percentagem de água absorvida está, de maneira geral, abaixo dos 10%, exceto nas misturas C9 (53,85%), C10 (55,17%), D13 (20,35%), D14 (17,81%), D15 (25,26%), D16 (30,3%), E19 (16,81%) e E20 (23,58%).

Nos geopolímeros correntes com razão de ativador/ligante de 0,8, as percentagens de água absorvida varia bastante, com as mais baixas a estarem associadas a uma percentagem do agente de porosidade de 0,8% enquanto que as maiores percentagens de pó de alumínio correspondem a maiores percentagens de absorção de água. Verifica-se também que a maior percentagem de água absorvida encontra-se na mistura C28 com 58,8% e a menor percentagem de água absorvida está na mistura B25 com 7,9%.

Nos geopolímeros correntes com razão de ativador/ligante de 0,6, a percentagem de água absorvida está mais constante do que nas misturas com razões de ativador/ligante analisadas acima. Todas as misturas desta razão estão com uma percentagem de água absorvida situada entre os 29 e os 37%. Verifica-se que a maior percentagem de água absorvida encontra-se na mistura D50 com 36,96% e a menor percentagem de água absorvida está na mistura E54 com 29,5%.

Na prática, em quase todos os casos, verifica-se que quanto maior for a percentagem do agente indutor de porosidade, neste caso o pó de alumínio, maior será a percentagem de água absorvida. Os resultados deste ensaio estão de acordo com os do ensaio de densidade aparente. Quanto maior a densidade aparente, menor a absorção de água porque as argamassas apresentam menor porosidade. Os provetes que se apresentam nulos, não foram ensaiados devido a fissuras durante o aquecimento no forno.

Cunha [2014] verificou que para a mesma razão de SS/SH de 2,5, usando outros agentes de porosidade como o peróxido de hidrogénio (H_2O_2) e o perborato de sódio ($NaBO_3$), a absorção de água por imersão aumenta no caso de aumento da percentagem do agente indutor de porosidade peróxido de hidrogénio (H_2O_2), mas esse aumento de percentagem não se verifica no caso do agente indutor de porosidade ser o perborato de sódio ($NaBO_3$), onde estas percentagens se mantêm de certa forma, constantes.

Cunha [2014] conclui, também, que a utilização de peróxido de hidrogénio como agente indutor de porosidade aumenta a percentagem de água absorvida em relação ao perborato de sódio. No entanto, as percentagens são inferiores quando comparadas com o pó de alumínio como agente indutor de porosidade.

4.3 Condutibilidade térmica

Para o ensaio de condutibilidade térmica, foram escolhidas 13 misturas usando alguns critérios . Foram escolhidas misturas com densidade aparente inferior a 1000 kg/m^3 .

Os provetes usados neste ensaio são de forma cilíndrica com cerca de 1 cm de espessura (Figura 43).



Figura 42 - Exemplo de provete usado no ensaio de condutibilidade térmica.

Na tabela A15 (em anexo) estão apresentados os resultados de todos os geopolímeros que foram sujeitos ao ensaio de condutibilidade térmica, no aparelho Alambeta.

Algumas misturas que obtiveram resultados de densidade aparente abaixo dos 1000 kg/m³ não foram selecionadas para a realização do ensaio de condutibilidade térmica, devido a terem obtidos resultados de resistência à compressão pouco satisfatórios.

O objetivo principal desta dissertação era encontrar misturas geopoliméricas com baixos valores de condutibilidade térmica sendo estes valores ideais, a rondar os 0,1 W/(m°C).

Nos gráficos das figuras 44, 45 e 46 estão representados os valores de condutibilidade térmica para as misturas selecionadas, separadas tendo em conta a sua razão ativador/ligante.

4.3.1 Condutibilidade térmica nas argamassas geopoliméricas monofásicas

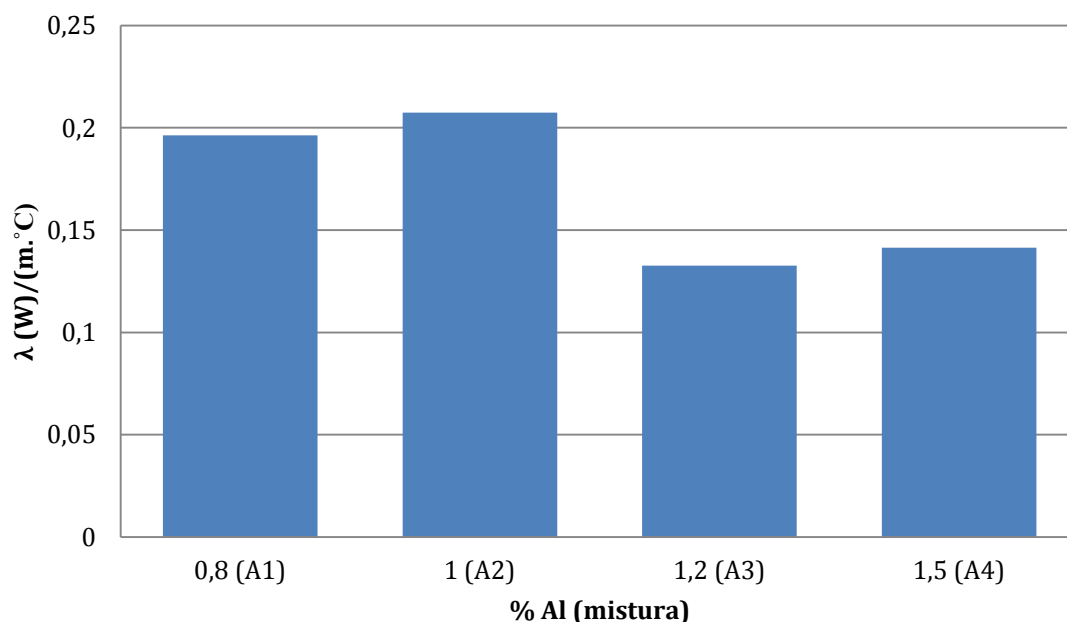


Figura 43 - Valor da condutibilidade térmica dos geopolímeros monofásicos com uma razão água/ligante de 35%.

4.3.2 Condutibilidade térmica nas argamassas geopoliméricas correntes

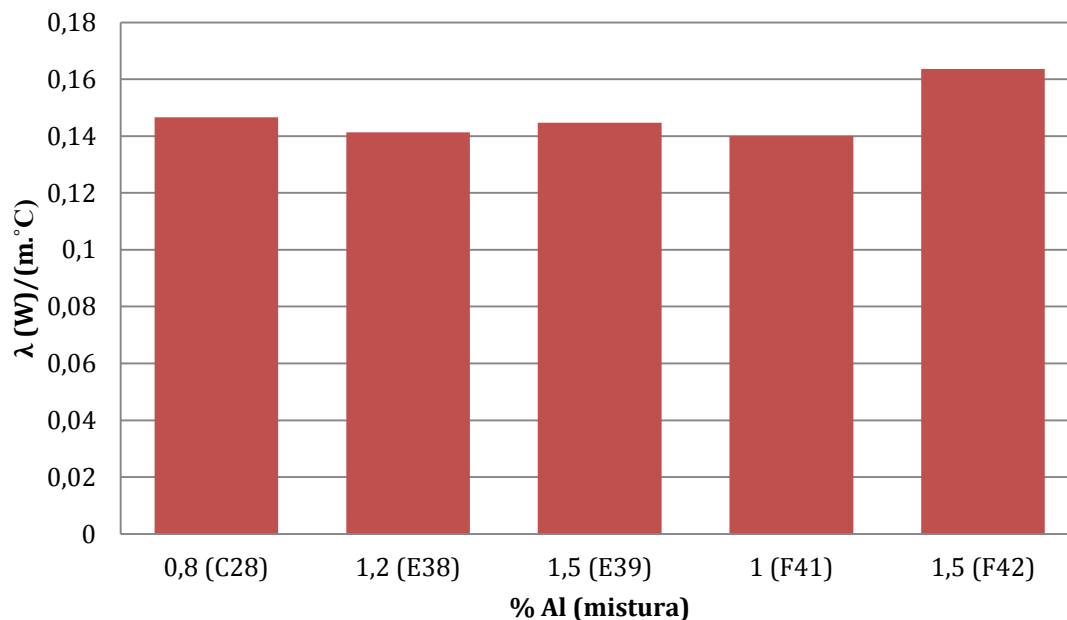


Figura 44 - Valor da condutibilidade térmica dos geopolímeros correntes com uma razão ativador/ligante de 0,8 e razão de SS/SH de 2.5.

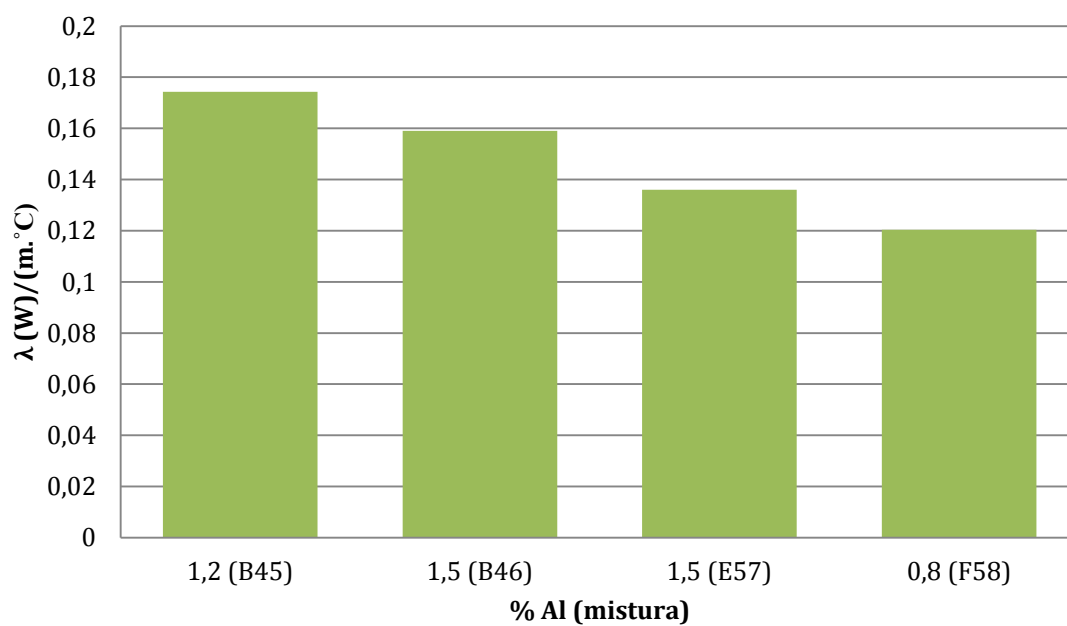


Figura 45 - Valor da condutibilidade térmica dos geopolímeros correntes com uma razão ativador/ligante de 0,6 e razão de SS/SH de 2.5.

4.3.3 Análise

Não foram selecionadas para o ensaio de condutibilidade térmica as misturas com razão de ativador/ligante de 1, pois não apresentavam as condições de densidade aparente e resistência à compressão necessárias.

Analisando os resultados obtidos, verificamos que, para as argamassas geopoliméricas monofásicas, os valores mais baixos obtém-se quando a percentagem do agente indutor de porosidade é mais elevado. O valor mais elevado obtém-se com uma percentagem de alumínio de 1%, atingindo o valor de 0,207 W(m°C) para a condutibilidade térmica. Este é, um valor muito elevado tendo em conta o esperado para ser uma alternativa viável aos isolantes térmicos já existentes. No entanto, a mistura A3 com 1,2% de alumínio, obteve o valor mais baixo das argamassas com uma razão de água/ligante de 35%, com o valor de 0,1327 W(m°C).

Para as misturas com razão de ativador/ligante de 0,8, os valores de condutibilidade térmica variam pouco, estando situados entre os 0,140 e os 0,163 W(m°C).

Nas misturas com razão de ativador/ligante de 0,6, obtivemos a mistura com o valor mais baixo de condutibilidade térmica de 0,120 W(m°C) estando ainda longe do ideal que seria os 0,100 W(m°C).

É possível verificar através da Tabela A17 em anexo que, quanto maior for o valor da densidade aparente das misturas, maior será o valor da condutibilidade térmica.

4.4 Resistência à compressão

O ensaio da resistência à compressão foi realizado com recurso à máquina ELE Autotest. Os valores introduzidos na ELE Autotest foram os apresentados na Tabela 16 :

Tabela 16 - Valores introduzidos na ELE Autotest

Velocidade	350 N/sec
b	50 mm
h	50 mm
l	50 mm

Na tabela A16 apresentada em anexo, é possível visualizar os resultados de todos os provetes de todas as 60 misturas geopoliméricas ensaiadas.

4.4.1 Resistência à compressão nas argamassas geopoliméricas monofásicas

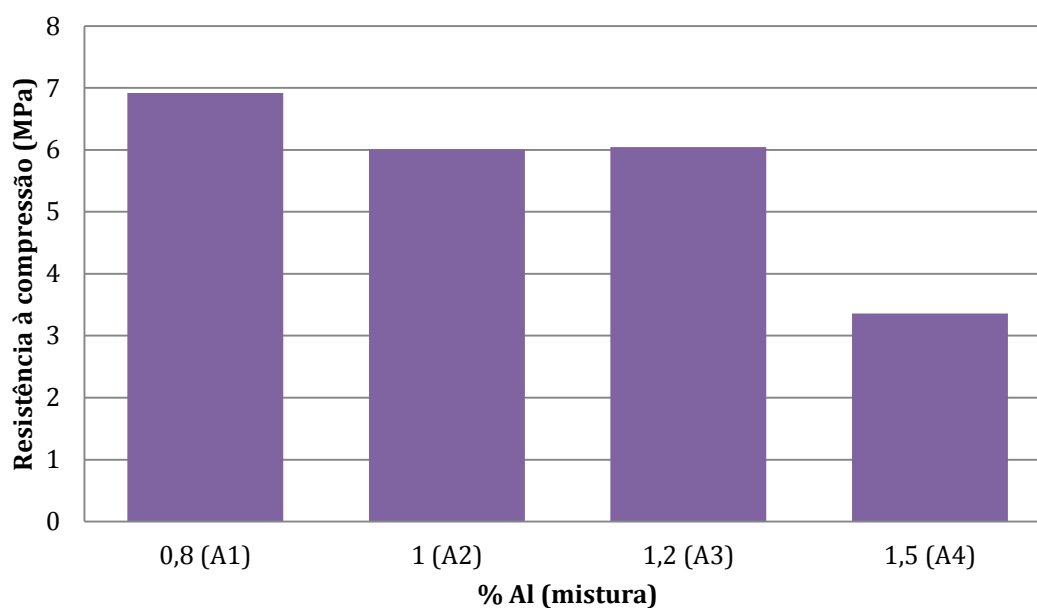


Figura 46 - Resistência à compressão dos geopolímeros monofásicos com uma razão água/ligante de 35%.

