



UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR

Departamento de Engenharia Civil e Arquitectura

PROPRIEDADES FÍSICAS DE ARGAMASSA
GEOPOLIMÉRICA DE LAMAS RESIDUAIS
DAS MINAS DA PANASQUEIRA

João Da Cruz Sequeira Centeio

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Civil: Estruturas e Construção
(2º ciclo de estudos)

Orientador: Prof. Doutor João Paulo De Castro Gomes
Co-orientador: Prof. Doutor Pedro Nuno Dinho Pinto Da Silva

Covilhã, Junho de 2011

Dedicatória

A minha família muito obrigado por todo apoio dado
durante este percurso académico,
e especial obrigado a Suely da Graça.

Agradecimentos

Ao Professor Doutor João Paulo de Castro Gomes do Departamento de Engenharia Civil e Arquitectura da Universidade da Beira Interior, agradeço pela orientação científica, pelo apoio e incentivo e a disponibilidade prestada durante a elaboração do presente trabalho.

Ao Professor Doutor Pedro Nuno Dinho Pinto Da Silva do Departamento de Engenharia Electromecânica da Universidade da Beira Interior, agradeço por toda colaboração quer enquanto co-orientador científico do presente trabalho, quer enquanto como conselheiro no sentido de ajudar a ultrapassar as dificuldades surgidas ao longo do trabalho.

Ao Professor Doutor Abílio Silva do Departamento de Engenharia Electromecânica da Universidade da Beira Interior, agradeço pela disponibilização do equipamento de ensaio granulométrica laser (LS200), e as explicações do funcionamento do equipamento e também a ajuda na realização do ensaio.

Agradeço a colaboração dos investigadores e professores que trabalham nos laboratórios de engenharia civil no período em que fiz a investigação, ao Prof. Miguel Santos Nepomuceno, ao Prof. Luiz Pereira de Oliveira, ao Prof. António Albuquerque e a Eng.^a Isabel Castanheira.

A Daesy Pinto estudante de doutoramento da Universidade da Beira Interior, agradeço pela ajuda prestada no ensaio granulométrica laser (LS200).

A Maria Victoria Salazar investigadora da Universidade da Beira Interior, agradeço pela ajuda prestada no ensaio térmico das argamassas.

A Mestre Ana Paula Duarte do Centro de Óptica da Universidade da Beira Interior, pelo apoio na determinação da composição de óxidos e a imagem microscópica das lamas residuais.

Ao Sr. Albino Alves, Técnico do Laboratório de Construção - Tecnologia e Ensaios Mecânicos, do Departamento de Engenharia Civil da Universidade da Beira Interior, agradeço a ajuda prestada nomeadamente na recolha das lamas residuais das Minas da Panasqueira e na realização do tratamento térmico, entre outras.

Aos meus amigos e colegas de Mestrado Marta Lopes, Monteiro, Ioland Tavares, João Caniço, e a minha grande amiga Andreia Mançãs, agradeço muito pelo vosso apoio tão importante durante estes anos todos.

Resumo

O reaproveitamento das lamas residuais das Minas da Panasqueira em materiais geopoliméricos, permite por um lado diminuir o impacto ambiental negativo do seu depósito à superfície, e por outro lado, em substituição de cimento Portland, contribui para a diminuição do nível de emissões de gases com efeito de estufa.

O presente trabalho insere-se no desenvolvimento de um elemento (argamassa) geopolimérica à base de lamas residuais das minas da Panasqueira para aplicação em paredes de edifício, procurando conhecer e melhorar o seu comportamento térmico.

Na caracterização dos materiais de base para a argamassa geopolimérica, estudou-se a possibilidade de aumentar a superfície específica da lama residual para poder aumentar a sua reactividade e consequentemente melhorar o desempenho da resistência mecânica. Foram utilizadas duas formas para aumentar a superfície específica: moer antes do tratamento térmico e moer depois do tratamento térmico, tendo-se verificado que a melhor forma é a segunda.

Na elaboração da mistura foi utilizado um software “ALKALE” para o cálculo dos activadores alcalinos para uma determinada massa do precursor.

Foram também estudadas determinadas propriedades físicas e mecânicas, tendo-se verificado que para as condições que optimizam a resistência mecânica, a trabalhabilidade é baixa e a utilização do introdutor de ar origina misturas mais compactas mas não altera de forma significativa a trabalhabilidade. A adição de água teve um efeito mais eficaz na trabalhabilidade. A argamassa geopolimérica apresentou elevada resistência à flexão, mas em idades iniciais mais baixas que a argamassa de cimento, enquanto que na compressão verificou-se o contrario.

O ensaio térmico das argamassas de cimento e geopoliméricas, mostraram que as argamassas geopoliméricas tem melhores desempenhos, comparativamente às argamassas de cimento Portland, com maiores resistências térmicas e menores condutibilidades térmicas.

Palavras-chave: Resistência térmica; Condutibilidade térmica; Geopolímeros; Lamas residuais; Resistência térmica de geopolímeros; Condutibilidade térmica de geopolímeros; argamassas geopoliméricas.

Abstract

The reuse of Panasqueira Mine waste mud in geopolymeric materials, contributes to reduce the negative environmental impact of deposit in dams, and as cement replacement contributes to the decrease the level of emissions of greenhouse gases.

This work is part of a research work to develop of an element (mortar) geopolymer-based waste mud of Panasqueira mines for use in building walls, in order to improve the energy performance of the building envelop.

In the characterization of materials for the geopolymer mortar, it was found that there was need to increase the specific surface of waste mud in order to increase its reactivity and consequently improve the performance of mechanical strength. Two ways to increase the specific surface area were adopted: calcination before grinding and grinding after calcination, being the second the best way.

In preparing the mixture software ALKALI was used for calculating the alkaline activators for a given mass of the precursor.

Physical and mechanical properties were also studied. It was found that for the conditions that optimize the mechanical strength, workability is low and the use of an air entrainment agent originates more compact mixes but does not alter significantly the workability. The addition of water had the best effect. The geopolymer mortar was highly bending strength but at early ages, lower than the cement mortar, while in the compressive strength the opposite was verified.

Thermal testing of cement and geopolymer mortars showed test the second has better performance, presenting higher thermal resistance and lower thermal conductivity.

Keywords: Thermal resistance; Thermal conductivity; Geopolymers; mine waste mud; thermal resistance of geopolymers; Thermal conductivity of geopolymers; geopolymer mortars.

Índice

Dedicatória	iii
Agradecimentos	v
Resumo	vii
Abstract	ix
Lista de Figuras	xvi
Lista de Tabelas	xx
Lista de Abreviaturas e Símbolos	xxii
CAPÍTULO 1 - Introdução	1
1.1 - Enquadramento	2
1.2 - Objectivos, justificação e metodologia	3
1.3 - Estrutura e conteúdo do trabalho	4
CAPÍTULO 2 - Materiais Geopoliméricos	5
2.1 - Geopolímeros	6
2.2 - A química dos geopolímeros	7
2.3 - Desempenho e as suas aplicações	9
2.4 - Alguns estudos sobre materiais precursores de geopolímeros	10
CAPÍTULO 3 - Materiais e Procedimentos utilizados	20
3.1 - Considerações gerais	21
3.2 - Caracterização dos materiais utilizados	21
3.2.1 - Lamas residuais das Minas da Panasqueira	21
3.2.1.1 - Origem, obtenção e transporte da lama residual	21
3.2.1.2 - Composição química	23
3.2.1.3 - Tratamento térmico	23
3.2.1.4 - Moagem	24
3.2.1.5 - Densidade	25

3.2.1.6 - Superfície específica -----	25
3.2.1.7 - Análise granulométrica laser -----	26
3.2.1.8 - Análise da microestrutura-----	28
3.2.2 - Areia -----	31
3.2.2.1 - Origem, obtenção e transporte da areia -----	31
3.2.2.2 - Análise granulométrica -----	31
3.2.2.3 - Massa volúmica-----	32
3.2.3 - Silicato de sódio -----	32
3.2.4 - Hidróxido de sódio-----	33
3.2.5 - SIKA AER 5 -----	33
3.2.5.1 - Descrição e características gerais -----	33
3.2.5.2 - Propriedades físicas -----	34
3.2.5.3 - Dosagem e modo de utilização -----	34
3.2.6 - Cimento Portland (CEMII/B-L32,5N)-----	34
3.2.6.1 - Composição -----	34
3.2.6.2 - Propriedades -----	35
CAPÍTULO 4 - Elaboração do elemento de estudo -----	36
4.1 - Introdução -----	37
4.2 - Elaboração do elemento de estudo -----	37
4.2.1 - Dimensões e formas -----	37
4.2.2 - Preparação dos materiais e moldes -----	37
4.2.2.1 - Preparação dos moldes -----	37
4.2.2.2 - Composição da mistura -----	38
4.2.2.3 - Pesagem e dosagem dos constituintes -----	39
4.2.3 - Elaboração dos corpos de prova -----	40
4.2.3.1 - Elaboração da mistura -----	40
4.2.3.2 - Trabalhabilidade -----	42
4.2.3.3 - Colocação e compactação -----	43
4.2.3.4 - Cura -----	44

4.2.3.5 - Provetes de ensaio térmico-----	45
CAPÍTULO 5 - Equipamentos e ensaios realizados-----	47
5.1 - Introdução-----	48
5.2 - Equipamentos e ensaios realizados-----	48
5.2.1 - Resistência à Compressão-----	48
5.2.2 - Resistência à flexão-----	49
5.2.3 - Absorção de Água por Capilaridade-----	51
5.2.4 - Porosidade e Massa Volúmica no estado endurecido-----	53
5.2.5 - Determinação da Resistência Térmica-----	54
5.2.5.1 - Fonte quente-----	55
5.2.5.1.1 - Instalação experimental (montagem)-----	55
5.2.5.1.2 - Sistema de aquecimento-----	56
5.2.5.1.3 - Temperatura no interior da placa-----	58
5.2.5.2 - Sistema de arrefecimento-----	58
5.2.5.2.1 - Montagem do sistema de arrefecimento-----	58
5.2.5.3 - Sistema para medição de temperatura-----	61
5.2.5.3.1 - Utilização da termografia por infravermelhos-----	61
5.2.5.3.2 - Utilização de termopares-----	64
CAPÍTULO 6 - Apresentação e discussão de resultados-----	66
6.1 - Propriedades mecânicas-----	67
6.1.1 - Resistência à compressão-----	67
6.1.2 - Resistência à flexão-----	71
6.2 - Absorção de água por capilaridade-----	74
6.2.1 - Absorção de água por capilaridade das argamassas de cimento-----	74
6.2.2 - Absorção de água por capilaridade das argamassas geopoliméricas-----	75
6.3 - Porosidade e Massa Volúmica das argamassas-----	77
6.3.1 - Porosidade e Massa volúmica das argamassas geopoliméricas-----	77
6.3.2 - Porosidade e Massa volúmica das argamassas de cimento-----	78

6.4 - Propriedades térmicas das argamassas-----	79
6.4.1 - Resistência e condutibilidade térmica das argamassas de cimento -----	79
6.4.2 - Resistência e condutibilidade térmica das argamassas geopoliméricas -----	81
6.4.3 - Termografia por infravermelhos das argamassas -----	85
6.5 - Caracterização das argamassas segundo EN 998 - 1 e CSTB - MERUC -----	87
6.5.1 Classificação das argamassas segundo a norma EN 998 - 1 -----	89
6.5.2 - Classificação das argamassas segundo a CSTB - MERUC -----	90
CAPÍTULO 7 - Conclusões finais -----	91
7.1 - Conclusões finais -----	92
7.2 - Investigações futuras -----	93
Bibliografia-----	94
Anexos -----	100
Anexo A: Procedimentos de ensaios-----	101
Anexo B: Resultados de ensaios-----	110

Lista de Figuras

Figura 1.1: Comparação da temperatura de produção de cimento geopolimérico e cimento Portland	3
Figura 2.1: Tipos de poli (sialato) [7]	8
Figura 3.1: Vistas das escombeiras das Minas da Panasqueira [42]	22
Figura 3.2: Recipientes de transporte da lama.....	23
Figura 3.3: Coulter LS 200.....	26
Figura 3.4: Análise da granulometria da lama natural (D, P e DM)	27
Figura 3.5: Análise da granulometria da lama tratado termicamente	27
Figura 3.6: Curvas granulométrica da DCM e DMC	28
Figura 3.7: Imagem microscópica da lama desagregada (D)	28
Figura 3.8: Imagem microscópica da lama desagregada calcinada (DC).....	29
Figura 3.9: Imagem microscópica da lama desagregada moída (DM).....	29
Figura 3.10: Imagem microscópica da lama desagregada moída calcinada (DMC)	30
Figura 3.11: Imagem microscópica da lama desagregada calcinada moída (DCM)	30
Figura 3.12: Vibração mecânica na análise granulométrica.....	31
Figura 3.13: Curva granulométrica da areia	32
Figura 4.1: Preparação dos moldes	38
Figura 4.2: Determinação da dosagem dos constituintes da mistura	38
Figura 4.3: Pesagem dos constituintes.....	40
Figura 4.4: Elaboração da mistura	42
Figura 4.5: Medição da trabalhabilidade da argamassa geopolimérica com ar	43
Figura 4.6: Colocação e compactação das argamassas geopoliméricas	44
Figura 4.7: Cura a temperatura ambiente dos provetes de ensaio à flexão	45
Figura 4.8: Cura a temperatura ambiente do provete de ensaio térmico	45
Figura 4.9: Argamassa geopolimérica com ar incorporado	46
Figura 4.10: Argamassa geopolimérica sem ar incorporado.....	46

Figura 5.1: Equipamento de ensaio à compressão	49
Figura 5.2: Equipamento de ensaio à flexão	50
Figura 5.3: Fases do ensaio de absorção capilar	52
Figura 5.4: Dispositivo para determinação da resistência térmica	54
Figura 5.5: Esquema da secção transversal da placa [54]	56
Figura 5.6: Conjunto placa de alumínio/caixilho em MDF	57
Figura 5.7: Equipamento auxiliar do sistema de aquecimento [54]	57
Figura 5.8: Fonte de arrefecimento	58
Figura 5.9: Colocação do isolamento e fixação da tubagem [55]	59
Figura 5.10: Localização dos termopares interiores [55]	59
Figura 5.11: Aspecto após a colocação da camada de argamassa [55]	60
Figura 5.12: Corte do piso antes e da colocação do revestimento [55]	60
Figura 5.13: Aspecto final do sistema de arrefecimento	60
Figura 5.14: Placa utilizada na calibração do sistema de TIV	62
Figura 5.15: Termograma relativo à calibração do sistema de TIV [54]	62
Figura 5.16: Curva de calibração do sistema de termografia por infravermelhos [54]	63
Figura 5.17: Posicionamento da câmara do sistema de TIV	63
Figura 5.18: Sistema de aquisição das temperaturas (termopares)	64
Figura 5.19: Fonte quente por cima e fonte fria por baixo	64
Figura 5.20: Preparação para o ensaio da argamassa de cimento	65
Figura 6.1: Rotura por compressão das argamassas	67
Figura 6.2: Resistência à compressão das argamassas geopoliméricas	68
Figura 6.3: Resistência à compressão das argamassas de cimento	68
Figura 6.4: Resistência à compressão de argamassas com ar incorporado	69
Figura 6.5: Resistência à compressão das argamassas sem ar incorporado	69
Figura 6.6: Argamassas com as melhores resistências	70
Figura 6.7: Argamassas com menores resistências	70

Figura 6.8: Rotura por flexão das argamassas	71
Figura 6.9: Evolução da resistência à flexão das argamassas de cimento	71
Figura 6.10: Evolução da resistência à flexão das argamassas geopoliméricas	72
Figura 6.11: Resistência à flexão das argamassas com ar incorporado	72
Figura 6.12: Resistência à flexão das argamassas sem ar incorporado.....	73
Figura 6.13: Argamassas com as melhores resistências	73
Figura 6.14: Absorção capilar média das argamassas de cimento	74
Figura 6.15: Altura da ascensão capilar das argamassas de cimento.....	75
Figura 6.16: Absorção capilar das argamassas geopoliméricas	76
Figura 6.17: Altura da ascensão capilar das argamassas geopoliméricas	77
Figura 6.18: Resistência térmica das argamassas de cimento	80
Figura 6.19: Condutibilidade térmica das argamassas de cimento	81
Figura 6.20: Resistência térmica das argamassas geopoliméricas	82
Figura 6.21: Condutibilidade térmica das argamassas geopoliméricas.....	83
Figura 6.22: Comparação da resistência térmica das argamassas com ar incorporado	83
Figura 6.23: Comparação da resistência térmica das argamassas sem ar incorporado.....	84
Figura 6.24: Comparação da condutibilidade térmica das argamassas com ar incorporado	84
Figura 6.25: Comparação da condutibilidade térmica das argamassas sem ar incorporado.....	85
Figura 6.26: Termografia da fonte quente	85
Figura 6.27: Termografia das argamassas geopoliméricas.....	86
Figura 6.28: Termografia das argamassas de cimento	86
Figura 6.29: Termografia das argamassas sem ar incorporado	87