4.4.2 Resistência à compressão nas argamassas geopoliméricas correntes

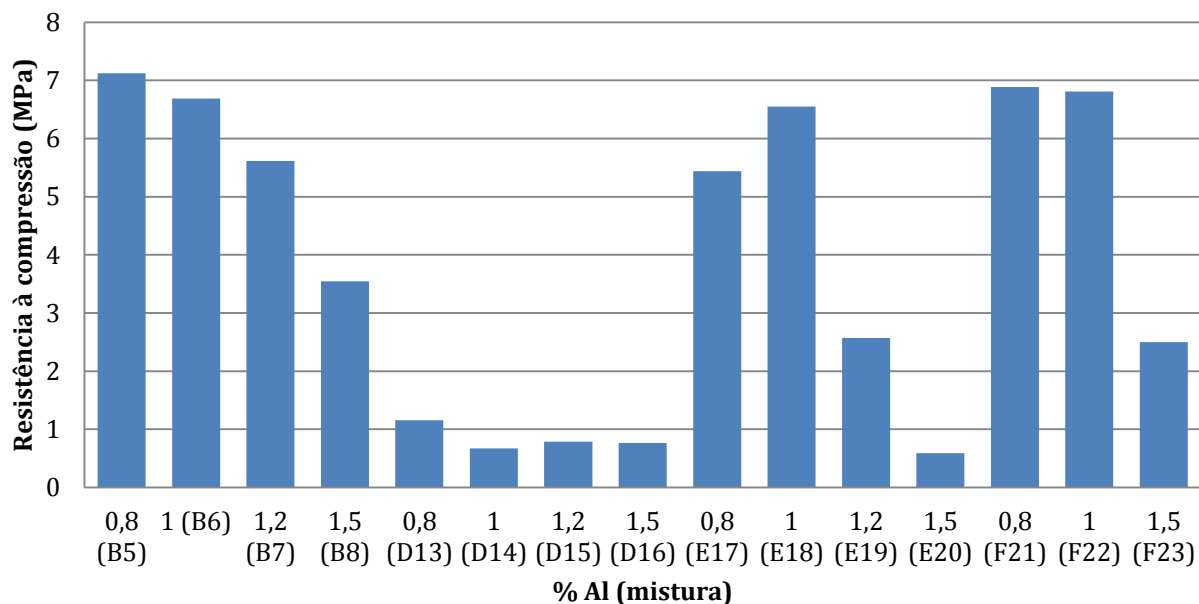


Figura 47 - Resistência à compressão dos geopolímeros correntes com uma razão de ativador/ligante de 1 e SS/SH=2.5.

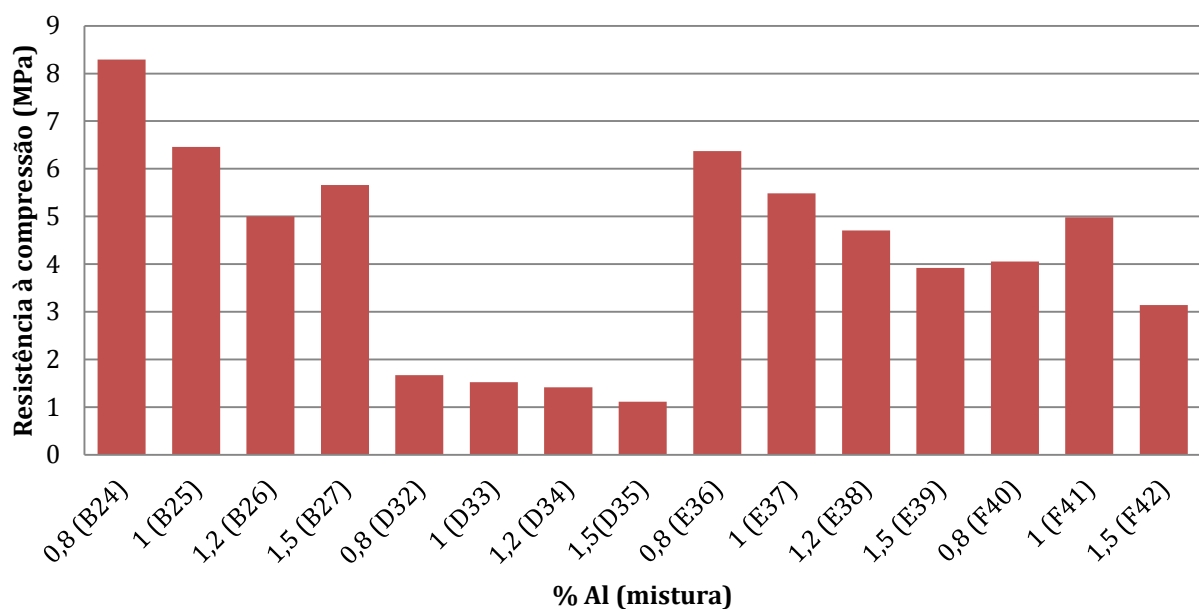


Figura 48 - Resistência à compressão dos geopolímeros correntes com uma razão de ativador/ligante de 0,8 e SS/SH=2.5.

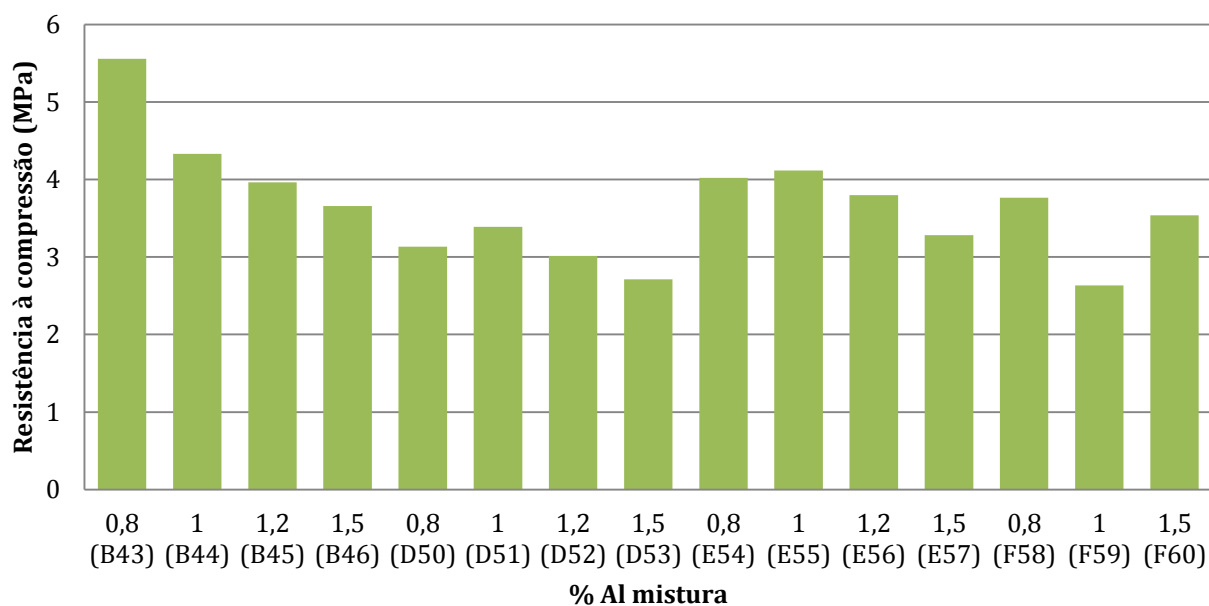


Figura 49 - Resistência à compressão dos geopolímeros correntes com uma razão ativador/ligante de 0,6 e SS/SH=2.5.

4.4.3 Análise

Nas misturas geopoliméricas monofásicas, é possível verificar que quanto menor for a percentagem do agente indutor de porosidade, maior será o valor da resistência à compressão. A mistura A1 apresenta a maior resistência com o valor de 6,92 MPa, sendo a mistura A4 a responsável por apresentar o menor valor de resistência à compressão, com o valor de 3,36 MPa.

Nas misturas com uma razão ativador/ligante de 1, é possível verificar no gráfico da figura 47 que a mistura que apresenta maior resistência à compressão é a mistura B5, com o valor de 7,21 MPa. Pelo contrário, a mistura que apresenta menor resistência à compressão é a mistura E20 com 0,581 MPa.

No gráfico da figura 48, é possível verificar que, para uma razão de ativador/ligante de 0,8, a resistência máxima à compressão obtém-se na mistura B24 com o valor de 8,3 MPa. A resistência mínima à compressão obtém-se na mistura D35 com o valor de 1,112 MPa.

As misturas com razão de ativador/ligante de 0,6 estão apresentadas na figura 49 , em que a mistura que apresenta maior resistência à compressão é a mistura B43, com o valor de 5,55 MPa. Pelo contrário, a mistura que apresenta menor resistência à compressão é a mistura F59 com 2,635 MPa.

É possível afirmar que, de maneira geral, após análise da tabela A16 presente em anexo e os gráficos das figuras 46 a 49 acima mencionados, as misturas que possuem uma relação de ativador/ligante de 0,6 apresentam uma resistência à compressão um pouco mais elevada e com menor variação do que as restantes misturas com razões de ativador/ligante distintas, o que se deve à menor utilização de ativadores.

É possível concluir também que quanto menor for a percentagem do agente indutor de porosidade, neste caso o alumínio, maior será a resistência à compressão, de maneira geral.

Outra conclusão que se pode tirar é que as misturas que possuem maiores valores de densidade aparente, apresentam de maneira geral, maiores resistências à compressão. (Tabela A17 em anexo)

A condutibilidade térmica também está relacionada uma vez que é possível verificar que as misturas que apresentam maiores valores de resistência à compressão, apresentam também valores superiores de condutibilidade térmica (Tabela A17 em anexo).

Comparando os resultados obtidos com os de Cunha T. [2014], analisando apenas a razão de silicato de sódio/hidróxido de sódio de 2,5 verifica-se uma similitude de resultados com valores de resistência à compressão, relativamente baixos, em que os seus valores máximos se situam entre os 6 e os 8 MPa. Este fato deve-se a possuírem também nas suas composições agentes indutores de porosidade, neste caso o peróxido de hidrogénio e o perborato de sódio.

Estes resultados, juntamente com os valores obtidos por Cunha T. [2014] são muito baixos quando comparado com os das composições de Costa, A. [2012] que usa a mesma relação de silicato de sódio/hidróxido de sódio de 2,5 usado nesta dissertação. A diferença está no uso de maior percentagem de areia na sua composição e principalmente o fato de não possuírem nenhum agente indutor de porosidade.

4.5 Considerações económicas

Na Tabela 17 estão apresentados os custos por quilograma de cada material que foi usado nesta dissertação. Todos os valores foram obtidos através de pedidos de orçamentos a fornecedores de materiais de construção. Não foram considerados custos de aplicação e todos os custos são apresentados sem IVA e sem o custo do transporte. O valor do metacaulino aditivado apresenta-se sem custos de produção.

Tabela 17 - Preço por quilograma de todos os materiais usados.

Materiais		Preço (€/kg)
Ligantes	Cal hidratada	0,3
	Metacaulino aditivado	0,29
	Cimento	0,11
	Cinzas volantes	0,03
Ativadores	Silicato de sódio	0,53
	Hidroxido de sódio	0,85
	Água	0,00104
Agente indutor de porosidade	Pó de Alumínio	32
Agregado	Areia fina	0,02
Adjuvante	Superplastificante	0,8

É possível verificar que o produto mais caro usado nesta dissertação é, sem dúvida, o agente de porosidade, pó de alumínio, com um preço de 32€/kg, seguido do hidróxido de sódio com 0,85 €/kg, do adjuvante com 0,8 €/kg e do ativador silicato de sódio com 0,53€/kg. Como forma de comparação, foi escolhida uma mistura de cada composição B, C, D, E e F e foram comparadas com a composição A, por ser a única composição geopolimérica monofásica. Foi usada uma percentagem de agente de porosidade de 1% para todas as misturas selecionadas como forma de homogeneização e foram analisadas as 3 razões de ativador/ligante (1, 0,8 e 0,6). Todos os geopolímeros correntes foram comparados com a mistura A2, que tem um valor de 0,41€ por cada quilograma de mistura, uma vez que é a única mistura geopolimérica monofásica com 1% de pó de alumínio. Como é já sabido, a razão de silicato de sódio/hidróxido de sódio foi sempre constante ao longo desta dissertação com o valor de 2,5. Nas figuras 50 a 52 é possível observar a variação dos custos quando se altera a razão de ativador/ligante.

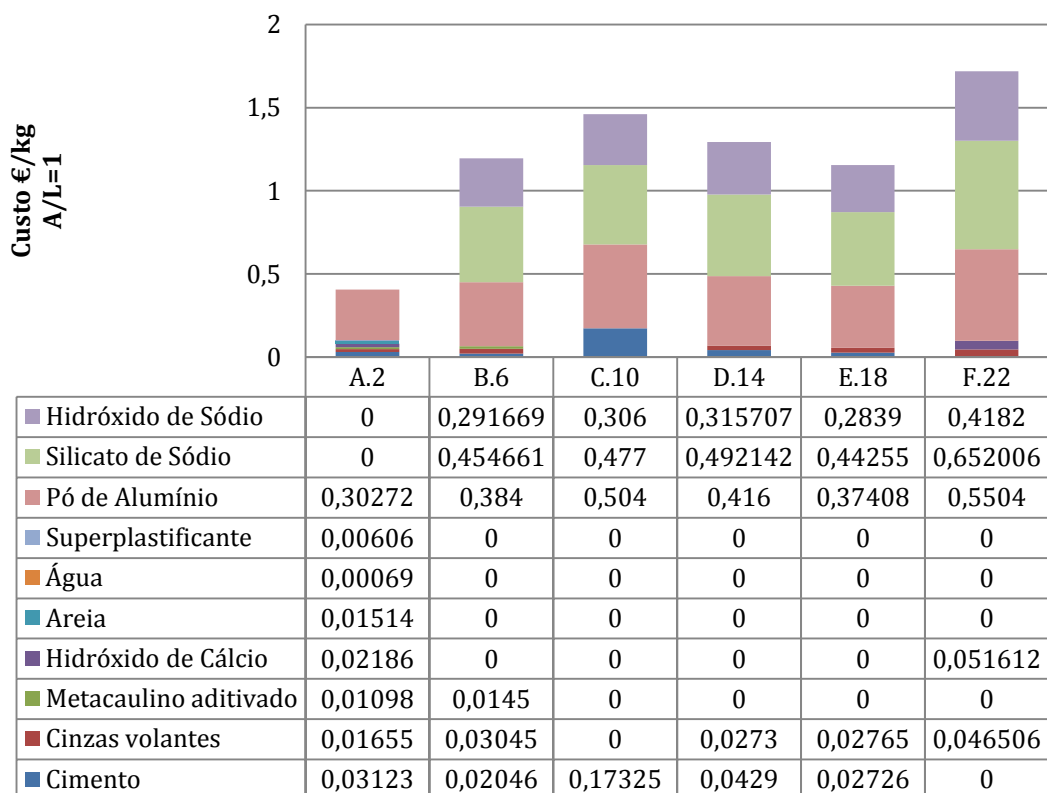


Figura 50 - Custo por quilograma de cada mistura geopolimérica com razão a/l=1.

Como é possível verificar, o geopolímero monofásico nesta razão de ativador/ligante igual a 1 é muito inferior em termos de custos relativamente aos geopolímeros correntes. Como foi possível observar na tabela 17 apresentada anteriormente, o fato de os geopolímeros correntes possuírem ativadores como o silicato de sódio e o hidróxido de sódio aumenta significativamente o preço.

Verificamos assim que a composição mais cara é a F com um preço de quase 1,72€ por cada quilograma de mistura, ao que contribuiu o fato de possuir na sua composição uma elevada quantidade de ativadores.

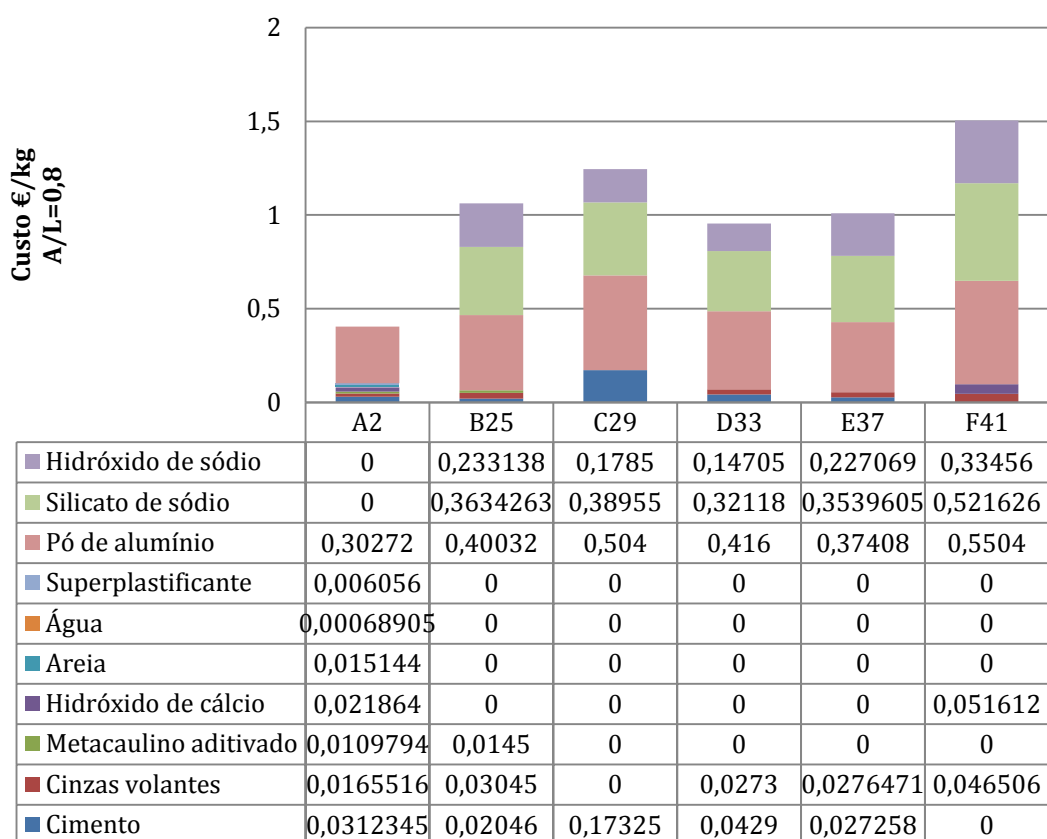


Figura 51 - Custo por quilograma de cada mistura geopolimérica com razão a/l=0,8.

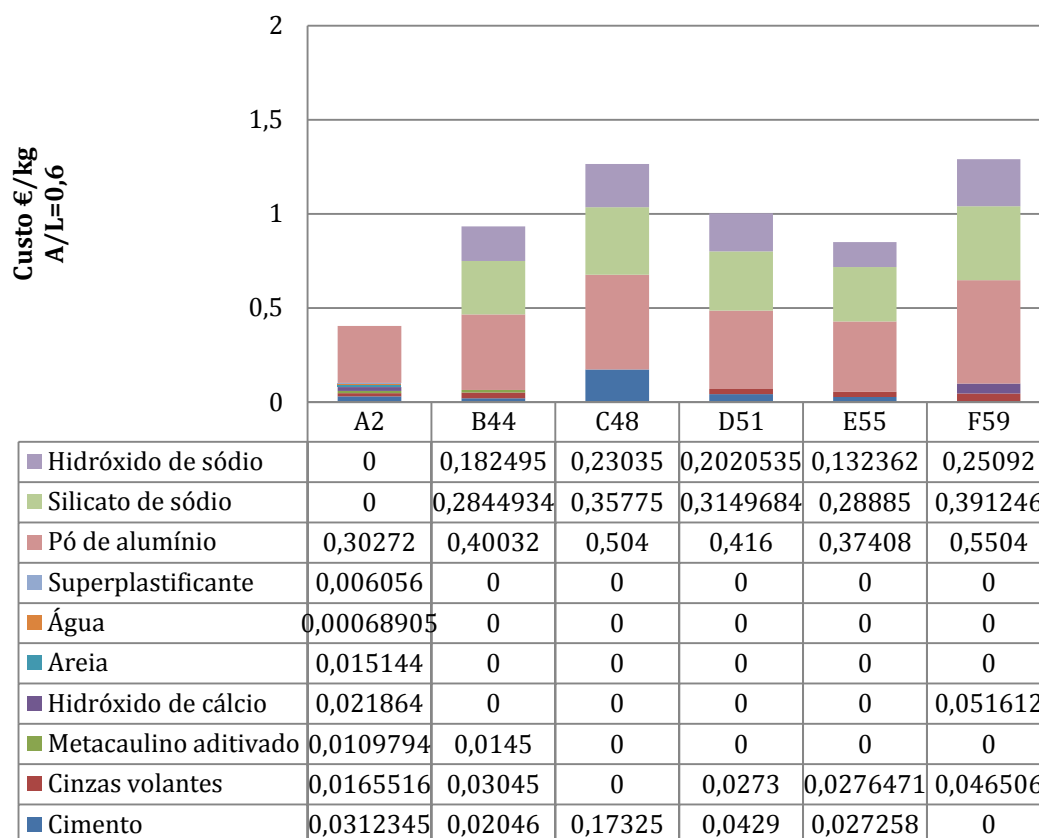


Figura 52 - Custo por quilograma de cada mistura geopolimérica com razão a/l=0,6.

Podemos concluir que mesmo baixando as razões de ativador/ligante, a mistura geopolimérica monofásica será sempre mais acessível financeiramente do que qualquer uma das composições geopoliméricas correntes. Como conclusões óbvias que se podem tirar através destas figuras, a mistura será mais económica quanto menor for a razão ativador/ligante.

Nas gráficos das figuras 53 e 54, é possível ver a distribuição do preço dos constituintes por percentagem. Na Figura 53 verificamos que apesar de o pó de alumínio ser o constituinte mais caro, a combinação de ativadores (silicato de sódio e hidróxido de sódio) forma o constituinte mais predominante no custo final da mistura, representando cerca de 62% do custo da mistura total. Na Figura 54, como o ativador usado foi a água, verifica-se que o constituinte mais caro é o agente de porosidade, representando a fatia de 75% do custo da mistura total.

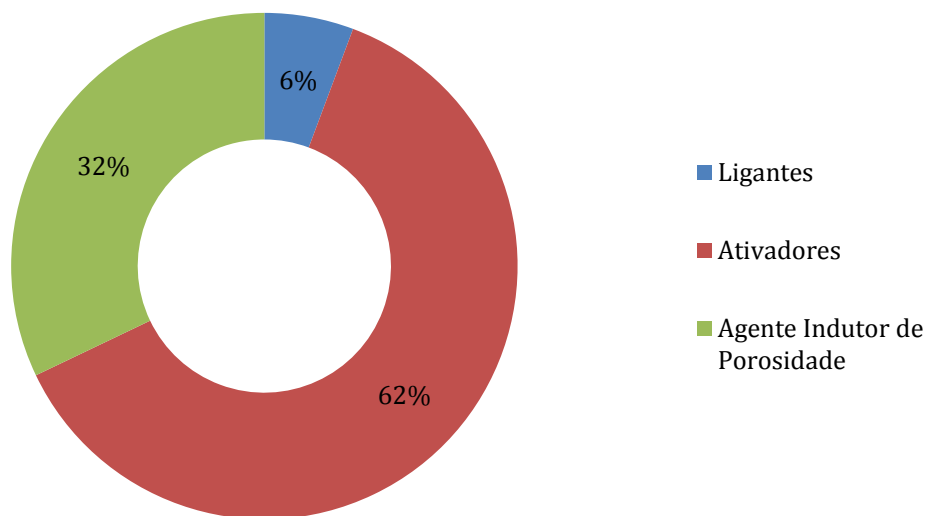


Figura 53 - Peso dos constituintes da mistura mais cara (F22).

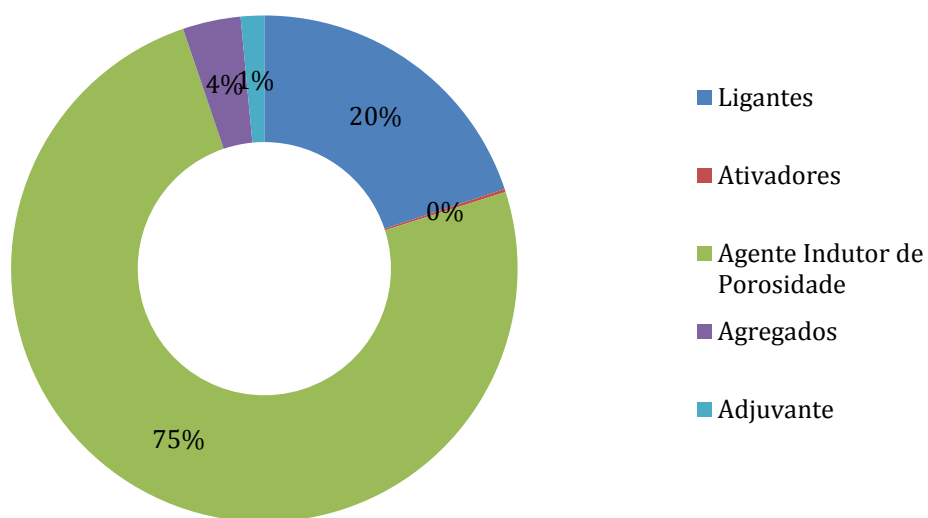


Figura 54 - Peso dos constituintes da mistura mais barata (A2).

5. CONCLUSÕES

O principal objetivo desta dissertação era, como o título indica, fazer uma análise comparativa do desempenho de argamassas geopoliméricas correntes e monofásicas com condutibilidade térmica melhorada. Dentro de 60 misturas geopoliméricas, 4 monofásicas e 56 correntes, avaliar se eram boas alternativas aos materiais de isolamentos térmicos utilizados atualmente. Outro dos grandes objetivos era consegui-lo usando um agente indutor de porosidade que emitisse a menor quantidade de emissões de dióxido de carbono possíveis, de modo a contribuir para uma diminuição do aquecimento global terrestre, temática muito preocupante nos dias de hoje.

Foi possível perceber como variam os resultados dos ensaios, alterando as misturas, a percentagem de ligantes, a razão ativador/ligante e a percentagem de alumínio, agente indutor de porosidade usado nesta dissertação. No entanto, os resultados obtidos neste trabalho experimental, apesar de promissores, ainda não são alternativas reais aos isolamentos térmicos existentes, nem em termos de resultados de condutibilidade térmica, nem em termos de toxicidade.