Lista de Tabelas

Tabela 2.1: Densidade e condutividade térmica de geopolímeros com 40% de quartzo [39] -----	18
Tabela 3.1: Composição química das lamas-----	23
Tabela 3.2: Densidade das lamas -----	25
Tabela 3.3: Superfície específica das lamas -----	26
Tabela 3.4: Massa para o cálculo da massa volúmica da areia 0/4 -----	32
Tabela 3.5: Composição química do silicato de sódio [1] -----	33
Tabela 3.6: Propriedades físicas da Sika-AER 5 -----	34
Tabela 3.7: Propriedades do cimento Portland -----	35
Tabela 6.1: Massa volúmica das argamassas geopoliméricas. -----	77
Tabela 6.2: Porosidade aberta das argamassas geopoliméricas-----	78
Tabela 6.3: Massa volúmica das argamassas de cimento -----	78
Tabela 6.4: Porosidade das argamassas de cimento-----	78
Tabela 6.5: Variação de temperatura das argamassas de cimento -----	79
Tabela 6.6: Resistência e condutibilidade térmica das argamassas de cimento -----	80
Tabela 6.7: Variação de temperatura das argamassas geopoliméricas -----	81
Tabela 6.8: Resistência e condutibilidade térmica das argamassas geopoliméricas-----	82
Tabela 6.9: Classificação das propriedades das argamassas endurecido (EN 998-1) -----	88
Tabela 6.10: Classificação das argamassas para revestimento (CSTB)-----	88
Tabela 6.11: Classificação das argamassas segundo a norma EN 998-1 -----	89
Tabela 6.12: Classificação das argamassas segundo CSTB-MERUC -----	90

Lista de Abreviaturas e Símbolos

A.	Argamassa
A. C.	Argamassa de cimento
A. G.	Argamassa Geopolimérica
ASTM	American Society for Testing and Materials
A/C	Razão água cimento
AG/L	Razão agregado ligante
Al	Alumínio
Al_2O_3	Óxido de alumínio
Ba	Bário
C	Coeficiente de absorção capilar
Ca	Cálcio
C-S-H	Silicatos de Cálcios Hidratados
$Ca(OH)_2$	Hidróxido de cálcio
CO_2	Dióxido de carbono
CaO	Óxido de cálcio
CSTB	Centre Scientifique et Technique du Batiment
Cu	Cobre
Cr	Cromo
E	Especificação
EN	Norma Europeia
Fe	Ferro
Fe_2O_3	Óxido de ferro
Geop.	Geopolimérica
H_2O	Água

Hg	Mercúrio
H ₃ O ⁺	Ião Hidrónio
K	Potássio
K ₂ O	Óxido de potássio
Li	Lítio
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
Mg	Magnésio
MgSO ₄	Sulfato de magnésio
MgO	Óxido de magnésio
Na	Sódio
NaCl	Cloreto de sódio
NaOH	Hidróxido de sódio
Na ₂ O	Óxido de sódio
Na ₂ SiO ₃	Silicato de sódio
Na ₄ O ₄ Si	Ortossilicato de sódio
NaSO ₄	Sulfato de sódio
NH ₄	Amónio
Ni	Níquel
NP	Norma Portuguesa
OH ⁻	Hidróxido
Pb	Chumbo
R _T	Resistência à flexão
S	Superfície específica
Si	Silício
SiO ₂	Óxido de silício

T Sup.	Temperatura superior
T Inf.	Temperatura inferior
TIV	Termografia por infra vermelhos
TiO ₂	Óxido de titânio
UBI	Universidade da Beira Interior
Zn	Zinco
Ω	Omega
Δt	Varição de tempo
ΔT	Varição de temperatura
δ	Massa volúmica
σ	Tensão de resistência à compressão

CAPITULO 1 - Introdução

1.1 - Enquadramento-----	2
1.2 - Objectivos, justificação e metodologia -----	3
1.3 - Estrutura e conteúdo do trabalho -----	4

1.1 - Enquadramento

As preocupações ambientais estão na linha da frente da sociedade actual, tentando preservar ao máximo o ambiente dos vários tipos de “ataques” que tem sido sofrido ao longo dos tempos. As emissões de gases com efeito de estufa, a desflorestação, a colocação de resíduos das minas em locais impróprios são as mais preocupantes, actualmente, a nível mundial.

Com a exploração das minas da Panasqueira, os resíduos vêm sendo acumulados de ano para ano. Com o intuito de minimizar este impacto negativo no ambiente, estão a ser feitos estudos para o seu reaproveitamento e valorização, como é este caso.

Como se sabe a produção de cimento Portland constitui uma substancial fonte de emissões de gases com efeito de estufa. Desta forma é importante conseguirem-se definir estratégias que levem a redução das emissões desses gases, como por exemplo através do desenvolvimento de novos ligantes com maior durabilidade e com um desempenho ambiental superior (Aitcim, 2000; Swamy, 2000), o caso dos ligantes obtidos por activação alcalina [1].

Os ligantes obtidos por activação alcalina também são conhecidos por serem responsável por um nível de emissões inferior ao de cimento Portland, a que deve somar ainda a uma elevada capacidade de imobilização de metais pesados, o que confere a este tipo de ligante uma mais-valia ambiental.

No entanto os ligantes por activação alcalina embora conhecidos por parte da comunidade científica há já algum tempo, não conseguiram até ao momento afirmar-se como uma alternativa ao cimento Portland, por várias razões das quais merecem destaques, custo de produção superiores e um estágio de desenvolvimento técnico que embora nalgumas áreas já apresente um nível de conhecimento bastante relevante.

Como também se sabe a temperatura necessária para a produção de geopolímero (síntese de geopolimerização) varia entre 15 a 90°C a pressão atmosfera. Fletcher Ross et al. [2] fizeram a comparação da produção de geopolímero e cimento Portland e mostraram que a produção de geopolímero necessita de menos temperatura para a produção do que cimento Portland.

De seguida apresenta-se um esquema de comparação entre o cimento Portland e o cimento geopolimérico (ver afigura 1.1).

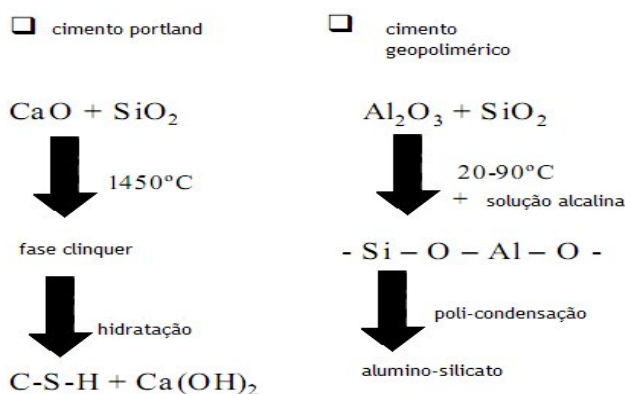


Figura 1.1: Comparação da temperatura de produção de cimento geopolímico e cimento Portland [2]

Os ligantes de activação alcalina também são conhecidos por ligantes geopoliméricas.

O termo geopolímico foi introduzido por Davidovits em 1978 para representar polímeros de origem mineral resultantes da investigação geoquímica. Esta investigação surgiu depois de várias catástrofes de incêndios em França entre 1970-73, em que se procurava novos materiais resistentes ao calor, não inflamáveis e não combustíveis (materiais plásticos) [3].

As lamas residuais das Minas da Panasqueira também se incluem neste grupo de materiais que podem ser activadas alcalinamente (Fernando Torgal, 2006), após um tratamento térmico.

O reaproveitamento das lamas residuais das Minas da Panasqueira em materiais geopoliméricos, permite por um lado diminuir o impacto ambiental negativo do seu depósito à superfície, e simultaneamente o nível de emissões de gases com efeito de estufa.

Pretende-se com este trabalho aumentar o conhecimento sobre ligantes geopoliméricas obtidos com resíduos de minas. Assim, foi desenvolvendo argamassa geopolimérica e estudar as suas propriedades, físicas e mecânicas, bem como as suas propriedades térmicas.

1.2 - Objectivos, justificação e metodologia

O objectivo principal deste trabalho é o estudo das propriedades físicas de argamassa geopolimérica, numa perspectiva de poder ser usada para melhorar o comportamento térmico de revestimento de edifícios.

Para concretizar este objectivo, foi adoptada a seguinte metodologia:

- a) Avaliação da influência da granulometria (finura);
- b) Avaliação da resistência à compressão simples e resistência à flexão;
- c) Porosidade e Massa volúmica no estado endurecido;
- d) Avaliação da absorção de água por capilaridade;

e) Avaliação da resistência e condutibilidade térmica;

Para estudar o comportamento de argamassa geopolimérica como material de construção foram realizados alguns ensaios que permitem avaliar a sua aplicação.

A composição da argamassa geopolimérica foi escolhida com base na experiência acumulada de trabalho com estes materiais na UBI (Universidade de Beira Interior) de forma a ter um material com características de boa resistência mecânica, de porosidade elevada para ter uma boa resistência térmica.

Foram ensaiadas, simultaneamente, argamassas de Cimento Portland traço 1:3 de forma a comparar os resultados da argamassa geopolimérica no contexto da tecnologia de argamassas e betões de uso corrente como são os de cimento Portland.

Para além desses factores mencionados acima houve ainda a preocupação de gastar a menor energia possível na elaboração do elemento de estudo, fazendo com isso um tratamento térmico a temperatura mais baixa possível, cura a temperatura ambiente em vez de cura em estufa a temperatura de 60°C como indica a maioria dos autores, nos estudos nesta área.

1.3 - Estrutura e conteúdo do trabalho

Este trabalho está dividido em 7 capítulos, apresentado seguidamente um resumo do conteúdo de cada capítulo.

Capítulo 1 - É feita a apresentação da tese, dando o seu enquadramento, mostrando quais os objectivos a cumprir no fim deste trabalho.

Capítulo 2 - Neste capítulo faz-se uma abordagem dos materiais geopoliméricos, fazendo uma descrição do significado do geopolímero, da sua composição química, seu desempenho e um bom resumo do estado de arte sobre geopolímeros.

Capítulo 3 - Faz-se a caracterização detalhada de cada material utilizado, para melhor perceber os resultados uma vez que estes são influenciados pelos materiais de base como o precursor, os activadores, entre outros.

Capítulo 4 - Neste capítulo é feita a descrição do modo de elaboração dos corpos de prova, utilizados no estudo experimental.

Capítulo 5 - Faz-se a descrição dos equipamentos de ensaios utilizados e a técnica de ensaios para averiguar a aplicabilidade do geopolímero para o fim desejado.

Capítulo 6 - Neste capítulo é feita a apresentação e discussão de resultados.

Capítulo 7 - Conclusões finais e investigações futuras.

CAPÍTULO 2 - Materiais Geopoliméricos

2.1 - Geopolímeros	6
2.2 - A química dos geopolímeros.....	7
2.3 - Desempenho e as suas aplicações	9
2.4 - Alguns estudos sobre materiais precursores de geopolímeros	10

2.1 - Geopolímeros

Os geopolímeros vêm sendo desenvolvidos pelo homem desde há muito tempo, apesar de ser agora considerado um novo tipo de material, pois há indícios da sua utilização pelos Romanos, Egípcios, Gregos e outros povos do Médio Oriente. Estes teriam utilizado geopolímeros largamente numa base puramente empírica como material para vários tipos de construção, vasos, recipientes em pedra, entre outra, bem como nas famosas pirâmides Egípcios e no Coliseu de Roma, são alguns exemplos de construções feitas com este material [4].

O termo geopolímero foi introduzido por Joseph Davidovits em 1979 para representar polímeros de origem mineral resultantes da investigação geoquímica. O processo de geopolimerização envolve uma reacção química que se produz num meio altamente alcalino onde certos minerais como a sílica e a alumina irão reagir criando polímeros com ligações do tipo polissialato (Si-O-Al-O) [5].

Os geopolímeros são polímeros inorgânicos, obtidos a partir da polimerização de matérias-primas naturais de origem geológica, contendo alumino-silicatos, em determinadas condições de temperatura e de pressão.

Os materiais de origem geopolimérico contêm um elevado teor de sílica e alumina que é activado por uma solução aquosa de elevada alcalinidade (activador). O mecanismo de geopolimerização (activação alcalina) consiste na dissolução, transporte ou orientação e policondensação que ocorre através de uma reacção exotérmica. O produto final é um material polimérico que se encontra num estado amorfo e possui excelentes propriedades em termos de resistência mecânica e durabilidade.

A qualidade do geopolímero depende essencialmente da natureza do material de origem. Caso sejam produtos obtidos por calcinação, como por exemplo o metacaulino (caulino calcinado), cinzas volantes ou lamas residuais, o geopolímero possuirá boas características de resistência quando comparados com outros produtos de origem não calcinados, com o caulino. O activador (substância alcalina) pode ser simples ou composto. A diferença reside no facto de se utilizar um activador constituído por uma única substância ou várias [5].

A matéria-prima para a obtenção do geopolímero é praticamente inesgotável pois os alumino-silicatos representam mais de 75% da parte sólida inorgânica da crosta terrestre, pois estes estão presentes na maioria das rochas e dos solos que resultam da desagregação física e química das rochas. Alguns alumino-silicatos são muito estáveis e a sua activação, quando possível, pode levantar alguns problemas de ordem operacional que na generalidade retiram qualquer interesse prático à sua utilização. Outros, porém, muito abundantes ainda, como as argilas, apresentam um elevado potencial de activação que justifica plenamente a sua utilização como matéria de base para a obtenção deste novo tipo de materiais [4].

A geopolimerização surge como uma via para processar e valorizar resíduos industriais aluminossilicatados, originando produtos com elevada resistência mecânica, estabilidade química e com a capacidade de confinar outros resíduos, incluindo os perigosos.

Diversos resíduos industriais como por exemplo lamas (geradas pelos processos de filtração/clarificação da água potável, e do corte e polimento de granito), areia de fundição e rejeitados do processo de fabrico de aglomerados de argila expandida, foram caracterizados, com o objectivo de os utilizar e adaptar para a produção de geopolímeros, através da activação alcalina. Desta análise concluiu-se ser conveniente usar as lamas de filtração de água e os rejeitados de argila expandida como componentes ligantes ou activos da matriz geopolimérica a formar, atendendo ao grau de finura e capacidade reactiva, enquanto que as lamas de corte de granito e a areia de fundição foram encaradas como inertes ou agregados, fino e grosso, respectivamente [6].

O processamento de geopolímeros com deferentes resíduos foi optimizado, em termos de composição relativa dos constituintes, teor relativo, composição do activador ($\text{NaOH} + \text{Na}_4\text{O}_4\text{Si}$) e condições de cura. Os geopolímeros obtidos foram caracterizados, em termos de composição, microestrutura e propriedades físico-mecânicas relevantes como indica os estudos realizados anteriormente. Quando as condições são optimizadas obtêm-se resistências à compressão superiores a 15 MPa, o que perspectiva a utilização destes materiais em funções não estruturais. Em simultâneo, a baixa densidade relativa das amostras é compatível com isolamento térmico e acústico que é superior ao de betões convencionais, a confirmar em estudos futuros. De grande interesse foi o desempenho obtido quando o produto foi submetido a testes de lixiviação, para análise da capacidade de retenção de substâncias perigosas [6].

2.2 - A química dos geopolímeros

Como foi referido anteriormente, o termo geopolímero foi introduzido por Joseph Davidovits em 1979 para representar polímeros de origem mineral resultantes da investigação geoquímica, para mostrar que se trata de polímeros inorgânicos.

Davidovits sugeriu o termo polissialatos (grande cadeia molecular constituída de silício, oxigénio e alumínio) para a designação química dos geopolímeros. O termo sialato é uma abreviação para óxido aluminossilicato, e o Polissialatos são polímeros de cadeia e anel com Si^{4+} e Al^{3+} em coordenação IV vezes com oxigénio e escala de amorfo para semi-cristalino. Ainda de acordo com este investigador os geopolímeros são constituídos por uma malha tridimensional em que os átomos de silício alternam com os de alumínio em coordenação tetraédrica, compartilhando todos os oxigénios [7].

A generalidade dos geopolímeros são baseados em aluminossilicatos (polissialatos), este termo, como foi referido, é uma abreviatura de poli - (silicato-oxo-aluminato). A rede sialato é composta por aniões tetraédrica $[\text{SiO}_4]^{4-}$ e $[\text{AlO}_4]^{5-}$, compartilhando os oxigénios dos vértices.