Através da análise dos resultados do ensaio da densidade aparente por imersão, foi possível verificar que nas argamassas geopoliméricas monofásicas quanto maior for a percentagem de alumínio, menor foram os valores de densidade. Todas as misturas obtêm resultados abaixo dos 1000 kg/m^3 , o que é muito positivo, exceto a mistura A2 com 1% de alumínio que obtêm o resultado de $1023,6 \text{ kg/m}^3$. Para a razão de ativador/ligante de 1 e para uma razão de silicato de sódio/hidróxido de sódio de 2,5, verifica-se que os resultados mais elevados obtêm-se para a Composição B.

Os provetes da Composição D obtêm os valores mais baixos de densidade aparente, sendo os provetes visualmente mais porosos. Os provetes da Composição C não resistiram à secagem dos provetes no forno a $60 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$, e fraturaram em grande parte antes da realização do ensaio.

Os resultados mais altos de densidade aparente obtiveram-se nas misturas com 1% de alumínio e os valores mais baixos nas misturas com 1,5 % do agente indutor de porosidade.

Para a razão ativador/ligante de 0,8, verificamos que mais uma vez os resultados mais altos aparecem na Composição B enquanto que os mais baixos, novamente na Composição D. Mais uma vez, os alguns provetes da Composição C não resistiram às temperaturas do forno. Verifica-se neste caso que as misturas com 0,8% de alumínio apresentam densidade aparente mais alta, enquanto que com 1,5% a sua densidade desce para valores baixos. Para a razão ativador/ligante de 0,6, os provetes da Composição F apresentam os resultados mais reduzidos, na ordem dos 550 kg/m^3 , enquanto que os mais baixos se verificam na Composição E. Mais uma vez, alguns provetes da Composição C não resistiram às temperaturas do forno. Verifica-se que, quanto menor a percentagem de alumínio, maiores eram os resultados de densidade aparente.

Globalmente, é possível verificar que as densidades aparentes mais elevadas verificaram-se na Composição B enquanto que os menores valores apareciam quando ensaiados os provetes da Composição D.

Relativamente ao ensaio de absorção de água por imersão nas misturas geopoliméricas monofásicas, verifica-se pouca variação na percentagem de água absorvida, estando os resultados entre 33 e 38%. Nas misturas com razão de ativador/ligante de 1, a percentagem de água absorvida está, de maneira geral, abaixo dos 10%, exceto nas misturas C9 (53,85%), C10 (55,17%), D13 (20,35%), D14 (17,81%), D15 (25,26%), D16 (30,3%), E19 (16,81%) e E20 (23,58%). Nas misturas com razão de ativador/ligante de 0,8, as percentagens de água absorvida variam bastante, com as mais baixas a estarem associadas a uma percentagem do agente de porosidade de 0,8% enquanto que as maiores percentagens de pó de alumínio correspondem a maiores percentagens de absorção de água.

Verifica-se também que a maior percentagem de água absorvida encontra-se na mistura C28 com 58,8% e a menor percentagem de água absorvida está na mistura B25 com 7,9%.

Nas misturas com razão de ativador/ligante de 0,6, a percentagem de água absorvida está mais constante do que nas misturas com razões de ativador/ligante analisadas acima.

Todas as misturas desta razão estão com uma percentagem de água absorvida situada entre os 29 e os 37%. Verifica-se que a maior percentagem de água absorvida encontra-se na mistura D50 com 36,96% e a menor percentagem de água absorvida está na mistura E54 com 29,5%. Na prática, em quase todos os casos, verifica-se que quanto maior for a percentagem do agente indutor de porosidade, neste caso o pó de alumínio, maior será a percentagem de água absorvida.

Conclusão comum a todas as misturas foi que quanto maior fosse a percentagem do agente indutor de porosidade maior seria a percentagem de água absorvida por imersão dos provetes. As maiores percentagens de água absorvida ocorrem nas misturas com razão de ativador/ligante de 0,6. Estes resultados estão de acordo com os resultados da densidade aparente. Quanto menor a densidade aparente menor a absorção de água.

Para esta dissertação um dos grandes objetivos passava por averiguar de que forma as diferentes razões dos materiais utilizados influenciava a condutibilidade térmica das misturas geopoliméricas estudadas. Não foram seleccionadas para o ensaio de condutibilidade térmica as misturas com razão de ativador/ligante de 1, pois não apresentavam as condições de densidade aparente e resistência à compressão necessárias. Analisando os resultados obtidos, verificamos que, para as argamassas geopoliméricas monofásicas, os valores mais baixos obtêm-se quando a percentagem do agente indutor de porosidade é mais elevada. O valor mais elevado obtêm-se com uma percentagem de alumínio de 1%, atingindo o valor de 0,207 W/(m°C) para a condutibilidade térmica. Este é, um valor muito elevado tendo em conta o esperado para ser uma alternativa viável aos isolantes térmicos já existentes. No entanto, a mistura A3 com 1,2% de alumínio, obteve o valor mais baixo das argamassas com uma razão de água/ligante de 35%, com o valor de 0,1327 W/(m°C). Para as misturas com razão de ativador/ligante de 0,8, os valores de condutibilidade térmica variam pouco, estando situados entre os 0,140 e os 0,163 W/(m°C).

Nas misturas com razão de ativador/ligante de 0,6, obtivemos a mistura com o valor mais baixo de condutibilidade térmica de 0,120 W/(m°C) estando ainda acima do ideal que seria os 0,100 W/(m°C).

Globalmente os resultados foram promissores apesar de ser necessário ainda mais investigações neste campo para conseguir aproximar os valores obtidos nas argamassas geopoliméricas com os valores de condutibilidade térmica dos materiais isolantes térmicos usados atualmente. Era considerado um bom resultado, se os valores rondassem os $0,100 \text{ W}/(\text{m}^\circ\text{C})$. Os melhores resultados verificaram-se para as misturas com razão de ativador/ligante de 0,6 sendo possível concluir também que quanto maior for a percentagem de alumínio, menor o valor da sua condutibilidade térmica.

Nas misturas geopoliméricas monofásicas, é possível verificar que quanto menor for a percentagem do agente indutor de porosidade, maior será o valor da resistência à compressão. A mistura A1 apresenta a maior resistência com o valor de 6,92 MPa, sendo a mistura A4 a responsável por apresentar o menor valor de resistência à compressão, com o valor de 3,36 MPa. Nas misturas com uma razão ativador/ligante de 1, é possível verificar que a mistura que apresenta maior resistência à compressão é a mistura B5, com o valor de 7,21 MPa. Pelo contrário, a mistura que apresenta menor resistência à compressão é a mistura 20 com 0,581 MPa. Foi possível verificar que, para uma razão de ativador/ligante de 0,8, a resistência máxima à compressão obtém-se na mistura B24 com o valor de 8,3 MPa. A resistência mínima à compressão obtém-se na mistura D35 com o valor de 1,112 MPa. Para as misturas com razão de ativador/ligante de 0,6 a que apresenta maior resistência à compressão é a mistura B43, com o valor de 5,55 MPa. Pelo contrário, a mistura que apresenta menor resistência à compressão é a mistura F59 com 2,635 MPa.

É possível afirmar que, as misturas que possuem uma relação de ativador/ligante de 0,6 apresentam uma resistência à compressão um pouco mais elevada e com menor variação do que as restantes misturas com razões de ativador/ligante distintas, o que se deve à menor utilização de ativadores.

É possível concluir também que quanto menor for a percentagem do agente indutor de porosidade, neste caso o alumínio, maior será a resistência à compressão, de maneira geral.

Em termos de considerações económicas, foi possível verificar que a produção de uma argamassa geopolimérica monofásica fica sempre mais acessível economicamente do que uma argamassa geopolimérica corrente, qualquer que seja a sua razão ativador/ligante. Um geopolímero ativado com água custa menos de metade do que um geopolímero ativado com uma solução de silicato e hidróxido de sódio. Devido ao fato de ambos os tipos de geopolímeros possuírem alumínio na sua composição, verifica-se que os maiores responsáveis pela diferença de preço entre os dois são os ativadores. Foi possível verificar que o material mais caro é o agente ativador de porosidade, neste caso o alumínio, com um preço de 32 €/kg. O material mais barato é naturalmente a água.

5.1 Trabalhos futuros

Os resultados obtidos estão dentro do esperado, mas ainda aquém de se tornar uma real alternativa aos materiais que constituem os isolamentos térmicos atualmente utilizados.

Uma vez que ainda existe pouca investigação neste campo, é possível acreditar que futuramente com composições distintas se poderão obter resultados mais promissores.

As investigações neste campo devem continuar, nomeadamente com diferentes percentagens e agentes indutores de porosidade e com razões de silicato de sódio/hidróxido de sódio diferentes da usada nesta dissertação com o valor de 2,5. As percentagens de ligantes também poderão ser ajustadas de maneira a reduzir a condutibilidade térmica. Esta temática continua a ser de extrema importância uma vez que, como já foi referido, é necessário diminuir as emissões de dióxido de carbono, muito elevadas na produção do cimento Portland, o que poderá ser substituído, em parte, pelos geopolímeros, materiais que causam menos impacto ambiental.

Mais ensaios poderão ser efetuados, para garantir resultados mais completos, tais como: ensaio de resistência a altas temperaturas, ensaio de gelo-degelo, ensaio ao ataque químico, ensaio de carbonatação, ensaio de ataque de cloretos, resistência ao fogo e resistência à abrasão.

6. REFERÊNCIAS

- [1] Bleischwitz, R.; Bahn-Walkowiak, B. (2006) Sustainable development in the European aggregate industry – A case for sectoral strategies. Wupertal Institute for Climate, Environment and Energy, Germany.
- [2] Pacheco-Torgal, F., Jalali, S. (2009) Ligantes geopoliméricos: uma alternativa ao cimento Portland. Ingenium: revista da ordem dos engenheiros, Portugal, Ordem dos engenheiros, pp. 66-68.
- [3] Coutinho, A.S. (1973) Fabrico e Propriedades do Betão. LNEC volume II.
- [4] Taylor, M.; Gielen, D. (2006) Energy efficiency and CO2 emissions from the global cement industry. International Energy Agency.
- [5] Santos, C.; Matias, L. (2006) Coeficientes de transmissão térmica de elementos da envolvente dos edifícios. Versão actualizada, ICT Informação técnica, Edifícios-ITE 50, LNEC, Lisboa.
- [6] Torgal, F. M. Alves S. P.; Jalali, S., (2010) A sustentabilidade dos materiais de construção. ISBN 978-972-8600-22-8, edição TEcMinho, Guimarães, Portugal.
- [7] Gann,E; Babrauskas,V; Peacock,R; Hall,J., Hall,J., (2004) Fire conditions for smoke toxicity measurements. Fire Materials Vol 18, pp 193-199.
- [8] Pacheco-Torgal, F., Jalali, S. (2009). Ligantes geopoliméricos: uma alternativa ambiental ao cimento Portland. INGENIUM: revista da ordem dos engenheiros. ISSN 0870-5968. 116.
- [9] Silva, C. (2010). Avaliação da Resistência ao Fogo de Produtos de Construção. Dissertação de Mestrado. Universidade de Aveiro, Portugal.
- [10] Liang,H.; Ho,M (2007). Toxicity characteristics of commercially manufactured insulation materials for building applications in Taiwan. Construction and Building Materials, Vol 21, pp. 1254-1261.

- [11] Pacheco-Torgal, F. (2007) - Desenvolvimento de ligantes obtidos por activação alcalina de lamas residuais das Minas da Panasqueira. Tese de Doutoramento, Universidade da Beira Interior, 423pp.
- [12] Pacheco-Torgal, F., Jalali, S. (2009). Ligantes geopoliméricos: uma alternativa ao cimento Portland? Revista INGENIUM, nº 116, pp. 94-96.
- [13] Pacheco-Torgal, F., Abdollahnejad, Z., Camões, A.F., Jamshidi, M., Ding, Y. (2011). Durability of alkali-activated binders: a clear advantage over Portland cement or an unproven issue. *Construction and Building Materials*, Vol. 30, pp.400-405.
- [14] Pacheco-Torgal, F. (2012). Betões Geopoliméricos: Um material com elevadas potencialidades para o reaproveitamento de agregados reciclados. *Revista Maquinaria Angola*, Nº 223, p.56-62.
- [15] Osório, P. (2006). Concepção de um Saferoom Anti-Tornado em Betão Geopolimérico. Dissertação de Mestrado. Universidade Do Minho. Guimarães, Portugal.
- [16] Abdollahnejad, Z., Hlavacek, P., Pacheco-Torgal, F., & Barroso de Aguiar, J. L. (2012). Preliminary experimental investigation on one-part geopolymer mixes, Congresso da Construção, Coimbra, 1–11.
- [17] Pinto, A.T. (2002), Novos Sistemas Ligantes Obtidos por Ativação Alcalina (Geopolímerização), *Construção Magazine* nº 3, ISSN 1645-1767, pp 16-22.
- [18] Pinto, A.T. (2004). Sistemas Ligantes Obtidos por Ativação Alcalina do Metacaulino. Tese de Doutoramento. Universidade do Minho, Guimarães.
- [19] Pacheco-Torgal, F., Jalali, S. (2010) A Sustentabilidade dos Materiais de Construção. ISBN 978-972-8600-22-8, Edição TecMinho, Guimarães, Portugal.
- [20] Davidovits, J. (1988) Geopolymer chemistry and properties. *Proceedings of 88 Geopolymer Conference*, pp.25-48.
- [21] Palomo, A.; Blanco-Varela, M. T.; Granizo, M. L.; Puertas, F.; Vasquez, T.; Grutzeck, M. W. (1999) Chemical stability of cementitious materials based on metakaolin. *Cement and Concrete Research* Vol.33, pg.289-295.

- [22] Purdon, A. O. (1940) The action of alkalis on blast furnace slag. *Journal of the Society of Chemical Industry* Vol.59, pp.191-202.
- [23] Davidovits, J. (1999) Chemistry of geopolymeric systems. Terminology. *Proceedings of 99 Geopolymere Conference*, pp.9-40;.
- [24] Puertas, F.; Martinez-Ramirez, S.; Alonso, S.; Vasquez, T. (2000) Alkali activated fly ash/slag cement. Strength behaviour and hydration products. *Cement and Concrete Research* Vol.30, pp.1625-1632.
- [26] Swanepoel, J. C.; Strydom, C. A. (2002) Utilization of fly ash in a geopolymeric material. *Applied Geochemistry* Vol.17, pp.1143-1148.
- [26] Swanepoel, J. C.; Strydom, C. A. (2002) Utilization of fly ash in a geopolymeric material. *Applied Geochemistry* Vol.17, pp.1143-1148.
- [27] Zhihua, P.; Dongxu, L.; Jian, Y.; Nanry, Y. (2003) Properties and microstructure of the hardened alkali-activated red mud-slag cementitious material. *Cement and Concrete Research* Vol.33, pp.1437-1441.
- [28] Xu, H.; Deventer, S. J.; Jannie, S. J. (2002) Geopolymerisation of multiple minerals. *Minerals Engineering* Vol.15, pp.1131-1139.
- [29] Osório, P. (2006). Conceção de um Saferoom Anti-Tornado em Betão Geopolimérico. Dissertação de Mestrado. Universidade Do Minho. Guimarães, Portugal.
- [30] Pacheco-Torgal, F.; Faria, J.; Jalali, S. (2010) Toxicidade dos materiais de construção. Uma questão crucial para a construção sustentável: Parte 3. O caso das tintas, vernizes, produtos para protecção de madeiras, materiais plásticos, colas sintéticas e isolantes térmicos. *CINCOS'10 Congresso de Inovação na Construção Sustentável*, pp.173-182, Cúria, Portugal.
- [31] Cunha, M. (2013): Durabilidade de Geopolímeros Monofásicos, Dissertação de Mestrado. Universidade Do Minho. Guimarães, Portugal.
- [32] Proença, A. (2007) , A influencia do Metacaulino no control da reacção alcali-sílica. *1as Jornadas de Materiais de Construção*, pp. 45-62.

[33] Zheng, D.; Van Deventer, J.S.L.; Duxson, P. (2007) The dry mix cement composition, methods and systems involving same. International Patent WO 2007/109862 A1.

[34] Cunha, T. (2014): Desenvolvimento de geopolímeros porosos para isolamentos térmicos não tóxicos. Dissertação de Mestrado. Universidade do Minho. Guimarães, Portugal.

[35] Costa, A. (2012): Utilização de geopolímeros para protecção de betão : resistência a altas temperaturas. Dissertação de Mestrado. Universidade Do Minho. Guimarães, Portugal.

[36] EN 1015-10:1999: Métodos de ensaio para argamassas para alvenaria. Determinação da densidade aparente seca de argamassa endurecida.

[37] EN 1015-10:1999: Métodos de ensaio para argamassas para alvenaria. Determinação da resistência à flexão e à compressão do cimento endurecido.

ANEXOS

Tabela A1 - Percentagens dos constituintes de cada mistura estudada

Composição	Cimento	Cinzas volantes	Metacaulino aditivado	Cal hidratada	Areia	Superplastificante	Água/ligante	Ativador/ligante	Alumínio
A	30%	58.3%	4%	7.7%	80%	0.8%	35%	-	0.8%
A	30%	58.3%	4%	7.7%	80%	0.8%	35%	-	1%
A	30%	58.3%	4%	7.7%	80%	0.8%	35%	-	1.2%
A	30%	58.3%	4%	7.7%	80%	0.8%	35%	-	1.5%

Composição	Cimento	Cinzas volantes	Metacaulino aditivado	Cal hidratada	Areia	Superplastificante	Água/ligante	Ativador/ligante	Silicato de sódio/hidróxido de sódio	Alumínio
B	15%	81%	4%	-	-	-	-	1	2.5	0.8%
B	15%	81%	4%	-	-	-	-	1	2.5	1%
B	15%	81%	4%	-	-	-	-	1	2.5	1.2%
B	15%	81%	4%	-	-	-	-	1	2.5	1.5%

Composição	Cimento	Cinzas volantes	Metacaulino aditivado	Cal hidratada	Areia	Superplastificante	Água/ligante	Ativador/ligante	Silicato de sódio/hidróxido de sódio	Alumínio
B	15%	81%	-	-	-	-	-	0.8	2.5	0.8%
B	15%	81%	-	-	-	-	-	0.8	2.5	1%
B	15%	81%	-	-	-	-	-	0.8	2.5	1.2%
B	15%	81%	-	-	-	-	-	0.8	2.5	1.5%

Composição	Cimento	Cinzas volantes	Metacaulino aditivado	Cal hidratada	Areia	Superplastificante	Água/ligante	Ativador/ligante	Silicato de sódio/hidróxido de sódio	Alumínio
B	15%	81%	-	-	-	-	-	0.6	2.5	0.8%
B	15%	81%	-	-	-	-	-	0.6	2.5	1%
B	15%	81%	-	-	-	-	-	0.6	2.5	1.2%
B	15%	81%	-	-	-	-	-	0.6	2.5	1.5%

Composição	Cimento	Cinzas volantes	Metacaulino aditivado	Cal hidratada	Areia	Superplastificante	Água/Ligante	Ativador/Ligante	Silicato de sódio/Hidróxido de sódio	Alumínio
C	100%	-	-	-	-	-	-	1	2.5	0.8%
C	100%	--	-	-	-	-	-	1	2.5	1%
C	100%	-	-	-	-	-	-	1	2.5	1.2%
C	100%	-	-	-	-	-	-	1	2.5	1.5%

Composição	Cimento	Cinzas volantes	Metacaulino aditivado	Cal hidratada	Areia	Superplastificante	Água/ligante	Ativador/ligante	Silicato de sódio/hidróxido de sódio	Alumínio
C	100%	-	-	-	-	-	-	0.8	2.5	0.8%
C	100%	--	-	-	-	-	-	0.8	2.5	1%
C	100%	-	-	-	-	-	-	0.8	2.5	1.2%
C	100%	-	-	-	-	-	-	0.8	2.5	1.5%

Composição	Cimento	Cinzas volantes	Metacaulino aditivado	Cal hidratada	Areia	Superplastificante	Água/ligante	Ativador/ligante	Silicato de sódio/hidróxido de sódio	Alumínio
C	100%	-	-	-	-	-	-	0.6	2.5	0.8%
C	100%	--	-	-	-	-	-	0.6	2.5	1%
C	100%	-	-	-	-	-	-	0.6	2.5	1.2%
C	100%	-	-	-	-	-	-	0.6	2.5	1.5%

Composição	Cimento	Cinzas volantes	Metacaulino aditivado	Cal hidratada	Areia	Superplastificante	Água/ligante	Ativador/ligante	Silicato de sódio/hidróxido de sódio	Alumínio
D	30%	70%	-	-	-	-	-	1	2.5	0.8%
D	30%	70%	-	-	-	-	-	1	2.5	1%
D	30%	70%	-	-	-	-	-	1	2.5	1.2%
D	30%	70%	-	-	-	-	-	1	2.5	1.5%

Composição	Cimento	Cinzas volantes	Metacaulino aditivado	Cal hidratada	Areia	Superplastificante	Água/ligante	Ativador/ligante	Silicato de sódio/hidróxido de sódio	Alumínio
D	30%	70%	-	-	-	-	-	0.8	2.5	0.8%
D	30%	70%	-	-	-	-	-	0.8	2.5	1%
D	30%	70%	-	-	-	-	-	0.8	2.5	1.2%
D	30%	70%	-	-	-	-	-	0.8	2.5	1.5%

Composição	Cimento	Cinzas volantes	Metacaulino aditivado	Cal hidratada	Areia	Superplastificante	Água/ligante	Ativador/ligante	Silicato de sódio/hidróxido de sódio	Alumínio
D	30%	70%	-	-	-	-	-	0.6	2.5	0.8%
D	30%	70%	-	-	-	-	-	0.6	2.5	1%
D	30%	70%	-	-	-	-	-	0.6	2.5	1.2%
D	30%	70%	-	-	-	-	-	0.6	2.5	1.5%

Composição	Cimento	Cinzas volantes	Metacaulino aditivado	Cal hidratada	Areia	Superplastificante	Água/ligante	Ativador/ligante	Silicato de sódio/hidróxido de sódio	Alumínio
E	10%	90%	-	-	-	-	-	1	2.5	0.8%
E	10%	90%	-	-	-	-	-	1	2.5	1%
E	10%	90%	-	-	-	-	-	1	2.5	1.2%
E	10%	90%	-	-	-	-	-	1	2.5	1.5%

Composição	Cimento	Cinzas volantes	Metacaulino aditivado	Cal hidratada	Areia	Superplastificante	Água/ligante	Ativador/ligante	Silicato de sódio/hidróxido de sódio	Alumínio
E	10%	90%	-	-	-	-	-	0.8	2.5	0.8%
E	10%	90%	-	-	-	-	-	0.8	2.5	1%
E	10%	90%	-	-	-	-	-	0.8	2.5	1.2%
E	10%	90%	-	-	-	-	-	0.8	2.5	1.5%

Composição	Cimento	Cinzas volantes	Metacaulino aditivado	Cal hidratada	Areia	Superplastificante	Água/ligante	Ativador/ligante	Silicato de sódio/hidróxido de sódio	Alumínio
E	10%	90%	-	-	-	-	-	0.6	2.5	0.8%
E	10%	90%	-	-	-	-	-	0.6	2.5	1%
E	10%	90%	-	-	-	-	-	0.6	2.5	1.2%
E	10%	90%	-	-	-	-	-	0.6	2.5	1.5%

Composição	Cimento	Cinzas volantes	Metacaulino aditivado	Cal hidratada	Areia	Superplastificante	Água/ligante	Ativador/ligante	Silicato de sódio/hidróxido de sódio	Alumínio
F	-	90%	-	10%	-	-	-	1	2.5	0.8%
F	-	90%	-	10%	-	-	-	1	2.5	1%
F	-	90%	-	10%	-	-	-	1	2.5	1.2%
F	-	90%	-	10%	-	-	-	1	2.5	1.5%

Composição	Cimento	Cinzas volantes	Metacaulino aditivado	Cal hidratada	Areia	Superplastificante	Água/ligante	Ativador/ligante	Silicato de sódio/hidróxido de sódio	Alumínio
F	-	90%	-	10%	-	-	-	0.8	2.5	0.8%
F	-	90%	-	10%	-	-	-	0.8	2.5	1%
F	-	90%	-	10%	-	-	-	0.8	2.5	1.2%
F	-	90%	-	10%	-	-	-	0.8	2.5	1.5%

Composição	Cimento	Cinzas volantes	Metacaulino aditivado	Cal hidratada	Areia	Superplastificante	Água/ligante	Ativador/ligante	Silicato de sódio/hidróxido de sódio	Alumínio
F	-	90%	-	10%	-	-	-	0.6	2.5	0.8%
F	-	90%	-	10%	-	-	-	0.6	2.5	1%
F	-	90%	-	10%	-	-	-	0.6	2.5	1.2%
F	-	90%	-	10%	-	-	-	0.6	2.5	1.5%

Tabela A2 - Valores relativos ao peso de todos os materiais sólidos utilizados em cada uma das 60 misturas geopoliméricas.

Composição A	
Cimento	283,95g
Cinzas Volantes	551,72g
Metacaulino aditivado	37,86g
Hidróxido de Cálcio	72,88g
Areia	757,2g

Composição B	
Cimento	186g
Cinzas Volantes	1015g
Metacaulino aditivado	50g

Composição C	
Cimento	1575g

Composição D	
Cimento	390g
Cinzas Volantes	910g

Composição E	
Cimento	247,8g
Cinzas Volantes	921,57g

Composição F	
Cinzas Volantes	1550,2g
Hidróxido de Cálcio	172,04g

Tabela A3 - Valores de ativadores e agentes de porosidade de cada mistura

Mistura	Água/Ligante	Composição	Agente de Porosidade	Quantidade (g)	Água (ml)	Superplastificante (ml)	Quantidade (ml)
A1	35%	A	0,80%	7,57	662,55	0,80%	7,57
A2			1%	9,46	662,55	0,80%	7,57
A3			1,20%	11,36	662,55	0,80%	7,57
A4			1,50%	14,2	662,55	0,80%	7,57

Mistura	Ativador/Ligante	SS/SH	Composição	Agente de Porosidade	Quantidade (g)	Na ₂ SiO ₃ (g)	NaOH (g)
B5	1	2,5	B	0,80%	9,6	857,85	343,14
B6				1%	12	857,85	343,14
B7				1,20%	14,4	857,85	343,14
B8				1,50%	18	857,85	343,14
C9			C	0,80%	12,6	1125	450
C10				1%	15,75	1125	450
C11				1,20%	18,9	1125	450
C12				1,50%	23,63	1125	450
D13			D	0,80%	10,4	928,57	371,42
D14				1%	13	928,57	371,42
D15				1,20%	15,6	928,57	371,42
D16				1,50%	19,5	928,57	371,42
E17			E	0,80%	9,35	835	334
E18				1%	11,69	835	334
E19				1,20%	14,03	835	334
E20				1,50%	17,54	835	334
F21	F	0,80%	13,8	1230,2	492		
F22		1%	17,2	1230,2	492		
F23		1,50%	25,83	1230,2	492		
B24	0,8	2,5	B	0,80%	9,6	685,71	274,28
B25				1%	12,51	685,71	274,28
B26				1,20%	14,4	685,71	274,28
B27				1,50%	18	685,71	274,28
C28			C	0,80%	12,6	900	360
C29				1%	15,75	900	360
C30				1,20%	18,9	900	360
C31				1,50%	23,63	900	360
D32			D	0,80%	10,4	606	173