Como a estrutura do aluminossilicato tem carga negativa, logo há necessidade de iões positivos (Na^+ , K^+ , Li^+ , Ca^{++} , Ba^{++} , NH_4^+ , H_3O^+) estarem presente na estrutura para compensar a défice da carga negativa, isto porque o alumínio (Al^{3+}) e o silício (Si^{4+}) têm coordenação 4 com o oxigénio (O^{2-}), e estão ligados cada um a 4 átomos de oxigénio dispostos nos vértices de um tetraedro imaginário, gerando o referido défice de carga negativa (5^- no alumínio e 4^- no silício), e assim o alumínio pode ser unido a três átomos de oxigénio, com o silício em coordenação tetraédrica (após desidroxilação o alumínio passa de coordenação 6 (octaédrica) para 4 (tetraédrica)). A formula dos poli (sialatos) é a seguinte:

$$M_n (- (\text{SiO}_2)_z - \text{AlO}_2)_n, w \text{H}_2\text{O} \quad (2.1)$$

Onde M é qualquer um dos catiões (iões positivos) acima mencionados, n é o grau de polimerização, z um numero inteiro 1, 2, 3 ou superior, que determina o tipo de resultado geopolimérico, o que significa que, se z é igual a 1, a rede será um polissialato tipo, se z vale 2, a rede será um poli (sialato-siloxo), se z igual a 3, a rede será poli (sialato-disiloxo), e se z for maior que 3 a rede será “sialate link”, e w é o número de moléculas de água associadas (grau de hidratação) (ver a figura 2.1) [3,7]. A figura 2.1 ilustra os vários tipos de redes geopoliméricas.

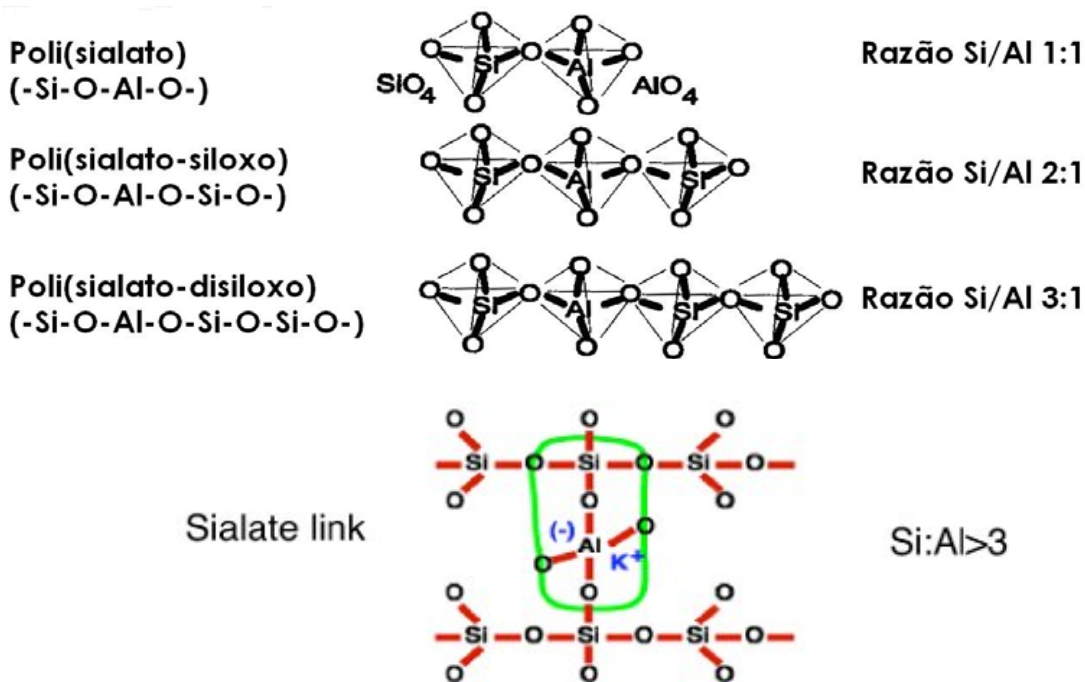


Figura 2.1: Tipos de poli (sialato) [7].

A composição química dos geopolímeros é similar à dos zeólitos embora demonstre possuir uma microestrutura amorfa. Os zeólitos são um conjunto de alumino-silicatos cristalinos hidratados de metais alcalinos. A sua estrutura química é essencialmente constituída por tetraedros de sílica e alumina ligados entre eles por iões de oxigénio. Como foi referido os zeólitos encontram-se na Natureza quando, por exemplo, existe a deposição de cinzas vulcânicas em meio líquido com elevada alcalinidade ou quando há inundações de depósitos de cinzas vulcânicas por águas

com elevada alcalinidade (água com elevado teor de sódio sob a forma de carbonato ou bicarbonato). A diferença entre estes reside no facto de a estrutura do geopolímero não ser cristalina, mas é quase totalmente amorfa, isto tem a ver com a velocidade que se dá a reacção. Nos zeólitos a reacção é lenta e em fase aquosa abundante (favorece a formação de cristais), nos geopolímeros a reacção é rápida e com a fase líquida apenas indispensável à hidratação dos vectores da reacção, por isso são praticamente amorfos. Também é importante dizer que os zeólitos formam-se em geral em sistemas higro-térmico fechados, enquanto que os geopolímeros não, este pode ser obtidos em condições normais de pressão e temperatura [5,8].

Como foi referido anteriormente o mecanismo de geopolimerização (activação alcalina) consiste na dissolução, transporte e orientação e policondensação que ocorre através de uma reacção exotérmica, (num meio altamente alcalino).

A reacção dá-se segundo uma cronologia que está mais ou menos bem identificada [4]:

- Fase de destruição/dissolução - o início dá-se com a destruição das ligações covalentes das espécies devido aos iões hidroxilo OH⁻ provenientes do activador alcalino.
- Fase de transporte e orientação - com a destruição da estrutura química de partida, forma-se uma “sopa” de iões que são sujeitos, em face das suas cargas, os processos de orientação e transporte em que a fase líquida assume particular importância.
- Fase de policondensação - nesta fase começam a formar-se pequenos núcleos de coagulação que rapidamente evoluem para processos de precipitação massiva de gel, que rapidamente endurece, ainda que limitados em extensão e espacialmente desorganizados. Por este motivo, a estrutura final é essencialmente amorfa.

2.3 - Desempenho e as suas aplicações

Os geopolímeros têm um grande potencial para constituir a base de desenvolvimento sustentável de materiais e produtos com propriedades físico-químicas, mecânicas e térmicas superiores ao cimento Portland.

Estes materiais podem ser aplicados em vários sectores, tais como na indústria automóvel, mecânica, naval e principalmente na construção civil [7]. A aplicação de materiais geopoliméricas na construção civil tem vindo a ser a prática comum, uma vez que traz muitas vantagens. Pode ser aplicado para resistência ao fogo, produtos cerâmicos, confinamentos de estruturas e também pode ser utilizado em estruturas que estão sujeitas a ataques de ácidos.

Os materiais geopoliméricos apresentam bons desempenhos na construção tais como [9]:

- Adesão ao betão fresco e substratos antigos, aço, vidro, cerâmicas;
- Alta resistência à compressão e boa resistência à abrasão;

- Baixa retração e baixa condutividade térmica;
- Cura rápida e controlável;
- Elevado nível de resistência a certos ácidos;
- Protecção do aço de reforço devido ao elevado pH residual;
- Reduz significativamente as emissões de gases com efeito de estufa (dióxido de carbono) em relação a produção de cimento Portland;
- Boa resistência ao fogo (< 1000°C) sem emissão de gases tóxicos quando aquecido;

2.4 Alguns estudos sobre materiais precursores de geopolímeros

Apresentam-se seguidamente alguns estudos sobre os seguintes materiais precursores de geopolímeros:

- Metacaulino
- Cinzas volantes
- Lamas residuais
- Escórias de alto-forno

Pavel Rovnanik (2010) [10], estudou o efeito da temperatura e do tempo de cura no desenvolvimento da resistência mecânica de geopolímeros a base de metacaulino, analisando a microestrutura das argamassas por meio de microporosímetro de mercúrio. Concluiu que:

- A temperatura e o tempo de cura têm um papel importante fundamentalmente na definição e endurecimento das argamassas. As argamassas curadas a temperatura elevadas atingiram a definição e endurecimento em apenas 4 horas, enquanto que as argamassas curadas a 10°C demoraram 4 dias.
- A resistência mecânica das argamassas curadas a elevadas temperaturas atingiu os valores máximos em apenas 24 horas, mas com uma diminuição aos 28 dias. E este efeito só é significativo por um tempo de cura superior a 1 hora.
- Os tamanhos dos poros diminuem com o tempo em ambas as situações de cura. As argamassas curadas a temperaturas elevadas apresentaram um maior volume de poros e logo menor resistência mecânica final.

Peter Duxson et al. (2006) [11], estudaram o efeito da razão Si/Al e de diferentes tipos de metais alcalinos na condutividade térmica de geopolímeros à base de metacaulino. No estudo utilizaram

um modelo matemático (hashin-shtrikman) para determinar a condutividade térmica e a primeira aproximação da interconetividade do gel geopolimérico. Chegaram as seguintes conclusões:

- A condutividade térmica aumenta com o aumento da razão Si/Al (aumento na ordem de $\text{Na} > \text{NaK} > \text{K}$). Os geopolímeros com solução alcalina sódio apresentam um maior aumento da condutividade térmica em relação aos outros, e quando curados a 50% de humidade relativa e com o aumento razão Si/Al de 1.15 para 2.15 apresentam um ganho de mais de 50%. Os restantes geopolímeros também apresentam ganhos mas em menor proporção, estes resultados deve-se ao baixo calor específico do potássio em relação a sódio. A condutividade térmica do metacaulino foi aproximadamente de $0.8 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$.
- A interconetividade do gel geopolimérico também aumenta com a razão Si/Al e com o teor de sódio.

Na investigação realizada por Xiaolu Guo et al. (2010) [12], sobre a resistência à compressão e as características da microestrutura de geopolímeros derivados de cinzas volantes de classe C, utilizando como activadores hidróxido de sódio e silicato de sódio, calculadas em relação a massa de Na_2O e do precursor (5 a 15%). A cura dos geopolímeros foram feitas em duas condições distintas, uma no forno com a temperatura a variar entre 60 e 90 °C, durante 4, 8 e 24 horas, e a outra a temperatura ambiente (23 °C) durante 3, 7 e 28 dias. Obteram a maior resistência para os geopolímeros curados a temperatura de 75 °C durante 8 horas e depois a 23 °C durante 28 dias, para uma razão $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O} = 1.5$, e esta resistência à compressão pode ser aumentada, aumentando a concentração de Na_2O até 10%. Quanto a microestrutura dos geopolímeros verificaram os principais picos FTIR em 1036 e 1400 cm^{-1} , atribuídos ao estiramento assimétrico das ligações Al-O/Si-O e a banda Si-O-Si-O/Si-O-Al em 747 cm^{-1} .

Peter Duxson et al. (2006) [13], estudaram a evolução térmica de geopolímeros derivados de metacaulino, tendo em foco a sua evolução física (parte 1), utilizando como activadores sódio (Na), potássio (K) e a mistura de sódio e potássio (NaK), e a razão Si/Al a variar entre 1.15 a 2.15. A evolução física dos geopolímeros foi caracterizada em 4 regiões: Região 1 - caracterizada pela grande perda de peso (resistência estrutural); Região 2 - início da retracção (100 °C) até a evaporação da água livre (300 °C) (desidratação); Região 3 - perda de peso gradual e retracção de desidroxilação; Região 4 - início da densificação por sinterização viscosa. Os geopolímeros com razão Si/Al < 1.40 apresentaram microestruturas com grandes poros, e os geopolímeros com Si/Al ≥ 1.65 sem tratamento térmico apresentaram microestruturas mais homogéneas, mas quando aquecidos apresentaram pequenos poros e pequenas fissuras que aumentaram com o aumento da temperatura. A retracção térmica dos geopolímeros na região 2 resultou do aumento da tensão capilar, na ordem seguinte $\text{Na} > \text{NaK} > \text{K}$, e a extensão da retracção aumenta ligeiramente com o aumento da razão Si/Al. A região 3 (desidroxilação) apresenta retracção térmica semelhante para ambos geopolímeros, concluindo que o catião alcalino não desempenha

um papel significativo na extensão da retracção do gel durante a desidroxilação. Na região 4 a retracção térmica durante a densificação aumenta com a razão Si/Al e com a taxa de aquecimento para todos os geopolímeros.

No estudo realizado por Maurice Guerrieri et al. (2010) [14], sobre o comportamento de geopolímeros derivados de cinzas volantes e escoras de alto-forno quando exposto a alta temperatura (800°C), as amostras foram curadas a uma temperatura de 80°C e 95% de humidade relativa durante 24 horas, e depois arrefecidos até a temperatura ambiente e posteriormente exposto a temperatura de 800°C. Concluíram o seguinte:

- Quando exposto a 800°C a resistência à compressão residual é influenciada pela resistência inicial, e as amostras com menores resistências iniciais apresentaram maiores resistências residuais depois da exposição a 800°C, ganhando quase 90% da força residual. Quanto as amostras com resistências iniciais elevadas apresentaram uma perda de 70 a 90% da resistência residual depois de expostos a temperatura de 800°C.
- A maior resistência inicial está associada a menor ductilidade, o que indica que estas amostras têm uma menor capacidade de permitir a incompatibilidade térmica entre o interior e o exterior devido às temperaturas irregulares durante o aquecimento.

J. W. Phair et al. (2002) [15], estudaram a caracterização de geopolímeros derivados de cinzas volantes activados com aluminato de sódio, analisando as propriedades de cinzas e aluminato de sódio e os seus efeitos no produto final. Utilizaram hidróxido de sódio e hidróxido de potássio para determinar a coordenação atómica do alumínio, concluindo que quando as cinzas volantes são dissolvidas em hidróxido de sódio, o alumínio apresenta coordenação 6, e quando dissolvidas em hidróxido de potássio apresenta coordenação 4. O aluminato de sódio pode ter coordenação 4 ou 6 dependendo da razão [OH]/[Al], mas a coordenação 6 tem um efeito mais significativo sobre as propriedades da matriz geopolimérica.

No estudo feito por J. Temuujin et al. (2009) [16], sobre o efeito da activação mecânica das cinzas volantes nas propriedades dos geopolímeros curados a temperatura ambiente, verificaram que a activação mecânica das cinzas volantes não provoca alterações significativas na mineralogia, mas esse efeito (moagem) aumenta cerca de 80% a resistência à compressão em relação as cinzas volantes sem activação mecânica. A moagem das cinzas volantes levaram a uma maior dissolução das partículas, e com isso aumenta a sua reactividade e a configuração. A alta concentração de hidróxido de sódio, também aumenta a dissolução das partículas e consequentemente o aumento da geopolymerização.

Jixing Xie et al. (2009) [17], estudaram geopolímeros a base de escoras de alto-forno, cinzas volantes e metacaulino, concluíram que as propriedades dos geopolímeros (resistência à compressão e a imobilização de metais pesados) são afectadas pela solução alcalina. O teste de

lixiviação realizado indica que os geopolímeros a base de cinzas volantes e escoras de alto-forno elaboradas em condições ótimas podem imobilizar metais pesados como Pb, Cu, Cr e Ni.

Na investigação feita por A. Fernandez-Jimenez et al. (2007) [18], sobre a durabilidade das cinzas volantes alcali-activadas em soluções agressivas (água do mar, sulfato de sódio e soluções ácidas), verificaram que as amostras imersas nestas soluções não sofrerem qualquer ataque químico ao longo do tempo, e sem deterioração significativamente visível. Após 1 ano as amostras imersas em sulfato de sódio apresentaram cristais de sulfato de sódio em cinzas não reagidas, e as amostras imersas em água do mar apresentaram algumas alterações mas sem efeito significativo na resistência à compressão e os íons de sódio (Na) foram substituídas por íons de Mg, formando microestruturas ligeiramente mais porosa. Em meios ácidos perda de massa e uma diminuição de resistência.

William D. A. Rickard et al. (2010) [19], estudaram o papel de óxido de ferro e quartzo nas características térmicas dos geopolímeros à base de cinzas volantes de classe F, e concluíram que a presença de óxido de ferro em grande quantidade nas cinzas tem um efeito significativo na expansão térmica, alterando a composição de fase, morfologia e aumento do peso após o aquecimento, reduzindo o desempenho térmico. As cinzas ricas em quartzo não apresentam redução significativa no desempenho térmico.

No estudo realizado por Tatiana Bakharev et al. (1999) [20], sobre cimento à base de activação alcalina de escoras de alto-forno, concluíram que o tratamento térmico teve um efeito significativo no desenvolvimento da resistência inicial das pastas. Em baixa concentração da solução alcalina a resistência à compressão foi alta, e em alta concentração apresenta resistência final alta. A solução alcalina com alta percentagem de silicato de sódio leva a um aumento da taxa de retracção das pastas, e com isso microfissuras e diminuição da trabalhabilidade.