Desempenho comparado entre argamassas geopoliméricas correntes e monofásicas com condutibilidade térmica melhorada

D33	0,6			1%	13	606	173		
D34				1,20%	15,6	606	173		
D35				1,50%	19,5	606	173		
E36			E	0,80%	9,35	667,85	267,14		
E37				1%	11,69	667,85	267,14		
E38				1,20%	14,03	667,85	267,14		
E39				1,50%	17,54	667,85	267,14		
F40			F	0,80%	13,8	984,2	393,6		
F41				1%	17,2	984,2	393,6		
F42				1,50%	25,83	984,2	393,6		
B43			0,6		B	0,80%	10	857,85	343,14
B44						1%	12,51	857,85	343,14
B45						1,20%	15,01	857,85	343,14
B46						1,50%	18,77	857,85	343,14
C47					C	0,80%	12,6	675	271
C48						1%	15,75	675	271
C49						1,20%	18,9	675	271
D50					D	0,80%	10,4	594,28	237,71
D51						1%	13	594,28	237,71
D52						1,20%	15,6	594,28	237,71
D53						1,50%	19,5	594,28	237,71
E54					E	0,80%	9,35	545	155,72
E55			1%	11,69		545	155,72		
E56			1,20%	14,03		545	155,72		
E57	1,50%	17,54	545	155,72					
F58	F	0,80%	13,8	738,2	295,2				
F59		1%	17,22	738,2	295,2				
F60		1,50%	25,83	738,2	295,2				

Tabela A4 - Ligantes e agregados presentes em cada mistura

Mistura	Cimento	Quantidade (g)	Cinzas Volantes	Quantidade (g)	Metacaulino aditivado (g)	Quantidade (g)	Ca(OH) ₂	Quantidade (g)	Areia	Quantidade (g)
A1	30%	583,95	58,30%	551,72	4%	37,86	7,70%	72,88	80%	757,2
A2										
A3										
A4										
B5	15%	186	81%	1015	4%	50				
B6										
B7										
B8										
C9	100%	1575								
C10										
C11										
C12										
D13	30%	390	70%	910						
D14										
D15										
D16										
E17	10%	247,8	90%	921,57						
E18										
E19										
E20										
F21			90%	1550			10%	172		
F22										

F23									
B24	15%	186	81%	1015	4%	50			
B25									
B26									
B27									
C28	100%	1575							
C29			0						
C30									
C31									
D32	30%	390	70%	910					
D33									
D34									
D35								0	
E36	10%	247,8	90%	921,57					
E37									
E38									
E39									
F40			90%	1550					
F41	0	10%						172	
F42									
B43	15%	186	81%	1015	4%	50			
B44									
B45									
B46									
C47	100%	1575							
C48			0						
C49									
D50	30%	390	70%	910					
D51									

D52							
D53							
E54	10%	247,8	90%	921,57			
E55							
E56							
E57							
F58			90%	1550		10%	172
F59							
F60							

Tabela A5 - Densidade aparente

Mistura	M Saturado (g)			M Imerso (g)			V (m3)			M Seco (g)			Densidade aparente (kg/m3)		
	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III
A1	226,7	230,7	226	57,8	60,2	58,5	0,1689	0,1705	0,1672	168,7	168,2	166,5	998,816	986,51	995,813
A2	218,1	224,4	220	57,8	60,9	57,6	0,1603	0,1635	0,1626	162,5	167,1	168,3	1013,72	1022,02	1035,06
A3	256,4	262	253	42,9	46,5	44,3	0,2135	0,2155	0,2084	176,5	177,1	170	826,698	821,81	815,739
A4	233,7	246,9	237	38,3	41,5	43,8	0,1954	0,2054	0,1934	158,7	168	164,3	812,18	817,916	849,535
B5	Crack	208,4	210	Crack	92,6	94	Crack	0,1158	0,1159	198,6	200,6	201	Crack	1732,3	1734,25
B6	204,4	198,6	200	88,9	84,8	86,3	0,1155	0,1138	0,1132	195,6	190,9	193,1	1693,51	1677,5	1705,83
B7	189,8	190,3	190	82,2	84,3	82,4	0,1076	0,106	0,1075	181,5	182,4	181,5	1686,8	1720,75	1688,37
B8	167,3	174,3	182	59,6	65,6	67,3	0,1077	0,1087	0,1142	157,8	166	172,2	1465,18	1527,14	1507,88
C9	152,3	Crack	Crack	12,2	Crack	Crack	0,1401	Crack	Crack	76,8	76,9	Crack	548,18	Crack	Crack
C10	156,6	152,1	158	11,1	5,5	7,6	0,1455	0,1466	0,15	71,8	72,5	78,1	493,471	494,543	520,667
C11	Crack	Crack	Crack	Crack	Crack	Crack	Crack	Crack	Crack	48,3	50,5	46,5	Crack	Crack	Crack

C12	Crack	Crack	Crack	Crack	Crack	Crack	Crack	Crack	Crack	56,1	59,7	Crack	Crack	Crack	Crack
D13	157,7	141,2	Crack	28,6	28,4	Crack	0,1291	0,1128	Crack	126,1	136,2	112,2	976,762	1207,45	Crack
D14	114,1	122,9	139	12	14,2	23,1	0,1021	0,1087	0,1159	97,7	102,5	117,6	956,905	942,962	1014,67
D15	96,8	95,7	101	4,5	5,1	5,2	0,0923	0,0906	0,0962	73,9	72	77,5	800,65	794,702	805,613
D16	103,8	110,3	111	3,6	5	5,1	0,1002	0,1053	0,1054	74	75,5	80,9	738,523	716,999	767,552
E17	161,5	159,1	160	49,1	47,6	50,3	0,1124	0,1115	0,1093	149,6	148,7	147,8	1330,96	1333,63	1352,24
E18	181,1	174,1	183	75,5	71,5	75,2	0,1056	0,1026	0,1073	172,7	165,2	173,7	1635,42	1610,14	1618,83
E19	116,8	116,3	114	15	12,7	10,5	0,1018	0,1036	0,1033	100	97,9	97,1	982,318	944,981	939,981
E20	102,6	106,6	111	5	9,2	7,6	0,0976	0,0974	0,1036	80,8	82,3	86,9	827,869	844,969	838,803
F21	190,7	192,3	190	76,3	76,6	76,4	0,1144	0,1157	0,1133	179	182	178,8	1564,69	1573,03	1578,11
F22	185,6	191,8	188	74,3	75,3	74,4	0,1113	0,1165	0,1134	175,5	179,9	180	1576,82	1544,21	1587,3
F23	130,1	124,9	136	29,1	28,1	31,2	0,101	0,0968	0,1043	120	114,4	127,2	1188,12	1181,82	1219,56
B24	194,3	191,4	198	72,5	74,9	74,1	0,1218	0,1165	0,1242	182,3	182,5	185,7	1496,72	1566,52	1495,17
B25	178,7	171,1	164	45,5	44,3	52,1	0,1332	0,1268	0,1114	164,3	159,5	160,1	1233,48	1257,89	1437,16
B26	145,8	147,2	159	34,6	34,5	35	0,1112	0,1127	0,1243	133,8	131,1	144,5	1203,24	1163,27	1162,51
B27	156,6	144,3	140	7,6	9,6	9,1	0,149	0,1347	0,1312	117,8	110,8	104,9	790,604	822,569	799,543
C28	201	Crack	204	27,3	Crack	26,9	0,1737	Crack	0,1771	113,7	113	113,7	654,577	Crack	642,01
C29	150,6	Crack	160	12,4	Crack	14,4	0,1382	Crack	0,1455	83,3	85	81,1	602,75	Crack	557,388
C30	157,3	159,6	159	11,4	10,2	16	0,1459	0,1494	0,1426	85,2	87	83,7	583,962	582,329	586,957
C31	149,7	143,8	161	3,2	1,9	11,2	0,1465	0,1419	0,1494	81,4	79,8	83,4	555,631	562,368	558,233
D32	118,2	111,3	115	-5,4	-18	-13	0,1236	0,129	0,1282	64,9	65,9	66,2	525,081	510,853	516,381
D33	126,3	112,8	116	-12,1	-20	-15	0,1384	0,1332	0,1301	70,8	62,5	63,5	511,561	469,219	488,086
D34	106,2	109,2	104	-32	-30	-18	0,1382	0,139	0,1222	62	61,3	54,8	448,625	441,007	448,445
D35	105,6	108,6	102	-35	-31	-29	0,1406	0,1396	0,1303	59,2	63	61,3	421,053	451,289	470,453
E36	142,7	146,3	157	27,5	30,2	34,6	0,1152	0,1161	0,122	125,1	129,6	138,6	1085,94	1116,28	1136,07
E37	114,6	111,1	113	-1,7	0	5,1	0,1163	0,1111	0,1077	87,2	83,7	86,1	749,785	753,375	799,443
E38	101,4	102,6	107	-3,3	-7,6	-4,8	0,1047	0,1102	0,1115	63	65,3	70,2	601,719	592,559	629,596

E39	111,9	100,4	104	-12,8	-7,6	-16	0,1247	0,108	0,1197	66,7	61,7	63,3	534,884	571,296	528,822
F40	149	134,7	136	18,4	14	16,2	0,1306	0,1207	0,12	127,6	118	119,4	977,029	977,63	995
F41	116,4	125,2	132	3,9	5	9,3	0,1125	0,1202	0,123	98,1	102,2	106,6	872	850,25	866,667
F42	129,4	132,9	127	-15	-14	-19	0,1444	0,1464	0,1461	76,9	81,1	81,9	532,548	553,962	560,575
B43	89	83,5	Crack	-10,4	-11	Crack	0,0994	0,0943	Crack	53,7	53	Crack	540,241	562,036	Crack
B44	80,3	83,1	80,7	-18,3	-12	-14	0,0986	0,0946	0,095	49,1	49,2	48,6	497,972	520,085	511,579
B45	85,7	82,9	86,5	-23,2	-23	-22	0,1089	0,1056	0,1085	47,9	47,2	48,9	439,853	446,97	450,691
B46	85,7	80,1	84,8	-30,3	-29	-27	0,116	0,1086	0,1121	47,1	45,1	46,4	406,034	415,285	413,916
C47	Crack	Crack	Crack	Crack	Crack	Crack	Crack	Crack	Crack	232,5	241,9	239,1	Crack	Crack	Crack
C48	Crack	Crack	Crack	Crack	Crack	Crack	Crack	Crack	Crack	204,9	195,5	171,2	Crack	Crack	Crack
C49	Crack	Crack	Crack	Crack	Crack	Crack	Crack	Crack	Crack	200,4	Crack	210,4	Crack	Crack	Crack
D50	103,6	112,4	124	-30,8	-36	-32	0,1344	0,1484	0,156	56,2	58,8	62,9	418,155	396,226	403,205
D51	104,3	124,6	114	-41,1	-47	-46	0,1454	0,1713	0,1599	61,5	69,5	63,2	422,971	405,721	395,247
D52	95,6	94,1	108	-39,8	-45	-36	0,1354	0,1395	0,1436	54,6	56,3	57,7	403,25	403,584	401,811
D53	119	126,9	125	-53,7	-48	-45	0,1727	0,1745	0,1695	66,2	67,2	67,5	383,324	385,1	398,23
E54	138,8	131	136	-45,3	-41	-42	0,1841	0,1716	0,1778	86,1	78,8	83,6	467,681	459,207	470,191
E55	91,7	103,4	105	-42,2	-48	-45	0,1339	0,151	0,1503	51,8	57,6	55,4	386,856	381,457	368,596
E56	107	116	102	-38,7	-42	-42	0,1457	0,1583	0,1445	59,8	60,9	57	410,432	384,713	394,464
E57	114,4	118,9	108	-49,9	-46	-57	0,1643	0,1648	0,1651	61,6	61,4	58,6	374,924	372,573	354,936
F58	104,1	110	122	-6,6	-18	-10	0,1107	0,1281	0,1321	65,7	67,7	70,5	593,496	528,493	533,687
F59	120,7	126	135	-7,3	-13	-12	0,128	0,1385	0,1474	74	79,9	82,7	578,125	576,895	561,058
F60	112,2	114,3	113	-13,3	-18	-17	0,1255	0,1323	0,1303	67,6	68,2	66,8	538,645	515,495	512,663

Tabela A6 - Média dos valores da densidade aparente para a razão água/ligante de 35%

Água / Ligante	Agente indutor de porosidade	Mistura	M _{Seco} (g)	M _{Imerso} (g)	M Saturado (g)	V (m ³)	Densidade aparente (kg/m ³)
35%	0,80%	A1	167,8	58,8333	227,7	0,16887	993,6833794
	1%	A2	165,97	58,7667	220,9	0,16213	1023,643092
	1,20%	A3	174,53	44,5667	257,03	0,21247	821,4621901
	1,50%	A4	163,67	41,2	239,27	0,19807	826,321104

Tabela A7 - Média dos valores da densidade aparente para a razão ativador/ligante de 1.

Ativador/Ligante	Silicato de Sódio/Hidróxido de Sódio	Agente indutor de porosidade	Mistura	M _{Seco} (g)	M _{Imerso} (g)	M Saturado (g)	V (m ³)	Densidade aparente (kg/m ³)
1	2,5	0,80%	B5	200,067	93,3	209,15	0,1159	1726,945763
		1%	B6	193,2	86,667	200,833	0,1142	1692,262774
		1,20%	B7	181,8	82,967	190	0,107	1698,536282
		1,50%	B8	165,333	64,167	174,367	0,1102	1500,30248
		0,80%	C9	76,85	12,2	152,3	0,1401	548,5367595
		1%	C10	74,1333	8,0667	155,433	0,1474	503,0536078
		1,20%	C11	48,4333	Crack	Crack	Crack	Crack
		1,50%	C12	57,9	Crack	Crack	Crack	Crack
		0,80%	D13	124,833	28,5	149,45	0,121	1032,106931
		1%	D14	105,933	16,433	125,333	0,1089	972,7578818
		1,20%	D15	74,4667	4,9333	97,9667	0,093	800,4299534
		1,50%	D16	76,8	4,5667	108,2	0,1036	741,0743004
		0,80%	E17	148,7	49	160,067	0,1111	1338,835534
		1%	E18	170,533	74,067	179,233	0,1052	1621,55309
		1,20%	E19	98,3333	12,733	115,633	0,1029	955,6203434
		1,50%	E20	83,3333	7,2667	106,8	0,0995	837,2404555
		0,80%	F21	179,933	76,433	190,9	0,1145	1571,927781
		1%	F22	178,467	74,667	188,4	0,1137	1569,167644
1,50%	F23	120,533	29,467	130,167	0,1007	1196,954651		

Tabela A8 - Média dos valores da densidade aparente para a razão ativador/ligante de 0,8.

Ativador/Ligante	Silicato de Sódio/Hidróxido de Sódio	Agente indutor de porosidade	Mistura	M _{seco} (g)	M Imerso (g)	M Saturado (g)	V (m ³)	Densidade aparente (kg/m ³)
0,8	2,5	0,80%	B24	183,5	73,833	194,667	0,1208	1518,62069
		1%	B25	161,3	47,3	171,1	0,1238	1302,907916
		1,20%	B26	136,467	34,7	150,767	0,1161	1175,761057
		1,50%	B27	111,167	8,7667	147,067	0,1383	803,8081465
		0,80%	C28	113,467	27,1	202,5	0,1754	646,9023185
		1%	C29	83,1333	13,4	155,25	0,1419	586,0650922
		1,20%	C30	85,3	12,533	158,5	0,146	584,3799954
		1,50%	C31	81,5333	5,4333	151,367	0,1459	558,7026039
		0,80%	D32	65,6667	-12	114,933	0,1269	517,3319328
		1%	D33	65,6	-	118,233	0,1339	489,9178491
		1,20%	D34	59,3667	-	106,6	0,1331	445,9188783
		1,50%	D35	61,1667	-	105,3	0,1368	447,0158343
		0,80%	E36	131,1	30,767	148,533	0,1178	1113,218228
		1%	E37	85,6667	1,1333	112,833	0,1117	766,9352432
		1,20%	E38	66,1667	-	103,567	0,1088	608,1495098
		1,50%	E39	63,9	-12	105,467	0,1175	543,984109
		0,80%	F40	121,667	16,2	139,967	0,1238	983,0325882
		1%	F41	102,3	6,0667	124,633	0,1186	862,8057352
1,50%	F42	79,9667	-	129,8	0,1456	549,095903		

Tabela A9 - Média dos valores da densidade aparente para a razão ativador/ligante de 0,6.

Ativador/Ligante	Silicato de Sódio/Hidróxido de Sódio	Agente indutor de porosidade	Mistura	M _{Seco} (g)	M Imerso (g)	M Saturado (g)	V (m ³)	Densidade aparente (kg/m ³)
0,6	2,5	0,80%	B43	53,35	-10,6	86,25	0,0969	550,8518327
		1%	B44	48,9667	-14,7	81,3667	0,0961	509,7154754
		1,20%	B45	48	-	85,0333	0,1077	445,8204334
		1,50%	B46	46,2	-28,7	83,5333	0,1122	411,6424116
		0,80%	C47	237,833	Crack	Crack	Crack	Crack
		1%	C48	190,533	Crack	Crack	Crack	Crack
		1,20%	C49	205,4	Crack	Crack	Crack	Crack
		0,80%	D50	59,3	-32,9	113,367	0,1463	405,4238833
		1%	D51	64,7333	-	114,433	0,1589	407,4695762
		1,20%	D52	56,2	-	99,1333	0,1395	402,8673835
		1,50%	D53	66,9667	-	123,5	0,1722	388,8136249
		0,80%	E54	82,8333	-	135,367	0,1778	465,79194
		1%	E55	54,9333	-	100,1	0,1451	378,6764706
		1,20%	E56	59,2333	-	108,467	0,1495	396,2095875
		1,50%	E57	60,5333	-	113,867	0,1647	367,4625658
		0,80%	F58	67,9667	-11,6	112,033	0,1236	549,7438663
		1%	F59	78,8667	-10,6	127,367	0,138	571,6356608
		1,50%	F60	67,5333	-	113,3	0,1294	522,0304045

Tabela A10 - Média dos valores da percentagem de água absorvida por imersão para uma razão de água/ligante de 35%

Agente Indutor de Porosidade	Mistura	M Seco (g)			M Imerso (g)			M Saturado (g)			Absorção (%)			Média
		I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III	
35%	A1	168,7	168,2	166,5	57,8	60,2	58,5	226,7	230,7	225,7	34,3	36,7	35,4	35,5
	A2	162,5	167,1	168,3	57,8	60,9	57,6	218,1	224,4	220,2	34,7	35,1	31,9	33,9
	A3	176,5	177,1	170	42,9	46,5	44,3	256,4	262	252,7	37,4	39,4	39,7	38,8
	A4	158,7	168	164,3	38,3	41,5	43,8	233,7	246,9	237,2	38,4	38,4	37,7	38,2

Tabela A11 - Média dos valores da percentagem da água absorvida por imersão para uma razão ativador/ligante de 1.

Ativador/Ligante	Silicato de Sódio/Hidróxido de Sódio	Agente indutor de porosidade	Mistura	M _{Seco} (g)	M _{Imerso} (g)	M _{Saturado} (g)	Absorção (%)
1	2,5	0,80%	B5	200,067	93,3	209,15	7,840310747
		1%	B6	193,2	86,667	200,833	6,685878458
		1,20%	B7	181,8	82,967	190	7,661188605
		1,50%	B8	165,333	64,167	174,367	8,197822142
		0,80%	C9	76,85	12,2	152,3	53,85438972
		1%	C10	74,1333	8,0667	155,433	55,1684476
		1,20%	C11	48,4333	Crack	Crack	Crack
		1,50%	C12	57,9	Crack	Crack	Crack
		0,80%	D13	124,833	28,5	149,45	20,35303845
		1%	D14	105,933	16,433	125,333	17,81450872
		1,20%	D15	74,4667	4,9333	97,9667	25,25974542
		1,50%	D16	76,8	4,5667	108,2	30,2991413
		0,80%	E17	148,7	49	160,067	10,23436304
		1%	E18	170,533	74,067	179,233	8,272635643
		1,20%	E19	98,3333	12,733	115,633	16,81214772
		1,50%	E20	83,3333	7,2667	106,8	23,57673261
		0,80%	F21	179,933	76,433	190,9	9,580927254
		1%	F22	178,467	74,667	188,4	8,733612936
1,50%	F23	120,533	29,467	130,167	9,567030785		

Tabela A12 - Média dos valores da percentagem da água absorvida por imersão para uma razão ativador/ligante de 0,8.

Ativador/Ligante	Silicato de Sódio/Hidróxido de Sódio	Agente indutor de porosidade	Mistura	M _{Seco} (g)	M _{Imerso} (g)	M _{Saturado} (g)	Absorção (%)
0,8	2,5	0,80%	B24	183,5	73,833	194,667	9,241604184
		1%	B25	161,3	47,3	171,1	7,915993538
		1,20%	B26	136,467	34,7	150,767	12,32047007
		1,50%	B27	111,167	8,7667	147,067	25,95800588
		0,80%	C28	113,467	27,1	202,5	50,75997719
		1%	C29	83,1333	13,4	155,25	50,8401128
		1,20%	C30	85,3	12,533	158,5	50,1483212
		1,50%	C31	81,5333	5,4333	151,367	47,85303189
		0,80%	D32	65,6667	-12	114,933	38,81283827
		1%	D33	65,6	-	118,233	39,30769231
		1,20%	D34	59,3667	26,533	106,6	35,47828112
		1,50%	D35	61,1667	31,533	105,3	32,25340378
		0,80%	E36	131,1	30,767	148,533	14,80308408
		1%	E37	85,6667	1,1333	112,833	24,32083524
		1,20%	E38	66,1667	5,2333	103,567	34,37518095
		1,50%	E39	63,9	-12	105,467	35,38610844
		0,80%	F40	121,667	16,2	139,967	14,7858476
		1%	F41	102,3	6,0667	124,633	18,83587495
1,50%	F42	79,9667	-	129,8	34,21841204		

Tabela A13 - Média dos valores da percentagem da água absorvida por imersão para uma razão ativador/ligante de 0,6.

Ativador/Ligante	Silicato de Sódio/Hidróxido de Sódio	Agente indutor de porosidade	Mistura	M _{Seco} (g)	M _{Imerso} (g)	M _{Saturado} (g)	Absorção (%)
0,6	2,5	0,80%	B43	53,35	-10,6	86,25	33,97005679
		1%	B44	48,9667	-14,7	81,3667	33,72656706
		1,20%	B45	48	-22,633	85,0333	34,39637101
		1,50%	B46	46,2	-28,7	83,5333	33,26401344
		0,80%	C47	237,833	Crack	Crack	Crack
		1%	C48	190,533	Crack	Crack	Crack
		1,20%	C49	205,4	Crack	Crack	Crack
		0,80%	D50	59,3	-32,9	113,367	36,96459215
		1%	D51	64,7333	-44,433	114,433	31,28403812
		1,20%	D52	56,2	-40,367	99,1333	30,77649295
		1,50%	D53	66,9667	-48,733	123,5	32,82373297
		0,80%	E54	82,8333	-42,467	135,367	29,54086395
		1%	E55	54,9333	-44,967	100,1	31,13506173
		1,20%	E56	59,2333	-41,033	108,467	32,9322408
		1,50%	E57	60,5333	-50,867	113,867	32,37564801
		0,80%	F58	67,9667	-11,6	112,033	35,64282999
		1%	F59	78,8667	-10,6	127,367	35,15355121
		1,50%	F60	67,5333	-16,067	113,3	35,37741464

Tabela A14 - Absorção de água por imersão (%).

Mistura	M Saturado (g)			M Imerso (g)			M Seco (g)			Absorção de água por imersão (%)			Média (%)
	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III	
A1	226,7	230,7	225,7	57,8	60,2	58,5	168,7	168,2	166,5	34,33985	36,6569	35,4066986	35,467812
A2	218,1	224,4	220,2	57,8	60,9	57,6	162,5	167,1	168,3	34,68497	35,0459	31,9188192	33,883219
A3	256,4	262	252,7	42,9	46,5	44,3	176,5	177,1	170	37,42389	39,3968	39,6833013	38,834647
A4	233,7	246,9	237,2	38,3	41,5	43,8	158,7	168	164,3	38,3828	38,4129	37,6938987	38,163185
B5	Crack	208,4	209,9	Crack	92,6	94	198,6	200,6	201	Crack	6,73575	7,67903365	Crack
B6	204,4	198,6	199,5	88,9	84,8	86,3	195,6	190,9	193,1	7,619048	6,76626	5,65371025	6,6796715
B7	189,8	190,3	189,9	82,2	84,3	82,4	181,5	182,4	181,5	7,713755	7,45283	7,81395349	7,6601794
B8	167,3	174,3	181,5	59,6	65,6	67,3	157,8	166	172,2	8,820799	7,63569	8,14360771	8,2000336
C9	152,3	Crack	Crack	12,2	Crack	Crack	76,8	76,9	Crack	53,89008	Crack	Crack	Crack
C10	156,6	152,1	157,6	11,1	5,5	7,6	71,8	72,5	78,1	58,28179	54,2974	53	55,193065
C11	Crack	Crack	Crack	Crack	Crack	Crack	48,3	50,5	46,5	Crack	Crack	Crack	Crack
C12	Crack	Crack	Crack	Crack	Crack	Crack	56,1	59,7	Crack	Crack	Crack	Crack	Crack
D13	157,7	141,2	Crack	28,6	28,4	Crack	126,1	136,2	112,2	24,47715	4,43262	Crack	Crack
D14	114,1	122,9	139	12	14,2	23,1	97,7	102,5	117,6	16,06268	18,7672	18,4641933	17,764709
D15	96,8	95,7	101,4	4,5	5,1	5,2	73,9	72	77,5	24,8104	26,1589	24,8440748	25,271139
D16	103,8	110,3	110,5	3,6	5	5,1	74	75,5	80,9	29,74052	33,0484	28,0834915	30,290814
E17	161,5	159,1	159,6	49,1	47,6	50,3	149,6	148,7	147,8	10,58719	9,32735	10,7959744	10,236839
E18	181,1	174,1	182,5	75,5	71,5	75,2	172,7	165,2	173,7	7,954545	8,67446	8,20130475	8,2767714
E19	116,8	116,3	113,8	15	12,7	10,5	100	97,9	97,1	16,50295	17,7606	16,1665053	16,810023
E20	102,6	106,6	111,2	5	9,2	7,6	80,8	82,3	86,9	22,33607	24,9487	23,4555985	23,58011
F21	190,7	192,3	189,7	76,3	76,6	76,4	179	182	178,8	10,22727	8,90233	9,62047661	9,583361
F22	185,6	191,8	187,8	74,3	75,3	74,4	175,5	179,9	180	9,074573	10,2146	6,87830688	8,7224908
F23	130,1	124,9	135,5	29,1	28,1	31,2	120	114,4	127,2	10	10,8471	7,957814	9,6016405
B24	194,3	191,4	198,3	72,5	74,9	74,1	182,3	182,5	185,7	9,852217	7,63948	10,1449275	9,2122098