Jadambaa Temuujin et al. (2009) [21], estudaram o efeito da razão Si/Al na força de adesão de geopolímeros a base de metacaulino em substratos metálicos. As amostras foram curadas a 70 °C durante 24 horas, e identificadas segundo a razão Si/Al. MK1 - amostra com razão Si/Al = 1; MK2 - com Si/Al = 2 e MK2.5 com Si/Al = 2.5. As amostras MK1 depois de curadas apresentaram microestruturas cristalinas, enquanto que MK2 e MK2.5 amorfas. A resistência à adesão é fortemente afectada pela composição química, com MK1 e MK2 apresentaram resistência equivalente a frágeis, e MK2.5 superior a 3 MPa. A partir da observação MEV, concluíram que a força de adesão do MK2.5 é física e não química.

No estudo realizado por Guangren Qian et al. (2003) [22], sobre a imobilização de mercúrio (Hg) e zinco (Zn) na matriz de escoras alcali-activadas, concluíram que a baixa concentração (0,5%) de Hg e Zn afectam de forma ligeira a resistência a compressão, a estrutura dos poros e a hidratação da matriz. O aumento da concentração de mercúrio para 2%, teve um efeito negativo sobre a resistência inicial mas sem nenhum efeito para idades a partir dos 7 dias, para 2% de Zn

a hidratação retardou-se e os valores de lixiviação ainda depois dos 28 dias apresentavam valores superiores ao limite. O encapsulamento físico e a fixação química desempenharam um papel importante na imobilização do Hg, enquanto que para o Zn só a fixação química poderá ser o mecanismo de imobilização.

Frantisek Skavára et al. [23], estudaram as propriedades de betão geopolimérico derivado de cinzas volantes, e em alguns casos com adições de escoras de alto-forno, gesso, calcário etc.. As amostras foram curadas de duas formas, uma a temperatura ambiente e 40% de humidade relativa e outra em soluções de cloreto (NaCl), $MgSO_4$, e $NaSO_4$. Estudaram as seguintes propriedades do betão geopolimérico: reologia, evolução da resistência, interface agregado - pasta e a durabilidade. Verificaram que as propriedades reológicas do betão geopolimérico dependem do teor de cinzas volantes presente na mistura, apresentando boa aderência no estado fresco e com quantidade de poros razoável na estrutura, mas não acessíveis a água. A porosidade das cinzas sem adições é cerca de 50% independentemente da condição de preparação, e as amostras com cinzas + escoras é cerca de 10%, mas esta porosidade é diminuída na presença de Ca. A evolução da resistência tende a aumentar a partir do segundo dia de cura, dependendo da composição e condição de preparação. A relação resistência à compressão versus resistência à tracção é de 10:5.5, maior que o cimento Portland. Não há nenhuma zona de transição tanto morfologicamente ou directa da composição e nem corrosão, mas na presença de cloreto aumentou cerca de 3% a massa e aumento da resistência. Não houve perda de massa devido ao ciclo gelo/degelo, mas com isso perde cerca de 70% da sua resistência após 150 ciclos, e quando exposto a alta temperatura apresenta uma rotura dúctil.

No estudo realizado por Peter Duxson et al. (2007) [24] sobre o efeito da composição alcalina e da razão Si/Al no desenvolvimento das propriedades mecânicas de geopolímeros à base de metacaulino, verificaram que resistência inicial das amostras activadas com solução alcalina sódio são superiores para a razão Si/Al igual a 1.15 e 2.15, enquanto que as amostras activadas com potássio a resistência é superior para valores intermédios a estes. Após 28 dias, as amostras activadas com sódio e potássio apresentam resistência à compressão altas para baixa razão de Si/Al, e para a composição alcalina mista (sódio-potássio) apresenta valores de resistência oposta, com aumento cerca de 30% para $Si/Al \geq 1.9$. O módulo de Young aumenta para $Si/Al \leq 1.65$, mas diminui com alto teor de potássio. Depois dos 28 dias o módulo de Young apresenta valores máximos para as amostras activadas com sódio e potássio para razão $Si/Al \leq 1.4$, para solução alcalina mista apresenta valores mínimos, e valores superiores para $Si/Al \geq 1.65$. Entre 7 e os 28 dias o módulo de Young depende da solução alcalina, diminuindo na presença de sódio em baixa razão Si/Al e aumenta em alta razão Si/Al, enquanto que na presença de potássio acontece o contrário, e para a solução mista a razão Si/Al não tem efeito significativo.

Peter Duxson et al. (2007) [25], estudaram a evolução física de geopolímeros derivados de metacaulino aquecido até 1000°C, analisando o efeito da razão Si/Al na retracção térmica e as características da perda de peso nos geopolímeros. A retracção térmica é tanto aumentado ou

diminuída por mudança da taxa de aquecimento constante nas regiões diferentes. Região 1 - perda de peso por evaporação de água livre e a retracção a diminuir ligeiramente com a taxa de aquecimento; Região 2 - retracção inicial (diminui com a taxa de aquecimento) e continuada perda rápida de peso; Região 3 - perda gradual de peso e retracção, semelhantes para todas as razões de Si/Al; Região 4 - densificação por sinterização, retracção rápida, aumentando com a taxa de aquecimento e com o aumento de Si/Al. A retracção final e a densidade nominal após aquecimento até 1000°C aumentam com Si/Al, sendo as características de perda de peso idênticas para as razões de Si/Al, com 80% de perda de peso em temperatura inferior a 300°C.

Na investigação feita por T. W. Cheng et al. (2003) [26], sobre a resistência ao fogo de geopolímeros derivados de escoras granulares de alto-forno, utilizando como solução alcalina o silicato de sódio e hidróxido de potássio. Verificaram que as propriedades físicas e mecânicas dos geopolímeros dependem da composição química no sistema (precursor, solução alcalina e adições). A definição, tempo de fixação e a resistência dependem da concentração da solução alcalina, tempo e temperatura de cura. O desempenho da resistência ao fogo e a resistência à compressão podem ser melhoradas de forma significativa com o aumento da concentração de hidróxido de potássio e a adição de metacaulinite, enquanto que o aumento de silicato de sódio tem o efeito contrario, porque o excesso de silicato não deixa a água sair da estrutura, aumentando a porosidade e diminuindo a densidade.

Alexandre Vargas et al. (2007) [27], estudaram o comportamento da resistência à compressão de geopolímeros derivados de cinzas volantes ao longo do tempo. Utilizaram como solução alcalina o NaOH e Ca(OH)_2 e os corpos de provas foram curados de duas formas, uma na estufa a 70°C durante 12 horas e posteriormente a temperatura constante de 22°C, outra a 70°C até a data dos ensaios. A resistência a compressão diminui a partir dos 7 dias para todos os casos de cura, mas mais acentuada para o segundo caso, devido a presença de Na_2O que provoca reacções deletérias na matriz no estado endurecido. Os corpos de provas sem NaOH apresentaram resistência crescente ao longo do tempo mas com valores inferiores. Foram identificadas 3 morfologia na pasta, uma por uma região com aspecto massivo, outra com partículas de cinzas volantes solubilizadas e a outra com a formação de produtos em formas de cristais aciculares.

No estudo realizado por Suresh Thokchom et al. (2009) [28], sobre a durabilidade de geopolímeros a base de cinzas volantes, verificaram que os geopolímeros expostos a ácido sulfúrico não apresentaram qualquer mudança perceptível de cor, mas ficaram ligeiramente amarelados em ácido nítrico. Após expostos a 10% dos ácidos permaneceram estruturalmente intactas, mas com superfície mais suave, e com a deteriorização ao longo do tempo, porém mais difícil de quantificar visualmente. A perda de peso de 3 a 12 semanas era de 10% em ácido sulfúrico, aumentando com o aumento do teor de Na_2O , enquanto que em ácido nítrico a perda de peso foi inferior. As amostras com baixo teor de Na_2O apresentam grande perda de resistência inicial e perde a alcalinidade mais rápida, e para as amostras com grande teor de Na_2O com efeito contrário.

No estudo realizado por Fernando Torgal et al. (2005) [29], sobre a influência do tempo e temperatura de calcinação na reactividade das lamas residuais, verificaram que a calcinação (tratamento térmico) das lamas aumenta a sua reactividade. A calcinação abaixo dos 750°C não tem efeito significativo na reactividade, mas a partir dos 800°C até os 1000°C o efeito é mais significativo para um período de exposição de aproximadamente 2 horas, com a máxima a 950°C durante 2 horas.

Fernando Torgal et al. (2007) [30], estudaram as propriedades físicas e mecânicas de ligantes obtidos por activação alcalina de lamas residuais, e concluíram que:

- A trabalhabilidade das argamassas é impossível ser quantificada através do ensaio de flow table devido a alta viscosidade do silicato de sódio, ficando o material no lateral do cone. Nem o uso de superplastificante aumentou a trabalhabilidade, mas diminuiu a viscosidade, enquanto que a adição de água extra aumenta a trabalhabilidade, mas deve ser mantida a razão atômica H_2O/Na_2O para não perder a resistência.
- Os resultados de tempo de presa não eram ótimos, porque estes diferem de forma significativa dos valores de tempo de presa do ligante com crescente incorporação de agregados.
- Os níveis de retração das argamassas são inferiores aos do cimento Portland e outros ligantes alcalinos, variando entre 97 a 250×10^{-6} .
- Apresentam valores de resistência à flexão superiores a cimento Portland, mas com alguma perda de resistência a partir dos 14 dias de cura. A resistência à flexão das argamassas depende do tamanho do agregado e da razão atômica H_2O/Na_2O .

A investigação feita por Fernando Torgal et al. (2008) [31], sobre a influência da concentração de hidróxido de sódio e da substituição de uma percentagem de lamas por hidróxido de cálcio na resistência à compressão de argamassas geopoliméricas à base de lamas residuais, concluíram que a resistência à compressão das argamassas é fortemente condicionada pela concentração de hidróxido de sódio, pela percentagem de substituição de lamas por hidróxido de cálcio e pela razão molar H_2O/Na_2O . A percentagem de substituição da lama que leva a maior resistência à compressão foi de 10%, e para valores superiores a este a resistência diminui a partir dos 14 dias. A resistência à compressão aumenta de forma significativa com a diminuição da razão molar H_2O/Na_2O e com o aumento da concentração de hidróxido de sódio.

Fernando Torgal et al. (2007) [32], estudaram a influência dos agregados na resistência e na microestrutura das argamassas activadas alcalinamente (geopoliméricas), tendo utilizado agregados de xisto, de granito e de calcário. Verificaram que os agregados parecem ser reactivos quimicamente em contacto com a solução alcalina, mostrando um desempenho quase catalisador e aumentando a ligação pasta agregado. Quando aumenta a quantidade dos agregados, a resistência não difere de forma significativa até aos 7 dias para os diferentes tipos de agregados,

mas a partir desta data a resistência cresce de forma diferente para diferente razão agregado ligante (AG/L). A microestrutura das argamassas não mostra géis característicos de reacção alcali-silica, e a zona de interface pasta-agregado dos diferentes tipos de composições foram caracterizadas por zonas densas e uniformes.

Na investigação sobre ligantes obtidos por activação alcalina de lamas residuais feita por Fernando Torgal et al. (2007) [33], analisando a durabilidade e possibilidade de contaminação ambiental destes ligantes, chegaram a conclusão que estes ligantes apresentam uma boa resistência ao desgaste por abrasão com perda de massa inferior a 25%, melhor resultado que cimento Portland (40 a 60% de perda de massa), e a maior resistência foi obtida na pasta, contrário do cimento Portland. Os ligantes apresentaram alta resistência ao ataque ácida, com excepção das argamassas com agregados calcários expostos nas soluções ácidas sulfúrico e nítrico, quanto a contaminação ambiental os resultados indicaram valores superiores ao limite para água de consumo e valores inferiores ao limite para água de rega, indicando uma perigosidade quase insignificante para o ambiente.

No estudo realizado por Suresh Thokchom et al. (2009) [34], sobre o efeito da absorção de água, porosidade aparente e sorvidade (absorver e dissolver água por capilaridade) de água na durabilidade de argamassas geopoliméricas à base de cinzas volantes de classe F, utilizando 10% de solução ácido sulfúrico durante 24 semanas. A durabilidade das amostras foi analisada com base na resistência a compressão. Verificaram que as amostras com baixo teor alcalino apresentaram maior absorção de água, porosidade e sorvidade de água, que conduz uma menor resistência à compressão residual após a exposição em ácido sulfúrico, e as amostras com menor porosidade, absorção de água e sorvidade apresenta melhores resultados após a exposição em ácido sulfúrico.

F. G. Collins et al. (1999) [35], estudaram as propriedades mecânicas e a trabalhabilidade de betão geopolimérico à base de escoras alcali activadas, tendo verificado que o uso de silicato de sódio em pó como activador alcalina diminui a perda de slump (consistência), superior a 2 horas, enquanto que o uso de silicato de sódio líquido leva a uma considerável diminuição da trabalhabilidade inicial e perda de slump significativo. As resistências obtidas após um dia de cura foram semelhantes ao do cimento Portland, mas superiores em idades posteriores, apresentando também maior retracção por secagem, baixa elasticidade e maior fluência reduzindo o risco de fissura devido a retracção por secagem.

Na investigação feita por Apha Sathonsaowphak et al. (2009) [36], sobre o efeito da finura, razão alcalino/cinzas, razão silicato de sódio/hidróxido de sódio, concentração de hidróxido de sódio, adição de água e superplastificante na trabalhabilidade e resistência de argamassa geopolimérica à base de cinzas volantes, tendo chegado as seguintes conclusões:

- A resistência e a trabalhabilidade podem ser melhoradas com o aumento da finura das cinzas volantes.

- A maior razão alcalina/cinzas leva um aumento de trabalhabilidade da mistura, mas decresce com aumento da razão silicato de sódio/hidróxido de sódio e concentração de hidróxido de sódio.
- A adição de água aumenta substancialmente a trabalhabilidade e diminui um pouco a resistência, enquanto que a adição de superplastificante não foi eficaz no melhoramento da trabalhabilidade.

No estudo realizado por P. Chindaprasirt et al. (2007) [37], sobre a trabalhabilidade e resistência de argamassas geopoliméricas à base de cinzas volantes com elevado % de cálcio, concluindo que a trabalhabilidade depende da razão silicato/hidróxido de sódio e concentração de hidróxido de sódio, diminuindo com o aumento destes. A adição de água e superplastificante melhora a trabalhabilidade, mas com maior efeito para a adição de água, enquanto que a resistência aumenta com a cura até 3 dias de cura a 60°C, e para tempo de cura superior, as argamassas apresentaram um decréscimo de resistência.

Kiyoshi Okada et al. (2009) [38], estudaram as propriedades da retenção de água em geopolímeros porosos à base de metacaulino para o uso em aplicações de refrigeração. Concluíram que as propriedades físicas e mecânicas são afectadas pela razão H_2O/Al_2O_3 , onde o aumento desta razão leva a um aumento da absorção de água e volume de poros, diminuindo a densidade e a resistência mecânica. A retenção de água depende do tamanho dos poros, quanto maior for maior será a taxa de libertação de água (menor retenção).

Na investigação realizado por Subaer et al. (2007) [39] sobre a caracterização termo - mecânica e da microestrutura de geopolímeros à base de sódio poli (sialate silixoso). Concluíram que a temperatura abaixo de 250°C leva a uma retracção de 2% devido a perda de água, e estável a temperatura entre 250°C e 800°C, todavia com a adição de agregados (granítico ou quartzo) a retracção reduz para 1%. A resistência mecânica depende da razão Si/Al e da Na/Al, e a condutividade térmica dos geopolímeros com diferentes densidades foram semelhantes ao do cimento Portland, enquanto que a microestrutura indica uma mistura com partículas não solúveis de metacaulinite. Apresenta-se no quadro seguinte os resultados obtidos.

Tabela 2.1: Densidade e condutividade térmica de geopolímeros com 40% de quartzo [39]

Amostra	Densidade (g cm ⁻³)	Condutividade térmica (W m ⁻¹ K ⁻¹)
(Si:Al = 1.5, Na:Al = 0.6)	1.68 (0.09)	0.65 (0.04)
(Si:Al = 1.5, Na:Al = 0.8)	1.62 (0.05)	0.64 (0.03)
(Si:Al = 2.0, Na:Al = 1.0)	1.43 (0.01)	0.55 (0.03)
(Si:Al = 1.5, Na:Al = 0.6)	1.89 (0.02)	0.91(0.07)

No estudo realizado por Gasca-Tirado J. Ramóm et al. (2011) [40], sobre o efeito da porosidade na luz absorvida, reemitida e transmitida por geopolímeros à base de metacaulino, verificaram que a fracção da luz transmitida depende da temperatura de cura, comprimento de onda e

tamanho dos poros. Quanto maior for o comprimento de onda menor e a luz transmitida pela amostra, mas o principal factor que modifica a quantidade de luz transmitida são os macroporos gerados na síntese. As amostras curadas a 90°C apresentaram uma maior quantidade de luz transmitida entre 250 a 570 µm, quando comparado com as amostras curadas a 40 e 60°C, com um desempenho muito elevado de luz visível até essa faixa ou ultravioletas.

Kiyoshi Okada et al. (2009) [41], estudaram as propriedades de ascensão capilar de geopolímeros porosos preparadas por método de intrusão, usando ácido polilático. Neste estudo utilizaram fibras para formar poros, que depois foram retiradas por combinação de tratamento alcalino com pH=13 e tratamento térmico a 330°C. Concluíram que as propriedades físicas são afectadas de forma significativa pela razão molar H₂O/Al₂O₃, com melhores resultados de resistência à flexão e densidade para baixa razão. A ascensão capilar aumenta com o aumento do volume das fibras e dos diâmetros destes.

CAPÍTULO 3 - Materiais e Procedimentos utilizados

3.1 - Considerações gerais	21
3.2 - Caracterização dos materiais utilizados	21
3.2.1 - Lamas residuais das Minas da Panasqueira	21
3.2.1.1 - Origem, obtenção e transporte da lama residual	21
3.2.1.2 - Composição química	23
3.2.1.3 - Tratamento térmico	23
3.2.1.4 - Moagem	24
3.2.1.5 - Densidade	25
3.2.1.6 - Superfície específica	25
3.2.1.7 - Análise granulométrica laser	26
3.2.1.8 - Análise de microestrutura	28
3.2.2 - Areia	31
3.2.2.1 - Origem, obtenção e transporte da areia	31
3.2.2.2 - Análise granulométrica	31
3.2.2.3 - Massa volúmica	32
3.2.3 - Silicato de sódio	32
3.2.4 - Hidróxido de sódio	33
3.2.5 - SIKA AER 5	33
3.2.5.1 - Descrição e características gerais	33
3.2.5.2 - Propriedades físicas	34
3.2.5.3 - Dosagem e modo de utilização	34
3.2.6 - Cimento portland (CEMII/B-L32,5N)	34
3.2.6.1 - Composição	34
3.2.6.2 - Propriedades	35

3.1 - Considerações gerais

Para elaboração/realização da argamassa com material geopolimérico, fez-se a caracterização dos materiais utilizados, que é fundamental para uma melhor interpretação dos resultados obtidos nos ensaios.

Para a caracterização dos materiais constituintes da argamassa geopolimérica, Adaptaram-se procedimentos e técnicas para uma boa caracterização; isto foi feito com base em estudos e trabalhos desenvolvidos anteriormente. Foi dada grande importância ao conhecimento das propriedades físicas, mecânicas e térmica.

3.2 - Caracterização dos materiais utilizados

3.2.1 - Lamas residuais das Minas da Panasqueira

3.2.1.1 - Origem, obtenção e transporte da lama residual

A origem das lamas residuais, como anteriormente dito, vem da exploração das Minas da Panasqueira para a produção de concentrado de volfrâmio e cassiteritas. As minas situam-se nos contrafortes sul da Serra da Estrela entre os maciços de S. Pedro do Açor e da Gardunha, a poente da depressão da Cova da Beira (ver a figura 3.1) [1].



a)



b)



c)

Figura 3.1: a), b) e c) Vistas das escombeiras das Minas da Panasqueira [42].

O aspecto das lamas é apresentado na figura 3.2.



Figura 3.2: Recipientes contendo lama no seu estado natural.

3.2.1.2 - Composição química

A composição química das lamas residuais das minas da Panasqueira, consiste essencialmente em sílica, alumina, com elevados teores de ferro e de potássio, no qual de acordo com Xu et al. é um dos elementos que contribui de forma significativa para a resistência à compressão dos ligantes do tipo geopolimérico.

No quadro seguinte apresenta-se a composição química de duas amostras de lamas, determinada por EDX (energia dispersiva de raio-X), no centro de óptica da UBI.

Tabela 3.1: Composição química das lamas.

	Amostra 1 (natural)	Amostra 2 (calcinado)
Na ₂ O	0,64	0,44
MgO	4,93	1,80
Al ₂ O ₃	16,28	14,42
SiO ₂	49,33	49,66
SO ₃	8,93	4,70
K ₂ O	4,38	4,44
CaO	0,83	0,97
TiO ₂	1,00	1,13
Fe ₂ O ₃	13,67	22,44

3.2.1.3 - Tratamento térmico

As lamas residuais foram tratadas termicamente com vista a obter um aumento da sua reactividade por via da sua desidroxilação estrutural. O tratamento térmico teve lugar durante 2h num forno estático (mufla) previamente aquecido até à temperatura de calcinação de 800°C. Foram usadas amostras com uma massa aproximadamente de 560 g colocadas num recipiente de aço refractário, de forma que a sua espessura no tabuleiro não excedesse 1 cm para uma

calcinação homogénea. Depois da calcinação durante 2h as lamas são bruscamente arrefecidas à temperatura ambiente.

Trabalhos recentes indicaram que a temperatura de calcinação estaria entre 750°C a 1050°C. Na calcinação abaixo dos 750°C não foi verificado praticamente qualquer influência na resistência à compressão das argamassas activadas alcalinamente, o que significa que para este nível de temperatura não há qualquer aumento da reactividade das lamas. Aumentando a temperatura para 800°C notou-se alguma reactividade das lamas apenas, no entanto, para um tempo de exposição muito elevado, a partir de 2h. A calcinação entre 850°C e 900°C, provoca resistências à compressão similares, mas inferiores à obtida para 950°C durante 2 horas, onde se nota efectivamente uma alteração substancial na reactividade do material. No entanto, apesar do tratamento térmico das lamas residuais para temperaturas de 950°C durante 2 horas pode aumentar substancialmente a resistência à compressão aos 28 dias, devido a um processo de desidroxilação que confere á moscovite características reactivas pelo aumento do seu carácter amorfo. O aumento da temperatura acima dos 950°C não conduz ao aumento da resistência das argamassas [29].

Neste estudo, optou-se pela temperatura de calcinação de 800°C, durante 2 horas, uma vez que não era objectivo principal obter resistências à compressão tão elevadas, e pretendia também estudar o efeito de moagem na reactividade das lamas, para uma temperatura de calcinação baixa.

3.2.1.4 - Moagem

A moagem foi feita com o moinho de bolas que é um equipamento eficaz para moagem fina de pós. Este é utilizado para moagem de vários tipos de minerais e outros materiais. Os moinhos de bolas são também utilizados para fabrico de materiais de construção, para indústria química.

Existem dois métodos de utilização deste tipo de equipamento, a moagem em ambiente húmido e a moagem a seco, tendo-se optado pelo segundo. Na utilização deste tipo de moagem, o material a moer é carregado na cuba de moagem revestida a Neoprene, que contém as bolas de moagem, que moem e promovem a mistura do produto em pó fino após um período de várias horas. Obviamente que quanto maior for o tempo de duração do ciclo de moagem mais fino será o produto final. O tamanho médio final das partículas moídas depende da dureza do material a moer e do tempo de moagem. Segundo o J. Temuujin et al. [16], a moagem aumenta a solubilidade das partículas e com isso, o aumento da reactividade e configuração.

No caso em estudo foi realizado a moagem durante 6h, tendo-se decidido produzir lamas calcinadas, para serem utilizadas como precursores em diferentes condições:

- Lama desagregada (D)
- Lama desagregada calcinada (DC)

- Lama desagregada calcinada moída (DCM)
- Lama desagregada moída (DM)
- Lama desagregada moída calcinada (DMC)
- Lama peneirada #125 μm (P)
- Lama peneirada #125 μm calcinada (PC)

3.2.1.5 - Densidade

A densidade foi determinada a partir de um equipamento de ensaio de picnómetro de hélio da marca Micromeritics. O ensaio consiste na medição da variação de pressão do hélio em um volume calibrado, determinando o volume de amostra em estudo. A densidade é determinada de forma automática para uma determinada massa de amostra.

De seguida apresenta-se a tabela de resultados (3.2) da densidade, que variam entre 2,8547 a 3,2566 g/cm^3 e com um valor médio de 3,022729.

Tabela 3.2: Densidade das lamas.

Ident. da amostra	Densidade [g/cm^3]	Desvio padrão
D	3,0311	-0,0064
DM	3,0157	0,0202
P	3,2566	0,0133
DC	2,9498	0,0233
PC	2,9953	0,0096
DMC	2,8547	0,0106
DCM	3,0559	0,0245

3.2.1.6 - Superfície específica

Para a determinação da superfície específica utilizou-se o permeabilímetro de Blaine, e foi determinada de acordo com a norma NP EN 196-6 [43]. O ensaio consiste na determinação do tempo que leva um volume conhecido de ar a atravessar uma camada de pó (lama residual previamente tratada) compactada, de dimensões específicas e porosidade. O valor da superfície específica é obtido por comparação com o tempo que o ar atravessa uma camada compactada de cimento padrão, ensaiada nas mesmas condições do material em estudo.

De seguida apresenta-se a tabela de resultados (3.3) da superfície específica.

Tabela 3.3: Superfície específica das lamas.

Ident. Amostra	S (20 °C) [cm ² /g]	Tempo (s)
D	2417,0000	28,2386
DM	3127,2857	42,3614
P	1749,8571	17,1057
DC	2117,0000	20,5250
PC	1777,0000	14,5100
DMC	2565,5714	29,0868
DCM	3083,5714	46,9907

Dos resultados obtidos verificou-se que as lamas DM e DCM apresentam a maior superfície específica, muito próximo do cimento Portland.

3.2.1.7 - Análise granulométrica laser

Fez-se a análise granulométrica laser à lama residual de diferentes estados: tratada termicamente, no seu estado natural desagregada, no seu estado natural peneirada, etc.

O equipamento utilizado para as análises de distribuição de tamanho de partículas foi Beckman Coulter, modelo LS 200. O LS é baseado nas duas teorias de espalhamento de luz: Franhofer e Mie. O LS200 pode medir tamanhos de partículas na faixa de 0.375 µm a 2000 µm em um simples escaneamento usando 92 canais de detecção (ver a figura 3.3).



Figura 3.3: Coulter LS 200.

Neste estudo determinou-se a distribuição do tamanho das partículas das lamas, desagregadas, moídas, peneiradas, moídas calcinadas etc.

Nas figuras 3.4, 3.5 e 3.6 apresenta-se os gráficos da variação de volume em função do diâmetro das partículas.

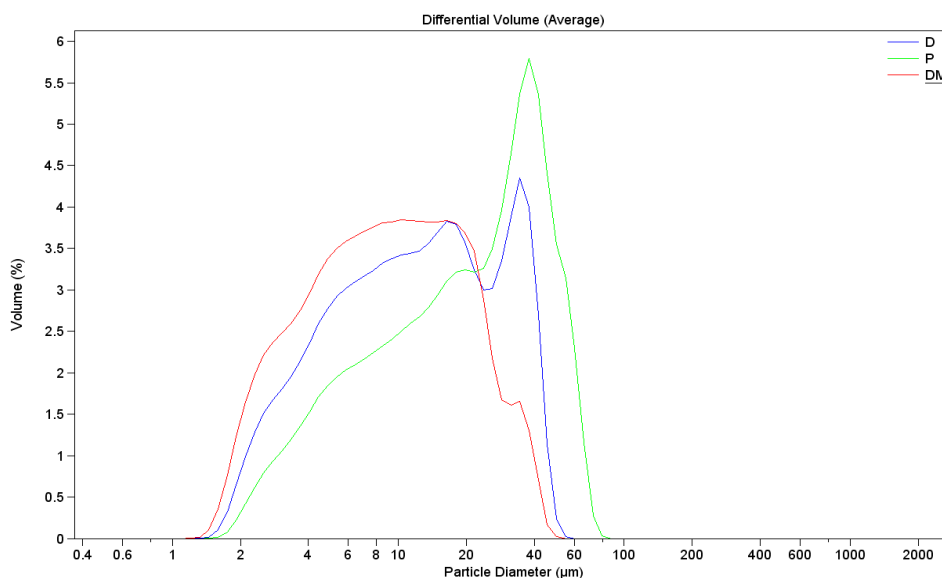


Figura 3.4: Análise da granulometria da lama natural (D, P e DM).

Com este gráfico pode-se concluir que a DM apresenta uma distribuição de partículas menores e mais uniforme, do que as restantes, P e D. A distribuição de partículas da lama P apresenta-se muito irregular, o que significa que o tamanho das partículas varia muito e apresenta partículas com diâmetro superiores as restantes.

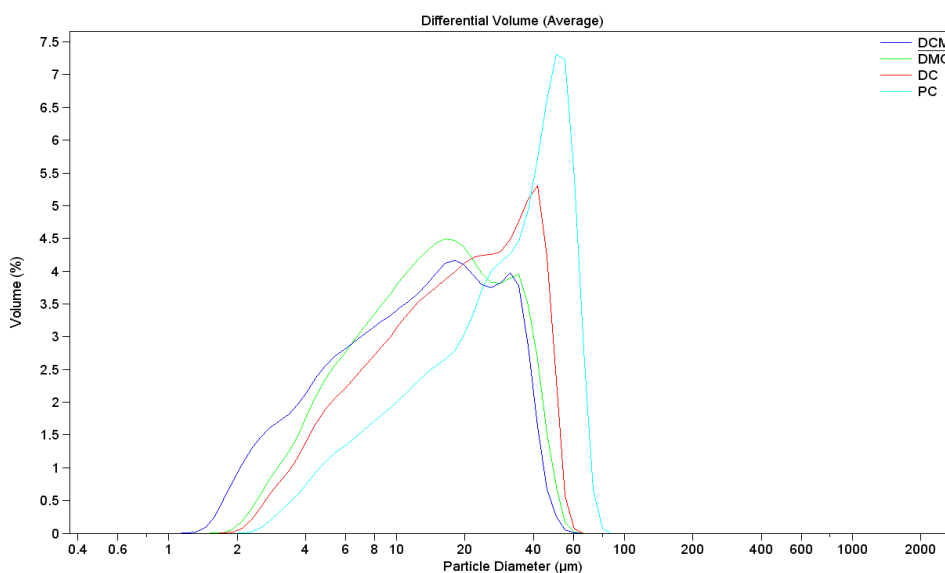


Figura 3.5: Análise da granulometria da lama tratado termicamente.

Na figura 3.5 pode-se observar que a distribuição de partículas da lama peneirada calcinada (PC) continua muito irregular e com diâmetro das partículas superiores em relação às outras. A lama DC tem uma distribuição granulométrica um pouco diferente da DCM e DMC, apresenta-se um pico mais acentuado e as partículas com diâmetro superior.

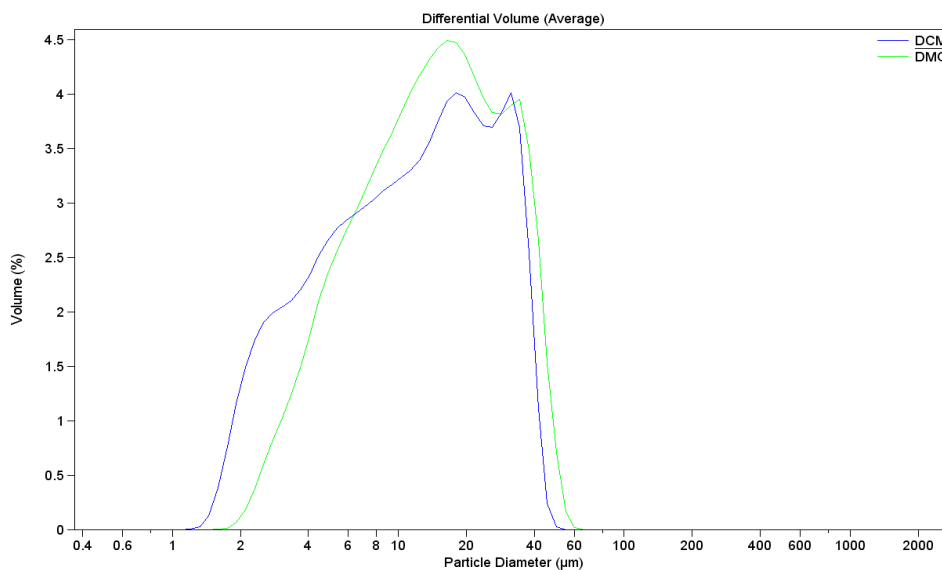


Figura 3.6: Curvas granulométrica da DCM e DMC.

Assim, da análise da figura 3.6, verifica-se que as distribuições granulométricas estão muito próximas umas das outras, mas a única diferença reside no facto que a curva do DCM apresenta partículas com menores diâmetros. Logo, este processo de preparação de lamas é o mais adequado para o objectivo deste trabalho.

3.2.1.8 - Análise da microestrutura

Como complemento do estudo da caracterização das lamas com diferentes tratamentos, D, DC, DM, DCM, DMC, P e PC, fez-se um estudo de microestrutura, a seguir apresentado.