B25	178,7	171,1	163,5	45,5	44,3	52,1	164,3	159,5	160,1	10,81081	9,14826	3,05206463	7,6703801
B26	145,8	147,2	159,3	34,6	34,5	35	133,8	131,1	144,5	10,79137	14,2857	11,9066774	12,32792
B27	156,6	144,3	140,3	7,6	9,6	9,1	117,8	110,8	104,9	26,04027	24,8701	26,9817073	25,964019
C28	201	Crack	204	27,3	Crack	26,9	113,7	113	113,7	50,25907	Crack	50,9881423	Crack
C29	150,6	Crack	159,9	12,4	Crack	14,4	83,3	85	81,1	48,69754	Crack	54,1580756	Crack
C30	157,3	159,6	158,6	11,4	10,2	16	85,2	87	83,7	49,41741	48,5944	52,5245442	50,178777
C31	149,7	143,8	160,6	3,2	1,9	11,2	81,4	79,8	83,4	46,62116	45,1022	51,6733601	47,798902
D32	118,2	111,3	115,3	-5,4	-17,7	-12,9	64,9	65,9	66,2	43,12298	35,1938	38,299532	38,872103
D33	126,3	112,8	115,6	-12,1	-20,4	-14,5	70,8	62,5	63,5	40,10116	37,7628	40,0461184	39,303346
D34	106,2	109,2	104,4	-32	-29,8	-17,8	62	61,3	54,8	31,98263	34,4604	40,589198	35,677421
D35	105,6	108,6	101,7	-35	-31	-28,6	59,2	63	61,3	33,00142	32,6648	31,0053722	32,22385
E36	142,7	146,3	156,6	27,5	30,2	34,6	125,1	129,6	138,6	15,27778	14,3842	14,7540984	14,805343
E37	114,6	111,1	112,8	-1,7	0	5,1	87,2	83,7	86,1	23,55976	24,6625	24,7910864	24,337771
E38	101,4	102,6	106,7	-3,3	-7,6	-4,8	63	65,3	70,2	36,67622	33,8475	32,735426	34,419731
E39	111,9	100,4	104,1	-12,8	-7,6	-15,6	66,7	61,7	63,3	36,24699	35,8333	34,085213	35,388513
F40	149	134,7	136,2	18,4	14	16,2	127,6	118	119,4	16,38591	13,836	14	14,740623
F41	116,4	125,2	132,3	3,9	5	9,3	98,1	102,2	106,6	16,26667	19,1348	20,8943089	18,76525
F42	129,4	132,9	127,1	-15	-13,5	-19	76,9	81,1	81,9	36,35734	35,3825	30,9377139	34,225856
B43	89	83,5	Crack	-10,4	-10,8	Crack	53,7	53	Crack	35,51308	32,3436	#VALOR!	Crack
B44	80,3	83,1	80,7	-18,3	-11,5	-14,3	49,1	49,2	48,6	31,643	35,8351	33,7894737	33,755857
B45	85,7	82,9	86,5	-23,2	-22,7	-22	47,9	47,2	48,9	34,71074	33,8068	34,6543779	34,390647
B46	85,7	80,1	84,8	-30,3	-28,5	-27,3	47,1	45,1	46,4	33,27586	32,2284	34,2551293	33,253117
C47	Crack	Crack	Crack	Crack	Crack	Crack	232,5	241,9	239,1	Crack	Crack	Crack	Crack
C48	Crack	Crack	Crack	Crack	Crack	Crack	204,9	195,5	171,2	Crack	Crack	Crack	Crack
C49	Crack	Crack	Crack	Crack	Crack	Crack	200,4	Crack	210,4	Crack	Crack	Crack	Crack
D50	103,6	112,4	124,1	-30,8	-36	-31,9	56,2	58,8	62,9	35,26786	36,1186	39,2307692	36,872408
D51	104,3	124,6	114,4	-41,1	-46,7	-45,5	61,5	69,5	63,2	29,43604	32,1658	32,0200125	31,207281
D52	95,6	94,1	107,7	-39,8	-45,4	-35,9	54,6	56,3	57,7	30,28065	27,0968	34,8189415	30,732122
D53	119	126,9	124,6	-53,7	-47,6	-44,9	66,2	67,2	67,5	30,57325	34,212	33,6873156	32,824199

E54	138,8	131	136,3	-45,3	-40,6	-41,5	86,1	78,8	83,6	28,62575	30,4196	29,640045	29,561791
E55	91,7	103,4	105,2	-42,2	-47,6	-45,1	51,8	57,6	55,4	29,79836	30,3311	33,1337325	31,087738
E56	107	116	102,4	-38,7	-42,3	-42,1	59,8	60,9	57	32,39533	34,8073	31,4186851	32,873782
E57	114,4	118,9	108,3	-49,9	-45,9	-56,8	61,6	61,4	58,6	32,13634	34,8908	30,1029679	32,376694
F58	104,1	110	122	-6,6	-18,1	-10,1	65,7	67,7	70,5	34,68835	33,0211	38,985617	35,565014
F59	120,7	126	135,4	-7,3	-12,5	-12	74	79,9	82,7	36,48438	33,2852	35,7530529	35,174209
F60	112,2	114,3	113,4	-13,3	-18	-16,9	67,6	68,2	66,8	35,53785	34,845	35,7636224	35,382173

Tabela A15 - Condutibilidade Térmica

Mistura	Provete	λ (x10 ⁻³)	Média (W/m.°C)
A1	I	0,212	0,1963333333
	II	0,137	
	III	0,240	
A2	I	0,154	0,2073333333
	II	0,229	
	III	0,239	
A3	I	0,124	0,1326666667
	II	0,121	
	III	0,153	
A4	I	0,126	0,1413333333
	II	0,129	
	III	0,169	
C28	I	0,187	0,1466666667
	II	0,93	
	III	0,160	
E38	I	0,141	0,1413333333

	II	0,142	
	III	0,141	
E39	I	0,152	0,1446666667
	II	0,136	
	III	0,146	
F41	I	0,105	0,140
	II	0,165	
	III	0,150	
F42	I	0,134	0,1636666667
	II	0,193	
	III	0,164	
B45	I	0,171	0,1743333333
	II	0,181	
	III	0,171	
B46	I	0,161	0,159
	II	0,160	
	III	0,156	
E57	I	0,89	0,136
	II	0,137	
	III	0,182	
F58	I	0,119	0,1203333333
	II	0,124	
	III	0,118	

Tabela A16 - Valores da resistência à compressão

Mistura	Provete	Peso (g) aos 28 dias			Carga (N)			Resistência à compressão (MPa)			Média
		I	II	III	I	II	III	I	II	III	
A	A1	171,4	171	169,2	17400	17250	17250	6,96	6,9	6,9	6,92
	A2	164,8	169,3	170,5	15350	14440	15260	6,14	5,776	6,104	6,007
	A3	179,5	179,9	172,8	14520	16580	14220	5,808	6,632	5,688	6,043
	A4	161,1	170,6	167,5	9500	7200	8500	3,8	2,88	3,4	3,36
B	B5	205,5	207,6	208,5	18440	17770	17200	7,376	7,108	6,88	7,121
	B6	202	197	198,2	16300	17410	16450	6,52	6,964	6,58	6,688
	B7	187,3	188,9	187,7	14350	13440	14330	5,74	5,376	5,732	5,616
	B8	165,3	174,3	179,1	8250	7040	11310	3,3	2,816	4,524	3,547
D	D13	132	141	116,6	2830	2650	3200	1,132	1,06	1,28	1,157
	D14	104,3	110,3	125,4	1490	1840	1720	0,596	0,736	0,688	0,673
	D15	79,3	76,6	81,5	2300	1850	1760	0,92	0,74	0,704	0,788
	D16	79,2	79,9	83,8	1800	1870	2050	0,72	0,748	0,82	0,763
E	E17	154,5	153,3	154,2	16780	11310	12700	6,712	4,524	5,08	5,439
	E18	179	171,8	180,8	18100	13430	17610	7,24	5,372	7,044	6,552
	E19	103,1	102,9	100,5	6290	7140	5890	2,516	2,856	2,356	2,576
	E20	85,4	87	90,2	1120	1760	1520	0,448	0,704	0,608	0,587
F	F21	189,6	191,1	187,4	18730	16610	16300	7,492	6,644	6,52	6,885
	F22	183,5	189,2	189,1	19370	15092	16590	7,748	6,0368	6,636	6,807
	F23	126,2	119,6	130,8	7110	5470	6160	2,844	2,188	2,464	2,499
B	B24	189	187,3	190,4	20300	19610	22300	8,12	7,844	8,92	8,295
	B25	171,5	164,2	167,4	16090	14400	17960	6,436	5,76	7,184	6,46
	B26	139	137,8	151,1	13200	11990	12350	5,28	4,796	4,94	5,005
	B27	123,1	115,1	107,8	13890	14100	14450	5,556	5,64	5,78	5,659
D	D32	67	68,5	68,4	3730	4260	4520	1,492	1,704	1,808	1,668
	D33	72,9	64,6	65,3	3500	3730	4200	1,4	1,492	1,68	1,524
	D34	64,5	63,7	56,9	3870	3420	3320	1,548	1,368	1,328	1,415
	D35	61,7	65,5	63,5	2530	2960	2850	1,012	1,184	1,14	1,112
E	E36	131,1	132,4	143,5	18780	13310	15700	7,512	5,324	6,28	6,372
	E37	90,9	87,2	90,8	14100	14530	12510	5,64	5,812	5,004	5,485
	E38	65,8	67,5	72,7	12290	11140	11890	4,916	4,456	4,756	4,709
	E39	69,3	63,9	66,1	9120	10760	9520	3,648	4,304	3,808	3,92
F	F40	132,3	124,1	124,9	14490	15300	15620	5,796	6,12	6,248	6,055
	F41	102,2	106,2	110,8	12420	12390	12550	4,968	4,956	5,02	4,981
	F42	82,5	84	84,8	7200	8350	8000	2,88	3,34	3,2	3,14
B	B43	63,9	63,2	63	14300	13610	13750	5,72	5,444	5,5	5,555
	B44	58,6	59	58,4	12090	9400	10980	4,836	3,76	4,392	4,329
	B45	56,7	56,1	58,3	9400	9990	10340	3,76	3,996	4,136	3,964
	B46	55,7	53	55,2	10890	8100	8450	4,356	3,24	3,38	3,659
D	D50	65,2	68,7	73	7730	8260	7520	3,092	3,304	3,008	3,135
	D51	70,4	79,5	72,5	7500	9730	8200	3	3,892	3,28	3,391
	D52	63	65	66,4	6870	8420	7320	2,748	3,368	2,928	3,015

Desempenho comparado entre argamassas geopoliméricas correntes e monofásicas com condutibilidade térmica melhorada

	D53	75,5	76,8	76,6	6530	5960	7850	2,612	2,384	3,14	2,712
E	E54	98,2	90,1	95,4	9360	10550	10230	3,744	4,22	4,092	4,019
	E55	59,8	66,5	64	11750	9880	9250	4,7	3,952	3,7	4,117
	E56	69,5	69,4	64,9	10220	9670	8580	4,088	3,868	3,432	3,796
	E57	69,9	69,6	66,6	7250	8550	8800	2,9	3,42	3,52	3,28
F	F58	68,6	70,8	73,4	11300	8200	8750	4,52	3,28	3,5	3,767
	F59	77	83,1	85,8	9340	9540	880	3,736	3,816	0,352	2,635
	F60	70,2	70,5	69,6	9880	7860	8800	3,952	3,144	3,52	3,539

Tabela A17 - Quadro-resumo dos resultados dos ensaios de todas as misturas

Misturas	Absorção de água por imersão	Densidade aparente	Resistência à compressão	Condutibilidade térmica
A1	35,46781204	993,7131761	6,92	196,33
A2	33,88321881	1023,599322	6,006666667	207,33
A3	38,83464689	821,4155335	6,042666667	132,66
A4	38,16318538	826,5436825	3,36	141,33
B5	7,207392473	1733,275365	7,121333333	
B6	6,679671486	1692,280425	6,688	
B7	7,660179441	1698,643261	5,616	
B8	8,200033597	1500,066961	3,546666667	
D13	14,4548868	1092,104504	1,157333333	
D14	17,76470874	971,5116979	0,673333333	
D15	25,2711387	800,3217822	0,788	
D16	30,29081449	741,0247289	0,762666667	
E17	10,23683908	1338,944893	5,438666667	
E18	8,276771382	1621,459614	6,552	
E19	16,81002335	955,7598683	2,576	
E20	23,58010978	837,2137135	0,586666667	
F21	9,583360986	1571,943411	6,885333333	
F22	8,722490793	1569,442334	6,806933333	
F23	9,601640479	1196,498653	2,498666667	
B24	9,212209755	1519,469538	8,294666667	
B25	7,670380142	1309,511098	6,46	
B26	12,32791953	1176,337591	5,005333333	
B27	25,96401915	804,2384603	5,658666667	146,66
D32	38,87210259	517,4380915	1,668	
D33	39,30334573	489,6220002	1,524	
D34	35,67742118	446,025849	1,414666667	
D35	32,22385038	447,598277	1,112	
E36	14,80534258	1112,760715	6,372	
E37	24,33777061	767,5344244	5,485333333	
E38	34,41973123	607,958198	4,709333333	144,66

Desempenho comparado entre argamassas geopoliméricas correntes e monofásicas com condutibilidade térmica melhorada

E39	35,38851305	545,0006908	3,92	
F40	14,7406227	983,2198618	6,054666667	140
F41	18,76525033	862,9720836	4,981333333	163,66
F42	34,22585609	549,0283913	3,14	
B43	33,92833139	551,1387519	5,554666667	174,33
B44	33,75585695	509,8783721	4,329333333	159
B45	34,39064662	445,8380058	3,964	
B46	33,25311746	411,7453601	3,658666667	
D50	36,87240825	405,8621017	3,134666667	
D51	31,20728068	407,9797003	3,390666667	
D52	30,73212187	402,8814817	3,014666667	
D53	32,82419948	388,8846859	2,712	
E54	29,56179076	465,6930979	4,018666667	136
E55	31,08773845	378,9696524	4,117333333	120,33
E56	32,87378195	396,5362114	3,796	
E57	32,37669352	367,4777125	3,28	
F58	35,56501371	551,8919669	3,766666667	
F59	35,17420882	572,0262172	2,634666667	
F60	35,38217338	522,2678635	3,538666667	