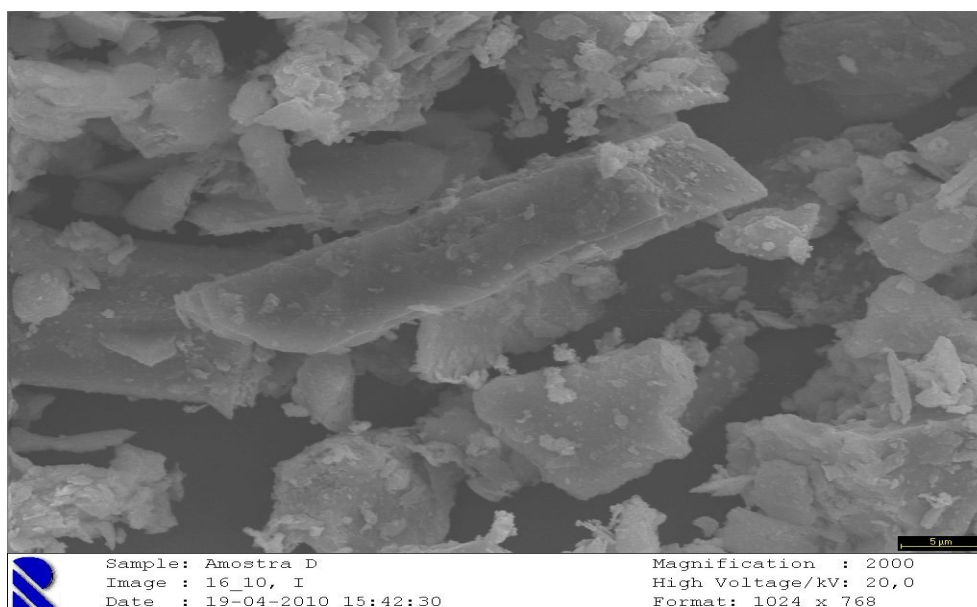


Figura 3.7: Imagem microscópica da lama desagregada (D).

Como se pode observar na imagem microscópica a lama residual desagregada (D) (figura 3.7) apresenta partículas com formas alongadas e outras com formas mais arredondadas, muito irregular em termos de formas.

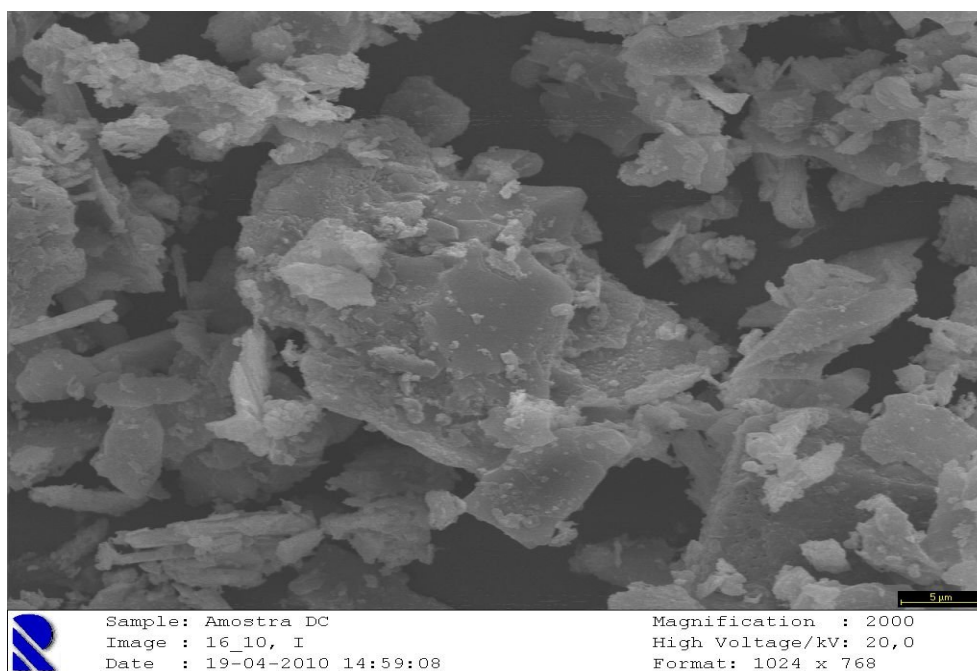


Figura 3.8: Imagem microscópica da lama desagregada calcinada (DC).

Nesta imagem da figura 3.8 pode-se verificar que quando calcinada as partículas aglutinam-se, ficando por isso, maiores.

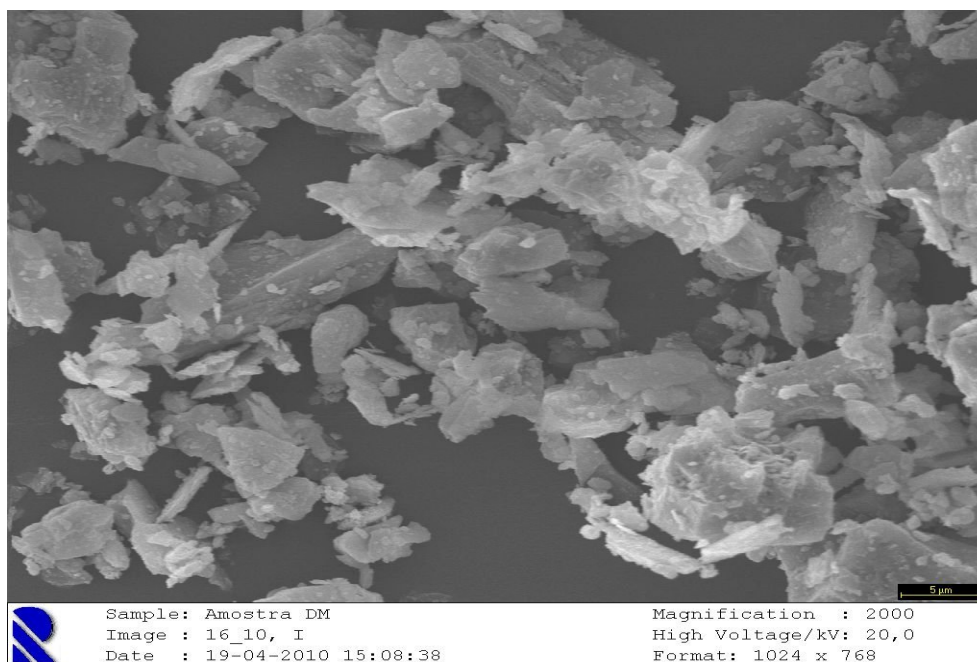


Figura 3.9: Imagem microscópica da lama desagregada moída (DM).

A imagem da figura 3.9 mostra que depois de moída as partículas da lama ficam mais arredondadas e com diâmetros menores (mais uniforme em termos de tamanhos).

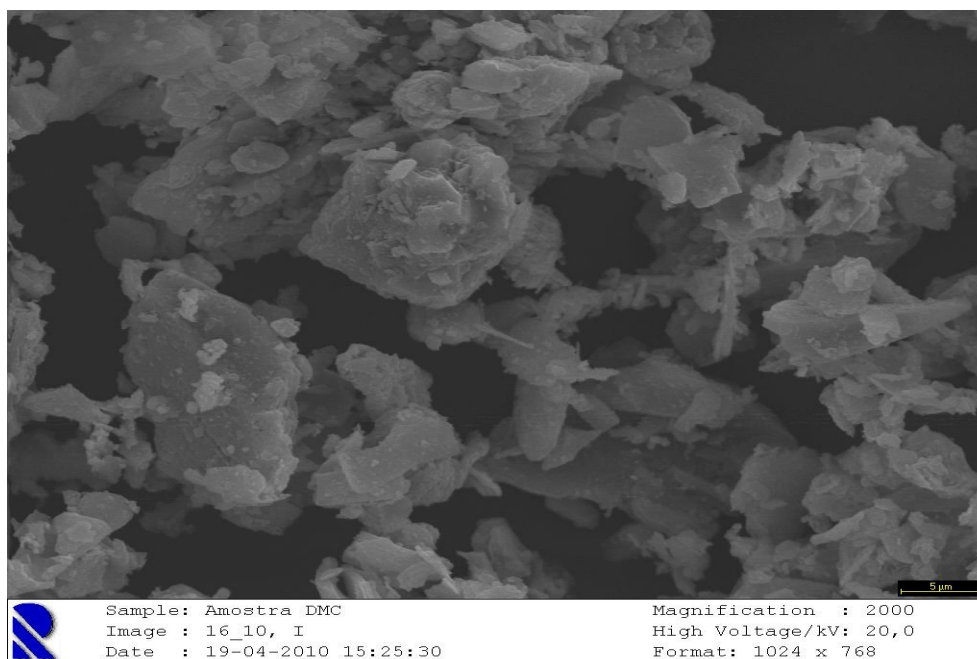


Figura 3.10: Imagem microscópica da lama desagregada moída calcinada (DMC).

Pode-se verificar que quando moída e posteriormente calcinadas as partículas voltam a aglutinar, mas apresentam diferenças em relação a DC, havendo partículas de diâmetros menores e mais arredondadas (ver a figura 3.10).

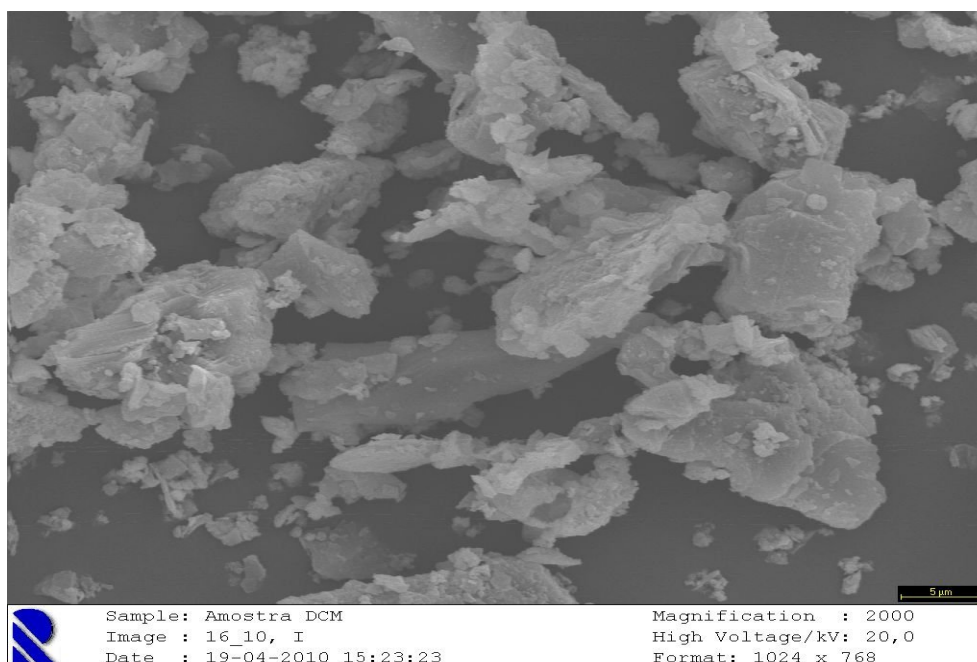


Figura 3.11: Imagem microscópica da lama desagregada calcinada moída (DCM).

A lama desagregada calcinada (DC) apresenta partículas com uma forma mais alongada e aglutinadas, porém depois de moída as partículas dispersam-se, ficam com diâmetros menores e consequentemente mais uniformes em termos de tamanho e forma.

Este estudo da microestrutura, confirma que do processo de desagregação-calcinação-moagem resultam lamas mais finas, com maior densidade e superfície específica e, por isso, com maior potencial para a reacção de activação alcalina.

3.2.2 - Areia

3.2.2.1 - Origem, obtenção e transporte da areia

A areia utilizada (areia 0/4), é uma areia natural rolada proveniente do rio Tejo, recolhida na zona de Abrantes e foi cedida pela empresa de betão pronto (Betão Liz, localizada no Parque Industrial do Canhoso - Covilhã).

3.2.2.2 - Análise granulométrica

A análise granulométrica foi efectuada de acordo com a especificação do LNEC E245 - 1971 (inertes para argamassas e betões) [44]. Determinam-se as percentagens de agregado, retidas e passadas, em cada peneiro, bem como a máxima dimensão e o módulo de finura do agregado. O processo empregue na análise granulométrica consistiu na peneiração a seco do agregado.

A peneiração foi efectuada através da série de peneiros ASTM [45], com 20 cm de diâmetro, previamente limpos, constituída pela série normal e pela série secundária. Para evitar o entupimento dos peneiros, cumpriu-se o estipulado na especificação no que diz respeito às quantidades máximas de material retido em cada peneiro.

Recorreu-se à vibração mecânica (figura 3.12) tendo o cuidado de, nos peneiros de abertura 25,4 mm e superior, ajeitar manualmente a posição das partículas, permitindo, desta forma, a sua passagem através da malha.



Figura 3.12: Vibração mecânica na análise granulométrica.

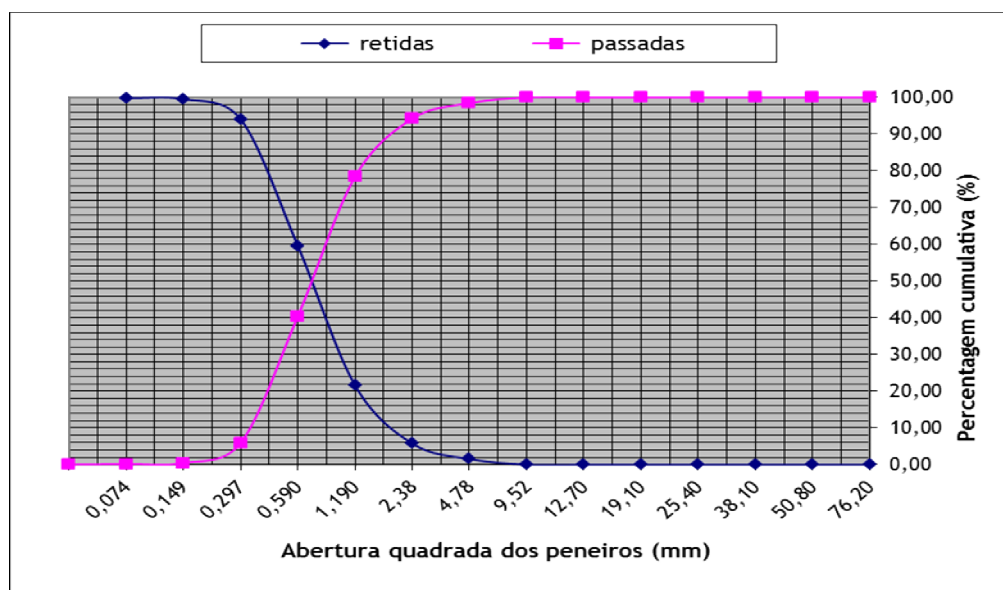


Figura 3.13: Curva granulométrica da areia.

3.2.2.3 - Massa volúmica

A massa volúmica foi determinada de acordo com a norma NP-954 [46]. A areia foi seca em estufa a 105°C, durante 24 horas, para obter a massa seca, de seguida foi emersa na água durante 24h. Depois determina-se a massa saturada, para isso é necessário retirar a água superficial com secador. De seguida apresenta-se os resultados obtidos.

Tabela 3.4: Massa para o cálculo da massa volúmica da areia 0/4.

M1 - Massa do provete saturado com a superfície seca (*)	M1 = 500,0 [g]
M2 - Massa do densímetro + provete + água (até ao traço de ref.)	M2 = 980,0 [g]
M3 - Massa do densímetro + água (até ao traço de referência)	M3 = 671,9 [g]

$$\delta = \frac{M1}{M1 + M3 - M2} \times 1000 \quad \Rightarrow \quad \delta = 2610 \text{ [Kg/m}^3\text{]} \quad (3.1)$$

(*) - Para um densímetro de 500 ml a massa da amostra deverá ser de aproximadamente de 500 g

3.2.3 - Silicato de sódio

A utilização deste activador é devido ao facto da maioria dos materiais de partida não terem sílica reactiva em quantidade suficiente (Xu & Deventer, 2000), o que acontece com o material de partida usado neste trabalho. Esse facto foi constatado por Fernando Torgal (tese doutoramento, 2006) nos estudos feitos sobre análise da reactividade de várias composições, usando as lamas residuais das Minas da Panasqueira, logo tornou-se indispensável o uso deste activador para a composição das misturas.

Obtém-se o silicato de sódio a partir da fusão da areia siliciosa (SiO_2) com carbonato de sódio ou de potássio (Na_2CO_3 ou K_2CO_3) a 1100°C - 1200°C . O vidro resultante é dissolvido com vapor de alta pressão formando um líquido transparente viscoso. Também pode ser obtido a partir de carbonato de sódio e dióxido de silício, com libertação de dióxido de carbono. No quadro seguinte apresenta-se a composição química do silicato de sódio

Tabela 3.5: Composição química do silicato de sódio [1].

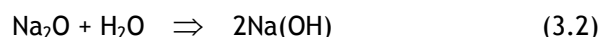
SiO_2	Na_2O	Al_2O_3
273 - 283 [g/kg]	82 - 86 [g/kg]	4 [g/kg]

3.2.4 - Hidróxido de sódio

O hidróxido de sódio para além da dissolução dos alúmino-silicatos pelo aumento do pH, também compensa a carga eléctrica dos aluminatos.

A utilização deste hidróxido com a combinação do silicato de sódio, forma um activador alcalino mais eficaz de acordo com a literatura.

O hidróxido de sódio foi dissolvido antes da sua utilização devido ao seu carácter fortemente exotérmico. Para o cálculo da quantidade de óxido de sódio para cada solução utilizou-se a seguinte equação:



A solução de hidróxido de sódio (NaOH) de concentração 10 M utilizada foi preparada dissolvendo 205,12 g de NaOH (97,5% de pureza) em 500 ml de água destilada.

3.2.5 - SIKA AER 5

Neste trabalho utilizou-se um adjuvante introdutor de ar para aumentar a porosidade das argamassas e facilitar a mistura, com objectivo de aumentar a resistência térmica das argamassas.

3.2.5.1 - Descrição e características gerais

Sika-AER 5 é um adjuvante introdutor de ar que permite aumentar a quantidade de ar ocluído no betão, sob a forma de bolhas finas, muito estáveis e uniformemente repartidos no betão. As bolhas de ar, de diâmetro inferior ao dos grãos de cimento e de areia mais fina, actuam como finos deformáveis e melhoram as propriedades reológicas do betão fresco:

- Aumentar a trabalhabilidade
- Conferindo um melhor aspecto após a desmoldagem

Também o Sika-AER 5 limita o efeito da capilaridade ou da sucção capilar no betão endurecido, bloqueando a penetração dos líquidos ao nível de bolha de ar. Com a diminuição da capilaridade aumenta a durabilidade do betão quando submetido aos ciclos de gelo-degelo.

O Sika-AER 5 está de acordo com a especificação do LNEC E 374 [47].

3.2.5.2 - Propriedades físicas

As propriedades físicas estão apresentadas na tabela 3.6.

Tabela 3.6: Propriedades físicas da Sika-AER 5

Aspecto	Líquido castanho
Massa volúmica (23 ± 2 °C)	$1,03 \pm 0,02$ Kg/dm ³
pH (23 ± 2 °C)	$11,0 \pm 1,0$
Teor de cloretos	< 0,10 %
Teor de sólidos	$7,1 \pm 0,4$ %

3.2.5.3 - Dosagem e modo de utilização

A dosagem do Sika-AER 5 foi de acordo com as recomendações do fabricante, utilizando uma percentagem de 0,1 a 0,7 do peso do cimento, ou então 0,1 a 1,2 litros para cada 100 kg de cimento, segundo a quantidade de ar desejada. A dosagem ideal segundo o fabricante deve ser determinada por ensaios caso a caso.

A utilização deste adjuvante deve ser feita de acordo com especificação da LNEC E 374 [47], ou seja, introduzir Sika AER 5 na água de amassadura antes de este ir para a mistura.

3.2.6 - Cimento Portland (CEMII/B-L32,5N)

3.2.6.1 - Composição

O cimento Portland utilizado tem a seguinte composição média: 65% a 79% Clínquer Portland, 21% a 35% Calcário e 0% a 5% de outros Constituintes segundo o fabricante (SECIL).

3.2.6.2 - Propriedades

As propriedades estão apresentadas na tabela 3.7.

Tabela 3.7: a); b); e c) Propriedades do cimento Portland

a)

Propriedades químicas		
Propriedades	Método de ensaio	Valor especificado
Teor de sulfato em (SO ₃)	NP EN 196-2	≤ 3,5 %
Teor de cloretos	NP EN 196-21	≤ 0,10 %

b)

Propriedades físicas		
Propriedades	Método de ensaio	Valor especificado
Princípio de presa	NP EN 196-3	≥ 75 min
Expansibilidade	NP EN 196-3	≤ 10 mm

c)

Propriedades mecânicas			
Resistências aos primeiros dias		Resistência de referência	Método de ensaio
2 dias	7 dias	28 dias	NP EN 196-1
--	≥ 16 [MPa]	≥ 32,5 e ≤ 52,5 [MPa]	

CAPÍTULO 4 - Elaboração do elemento de estudo

4.1 - Introdução	37
4.2 - Elaboração do elemento de estudo	37
4.2.1 - Dimensões e formas.....	37
4.2.2 - Preparação dos materiais e moldes	37
4.2.2.1 - Preparação dos moldes	37
4.2.2.2 - Composição da mistura	38
4.2.2.3 - Pesagem e dosagem dos constituintes.....	39
4.2.3 - Elaboração dos corpos de prova	40
4.2.3.1 - Elaboração da mistura	40
4.2.3.2 - Trabalhabilidade.....	42
4.2.3.3 - Colocação e compactação	43
4.2.3.4 - Cura	44
4.2.3.5 - Provetes de ensaio térmico.....	45

4.1 - Introdução

Inicialmente, neste trabalho fizeram-se protótipos para poder acertar as condições óptimas de elaboração da argamassa geopolimérica. Os estudos focaram-se sobre o precursor (lama residual das Minas da Panasqueira), tipos de activadores alcalinos (silicato de sódio e hidróxido de sódio), introdutor de ar (SIKA AER 5), a reactividade e a resistência física-mecânica. Os protótipos iniciais foram executados de acordo com a experiência adquirida com outros trabalhos de outros autores.

Para a verificação da reactividade e ganho de resistência da argamassa geopolimérica foram realizados ensaios de compressão partindo os cubos a diferentes idades e a temperatura ambiente.

4.2 - Elaboração do elemento de estudo

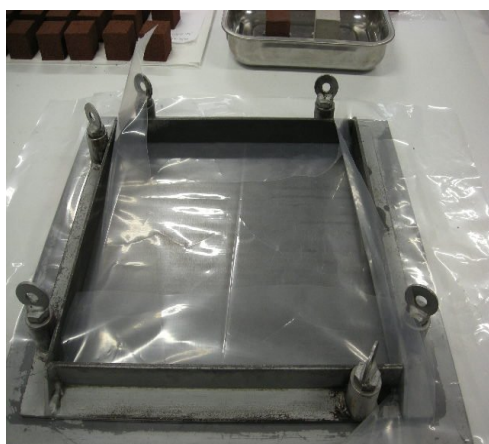
4.2.1 - Dimensões e formas

Os protótipos foram elaborados de acordo com as dimensões dos moldes já existentes nos laboratórios de construção e durabilidade da UBI. As dimensões dos provetes para o ensaio térmico, compressão e tracção são respectivamente as seguintes: $300 \times 300 \times 30 \text{ mm}^3$, $40 \times 40 \times 40 \text{ mm}^3$ e $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$.

4.2.2 - Preparação dos materiais e moldes

4.2.2.1 - Preparação dos moldes

Na preparação dos moldes houve o cuidado de evitar o contacto do geopolímero com os moldes metálicos (ver figura 4.1).



a)



b)



c)

Figura 4.1: Preparação dos moldes - a) Molde para ensaio térmica; b) Molde para ensaio à compressão; c) Molde para o ensaio à tracção.

Como pode-se ver na figura 4.1 - a) e c) os moldes foram revestidos com película plástica para impedir o contacto da argamassa geopolimérica com a superfície metálica, (uma vez que o geopolímero é um bom aderente a metais, e assim o corpo de prova não sofrer qualquer dano na desmoldagem).

4.2.2.2 - Composição da mistura

A composição foi obtida com a ajuda do software Alkal. Na figura 4.2 apresenta-se as dosagens dos constituintes da mistura.

AlkalSoft, Metodologia da Composição da Activação Alcalina

Opções Ajuda

DADOS: Na4O4SiNaOH: Valor Fixo 4 Intervalo
 Min. Max. Incr...

Precursor Na4O4Si: Valor Fixo 5 Intervalo
 Min. Max. Incr...

Composição Química do Precursor (% mássica)
 % de Na2O: 1.14
 % de SiO2: 68.54
 % de Al2O3: 18.24

Notação:
 NaOH - Hidróxido de Sódio
 Na4O4Si - Silicato de Sódio
 r(SiH) - Razão Silicato/Hidróxido

Concentração de NaOH: 10 M Massa do Precursor (g): 750

RESULTADOS INTERMÉDIOS:

Densidade das Concentrações (g/cm3): 1.3242 NaOH da Sol. do NaOH (g): 11.197653 Massa de Óxido de Sódio do NaOH: 8.677551

Percentagem Mássica (%): 29.860407 Nº moles em H2O da solução: 1.4612416 Nº moles de NaOH: 0.28001133

Solução de NaOH (g): 37.5 Nº moles de H2O do NaOH: 0.14000566 Nº moles Totais de Água da Mistura: 1.6012473

H2O na Solução (g): 70.139595 Nº moles de Na2O do NaOH: 0.14000566 Massa de Água da Mistura: 28.822453

H2O da Sol. do NaOH (g): 26.30235

DOSAGEM PARA MISTURA:

Massa de Precursor (g): 750 + Massa de Na4O4Si (g): 150.0 + Volume da solução NaOH (ml): r(SiH) Volume

4.0 28.318985

Composição Química

	Na2O(%)	SiO2(%)	Al2O3(%)	H2O(%)
Precursor	8.55	514.05	136.8	---
NaSiO3	12.9	41.7	0.6	94.8
NaOH	8.677551	---	---	28.822453
Total	30.127552	555.75	137.40001	123.62746

Razões Molares

r(SiH)	Na2O/SiO2	Na2O/Al2O3	SiO2/Al2O3	H2O/Na2O
4.0	0.05255754	0.36070764	6.8631	14.129038

Figura 4.2: Determinação da dosagem dos constituintes da mistura.

4.2.2.3 - Pesagem e dosagem dos constituintes

A pesagem dos constituintes foram feitas de acordo com as dimensões dos moldes, para isso determina-se a quantidade de precursor e areia a utilizar. Depois de saber a quantidade de precursor a utilizar, determinou-se a quantidade de silicato de sódio e hidróxido de sódio para uma determinada razão precursor/activador, utilizando o programa de cálculo ALKAL desenvolvido para o efeito.

A dosagem dos activadores foi obtida utilizando este método. Com o software Alkal basta introduzir a quantidade de precursor necessária para a mistura, obtendo-se a quantidade de cada um dos activadores (silicato de sódio em gramas e hidróxido de sódio em mililitros) para uma determinada razão precursor/activador (ilustrado na figura 4.2). As quantidades dos activadores calculados pelo programa, pode vir a ser ajustados durante a mistura, tendo em conta a absorção do precursor e da areia utilizada, nomeadamente em relação à quantidade de água. Este ajuste pode ser feito com a adição da água ou então com activadores (o mais aconselhável), e esta adição deve ser equivalente à absorção da areia e do precursor, uma vez que de acordo com a literatura a adição da água em excesso diminui a resistência mecânica dos geopolímeros. Na figura 4.3 apresenta-se a pesagem dos constituintes.



a)



b)



c)

Figura 4.3: Pesagem dos constituintes - a) Pesagem do silicato de sódio;
b) Pesagem do precursor; c) Pesagem da areia.

4.2.3 - Elaboração dos corpos de prova

4.2.3.1 - Elaboração da mistura

O programa de cálculo utilizado para o calcular as quantidades dos activadores alcalinos, tem limitações, pois não tem em conta a finura do precursor para o cálculo dos activadores alcalinos, mas só a quantidade de precursor. Ora quanto mais fino é um material maior a quantidade de água necessária para molhar a sua superfície e, conseqüentemente, manter uma boa trabalhabilidade. Verificou-se durante a elaboração dos corpos de prova que a quantidade dos activadores alcalinos não chegaram para a quantidade de precursor mais a areia, para se poderem misturar, quando estes apresentavam um índice de finura muito elevado. Neste caso foi preciso adicionar 20% de água na mistura para melhorar a trabalhabilidade, e mesmo com essa adição de água não foi possível ter uma mistura fluida, ficando-se muito seca. Assim foi feita então uma nova mistura onde foi adicionada uma percentagem de activadores (10%), para além dos calculados, para ter em conta o efeito da absorção da areia e precursor; mais 10% de água em relação a massa do precursor e mais 0,5% de introdutor. Tendo-se conseguido uma boa trabalhabilidade nestas condições. No entanto de acordo com a literatura a adição da água na mistura diminui a resistência mecânica do geopolímero, o que não foi verificado qualquer interferência na resistência. Foi feito também o estudo de aumentar a granulometria da areia e manter a finura do precursor. Neste caso não foi preciso adicionar tanta quantidade de activadores e água (5% de cada) mais 0,5% de introdutor de ar para obter uma boa trabalhabilidade e resistência mecânica um pouco superiores. Assim adoptou-se esta última mistura, uma vez que se consegue aumentar ligeiramente a resistência mecânica e a trabalhabilidade. Verificou-se também que com a diminuição da adição de 10% activadores para

5%, reduz-se a ocorrência de esflorescência devido ao excesso de activadores alcalino quanto em contacta com a humidade (água).

De início fez-se a mistura dos activadores até estes ficarem homogeneamente misturados, durante aproximadamente 5 minutos, antes de adicionar o precursor e a areia. O processo de mistura prossegue até se obter uma argamassa homogénea, durante mais cerca de mais 5 minutos. De seguida apresenta-se a sequência da elaboração da mistura (ver figura 4.4).



a)



b)



c)



d)



e)



f)

Figura 4.4: Elaboração da mistura - a) Adição de hidróxido de sódio;
b) Mistura de silicato de sódio e hidróxido de sódio; c) Mistura de precursor e a areia;
d) Mistura inicial; e) Adição de água + introdução de ar; f) Argamassa final.

4.2.3.2 - Trabalhabilidade

A trabalhabilidade com argamassa geopolimérica em geral é baixa. Neste caso foi preciso fazer alguns ajustes para melhorar a trabalhabilidade, como foi referido anteriormente. Para melhorar um pouco a trabalhabilidade adicionou-se aproximadamente 5% de água extra. A consistência da argamassa foi determinada de acordo com a norma EN 1015 - 3 [48].



a)



b)

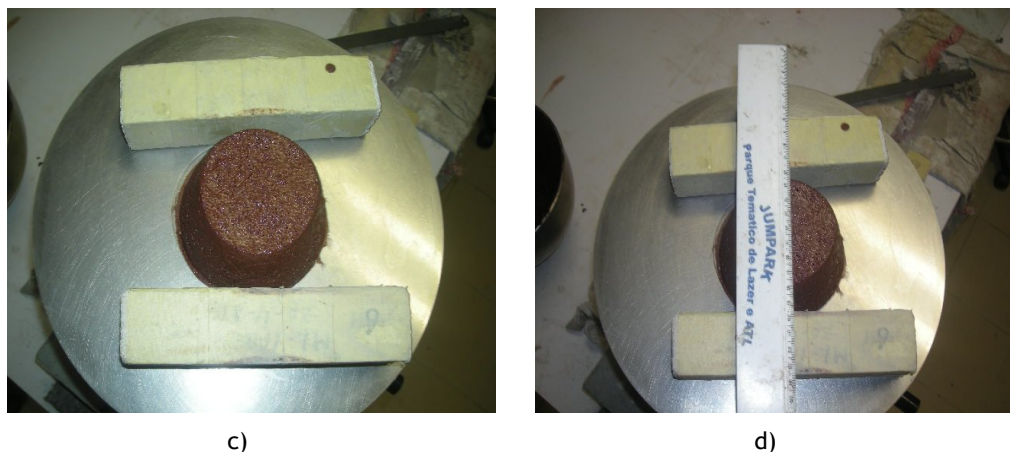


Figura 4.5: Medição da trabalhabilidade da argamassa geopolimérica com ar através do teste flow table:
a) Enchimento do cone e compactação do mesmo; b) Levantamento do cone;
c) e d) Medição do diâmetro após 15 pancadas.

Como pode-se notar na figura 4.5, a argamassa geopolimérica com ar é muito consistente, logo uma baixa trabalhabilidade. Esta elevada consistência tem haver com a composição alcalina utilizado, principalmente o silicato de sódio que é muito viscoso, diminuindo a trabalhabilidade e aumentando a consistência da argamassa geopolimérica [35, 36, 37]. O diâmetro médio foi 100,4 mm após 15 pancadas, praticamente não há fluidez da argamassa. Não foi feito o ensaio para a argamassa geopolimérica sem ar porque esta apresenta visivelmente menor trabalhabilidade (menos fluido) durante a mistura.

4.2.3.3 - Colocação e compactação

A colocação da argamassa geopolimérica e compactação dos provetes foi feita de forma rápida sem perda de tempo logo após a conclusão da mistura. A compactação dos provetes foram feitos com auxílio de um martelo e uma placa acrílico, como mostra a figura 4.6.



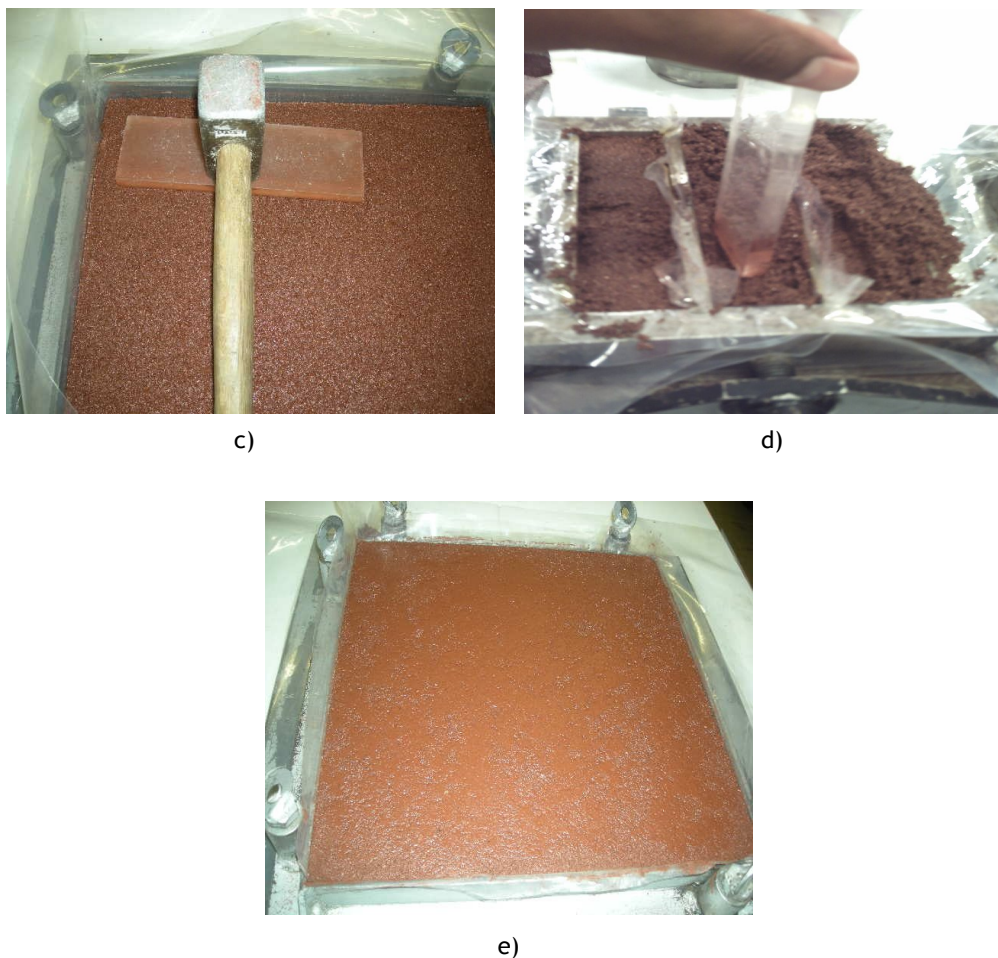


Figura 4.6: Colocação e compactação das argamassas geopoliméricas - a) Colocação;
b) e c) Compactação do provete de ensaio térmico; d) Compactação de provete de ensaio à flexão;
e) Aspecto final depois de compactado do provete para o ensaio térmico.

4.2.3.4 - Cura

A cura foi feita a temperatura e humidade ambiente aproximadamente 20°C e 60% de humidade relativa. De seguida apresenta-se as imagens dos provetes na fase de cura e na fase final, pronto para o ensaio.

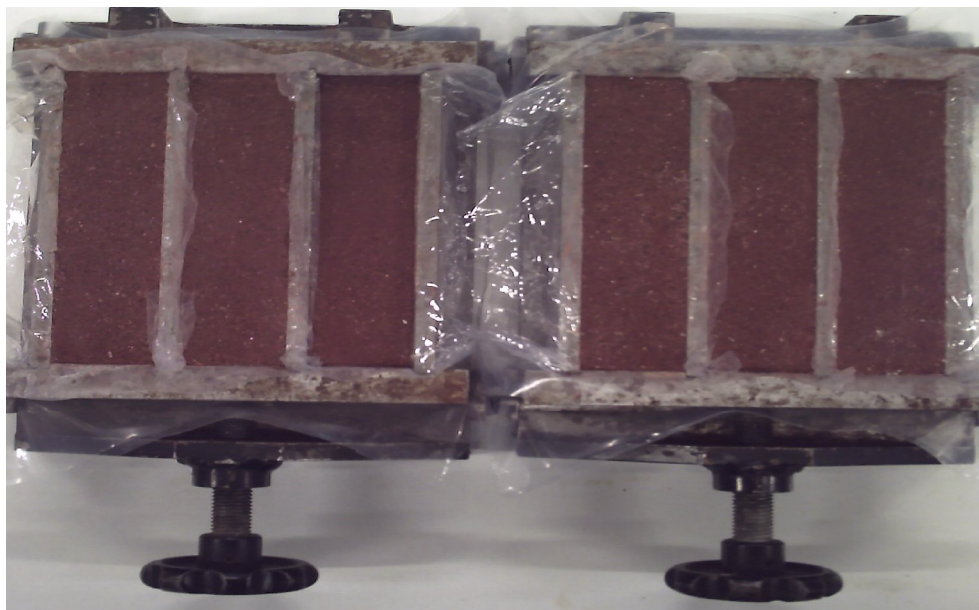


Figura 4.7: Cura a temperatura ambiente ao fim de 2 dias, dos provetes de ensaio à flexão.



Figura 4.8: Cura a temperatura ambiente do provete de ensaio térmico, ao fim de 2 dias.

4.2.3.5 - Provetes de ensaio térmico

Apresenta-se na figura 4.9 e 4.10 os provetes para os ensaios térmicos, com e sem ar incorporado. Os provetes têm dimensões finais de $300 \times 300 \times 30 \text{ mm}^3$ com massa de 5298,6 g e de 5200 g respectivamente.

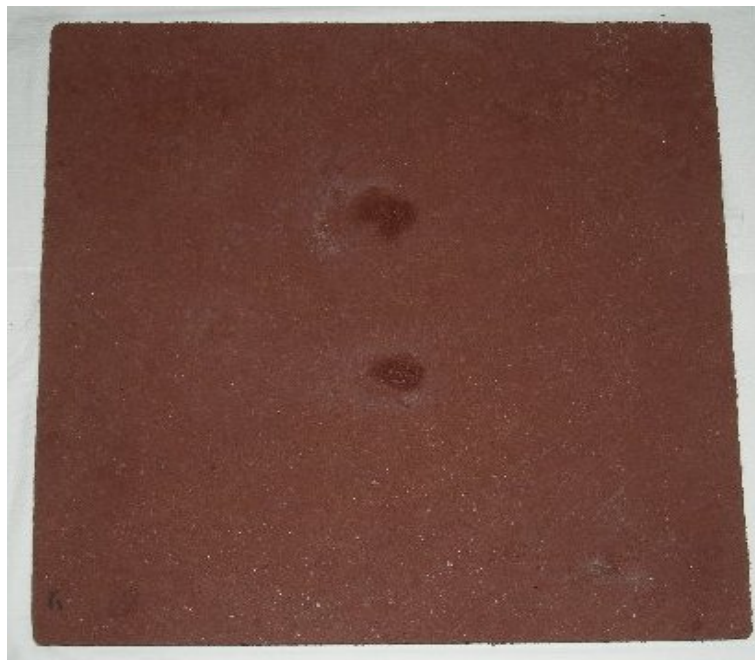


Figura 4.9: Argamassa geopolimérica com ar incorporado.



Figura 4.10: Argamassa geopolimérica sem ar incorporado.

CAPÍTULO 5 - Equipamentos e ensaios realizados

5.1 - Introdução	48
5.2 - Equipamentos e ensaios realizados	48
5.2.1 - Resistência à Compressão	48
5.2.2 - Resistência à flexão	49
5.2.3 - Absorção de Água por Capilaridade	51
5.2.4 - Porosidade e Massa Volúmica no estado endurecido	53
5.2.5 - Determinação da Resistência Térmica	54
5.2.5.1 - Fonte quente	55
5.2.5.1.1 - Instalação experimental (montagem)	55
5.2.5.1.2 - Sistema de aquecimento	56
5.2.5.1.3 - Temperatura no interior da placa	58
5.2.5.2 - Sistema de arrefecimento	58
5.2.5.2.1 - Montagem do sistema de arrefecimento	58
5.2.5.3 - Sistema para medição de temperatura	61
5.2.5.3.1 - Utilização da termografia por infravermelhos	61
5.2.5.3.2 - Utilização de termopares	64

5.1 - Introdução

De acordo com a aplicação e objectivos pretendidos é possível elaborar argamassa geopolimérica com diferentes comportamentos: físico, mecânica e térmica. Como se pretende demonstrar com este trabalho, as propriedades físicas das argamassas geopoliméricas, com intuito de melhorar o comportamento térmico de revestimento de edifícios.

As propriedades mecânicas dependem da condição de elaboração e a composição do material em estudo. Os estudos realizados sobre os ligantes geopoliméricas apontam para que a resistência mecânica varia com os seguintes [10, 12, 16, 24]:

- Natureza dos constituintes (precursor, agregado e activador);
- Aumento com a finura ou superfície específica do precursor (quanto mais fina for maior será a resistência);
- A razão silicato de sódio/ hidróxido de sódio;
- Condições de cura (temperatura e tempo de cura);

Assim, neste capítulo apresentam-se os equipamentos e ensaios realizados para a compreensão das propriedades físicas e mecânicas dos geopolímeros.

5.2 - Equipamentos e ensaios realizados

5.2.1 - Resistência à Compressão

A resistência à compressão foi determinada de acordo com a norma EN 1015 - 11 [49], utilizando-se provetes cúbicos com as seguintes dimensões 40 x 40 x 40 mm³. Apresenta-se de seguida a prensa e o acessório utilizado no ensaio à compressão dos provetes.



a)



b)



c)

Figura 5.1: Equipamento de ensaio à compressão - a) Prensa ELE 3000 KN;
b) Colocação do acessório para o ensaio de provetes de 40 x 40 x 40 mm³;
c) Pormenor do acessório;

Este acessório foi utilizado para garantir uma aplicação correcta da carga, uma vez que as dimensões dos provetes são reduzidas. O acessório permite a correcta colocação e posicionamento dos provetes e a realização do ensaio de compressão.

O ensaio de compressão permite para além da capacidade de resistência à compressão, obter uma indicação do aumento da reactividade da mistura. Se a resistência à compressão for muito baixa pode-se inferir que a reactividade não se deu correctamente, logo a mistura pode não ter sido bem elaborada. A fórmula para o cálculo da resistência à compressão:

$$\sigma = \frac{F}{A} \text{ [MPa]} \quad (5.1)$$

Onde: F - Carga máxima aplicada (rotura) [KN]; A - Área de contacto do corpo de prova [m²];

5.2.2 - Resistência à flexão

Este ensaio permite determinar a capacidade de resistência à flexão do material estudado. Não se trata de um ensaio com uma representatividade tão elevada quanto a do ensaio à compressão, mas pode dar-nos indicações sobre a ligação pasta/agregado, e comportamento sobre o desenvolvimento de fissurações por acção de tracção.

Para este ensaio utilizou-se provetes de dimensões 40 x 40 x 160 mm³, para o mesmo ser realizado de acordo com o disposto na norma EN 1015-11 [49]. De seguida apresenta-se os equipamentos utilizados no ensaio de flexão na figura 5.2.

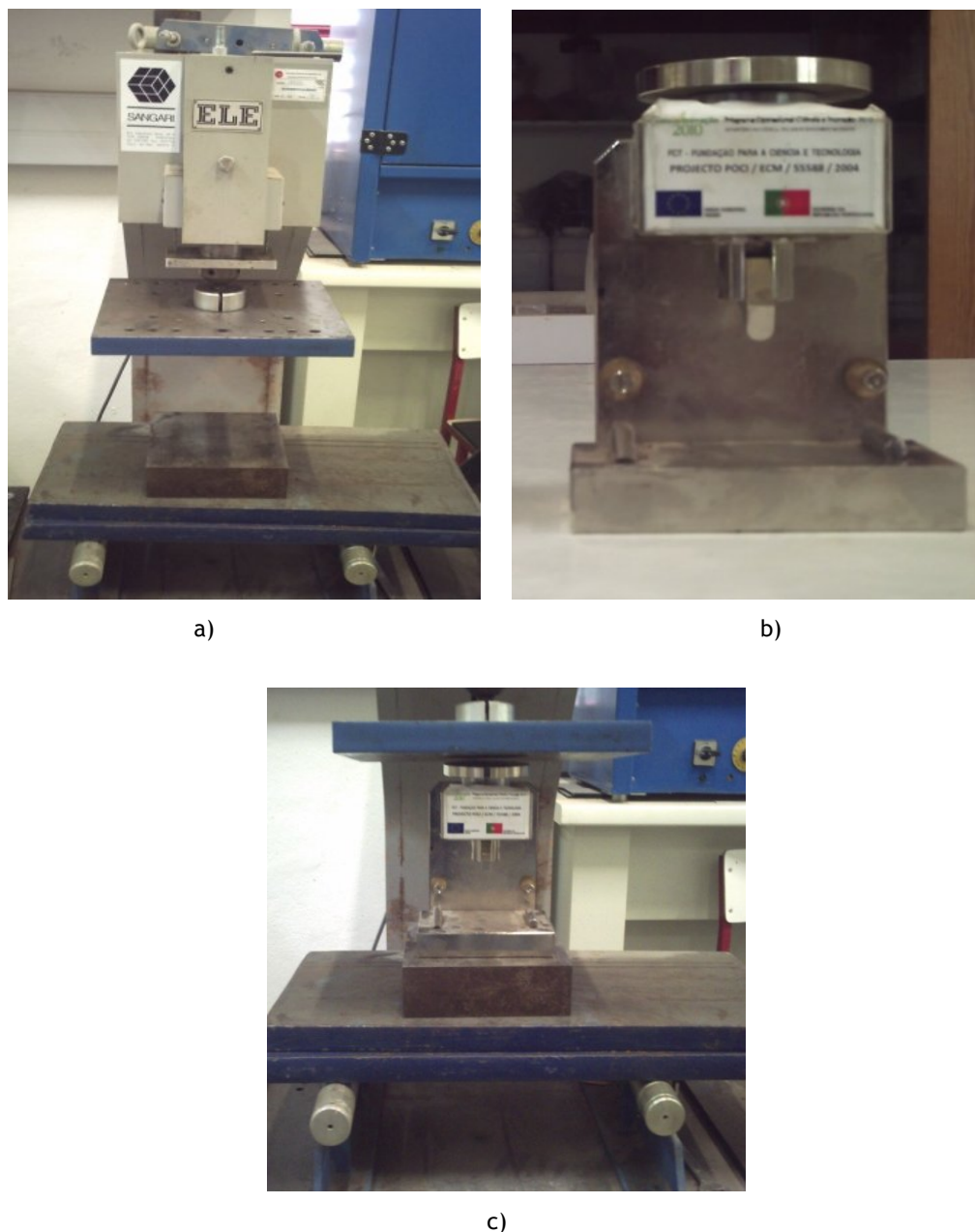


Figura 5.2: Equipamento de ensaio à flexão - a) Prensa de flexão;
b) Acessório para provetes 40 x 40 x 160 mm³;
c) Pormenor da colocação do acessório;

O acessório foi utilizado para garantir uma aplicação correcta da carga, de acordo com as dimensões dos provetes. As fórmulas para o cálculo da resistência à flexão, são as seguintes:

$$f = \frac{F \times l}{b \times d^2} \text{ ou } f = \frac{M \times y}{I} \quad [\text{MPa}] \quad (5.2)$$

F - Carga máxima aplicada [KN]; d - Profundidade [m]; l - Distância entre os apoios [m];
b - Largura [m]; M - Momento flector [KNm]; y - Distância da fibra superior até a linha neutra [m]; I - Momento de inércia [m⁴];

5.2.3 - Absorção de Água por Capilaridade

A capilaridade é definida como a penetração de um líquido (geralmente a água) na argamassa por efeito da tensão superficial gerada na interface água-ar-parede dos poros. Depende essencialmente da quantidade, dimensão, forma e conectividade dos poros na sua estrutura.

A preparação dos corpos de prova para o ensaio foi de acordo com a Especificação do LNEC E 393 - 1993 - Betões [50], que consistiu na sua secagem, em estufa, a uma temperatura de $40 \pm 5^\circ\text{C}$, durante cerca de 14 dias, depois deixando arrefecer até a temperatura da sala.

O tabuleiro de ensaio foi preparado para poder conter a quantidade de água necessária (5 a 10 mm acima da face inferior do provete), bem como os suportes de apoio dos corpos de prova. Por último foram feitas medições ao fim dos tempos t_i (10 min, 30 min, 90 min e 6 horas) a contar desde do momento em que os corpos de prova foram colocados em contacto com a água. De seguida apresenta-se a preparação do provete para o ensaio, na figura 5.3.



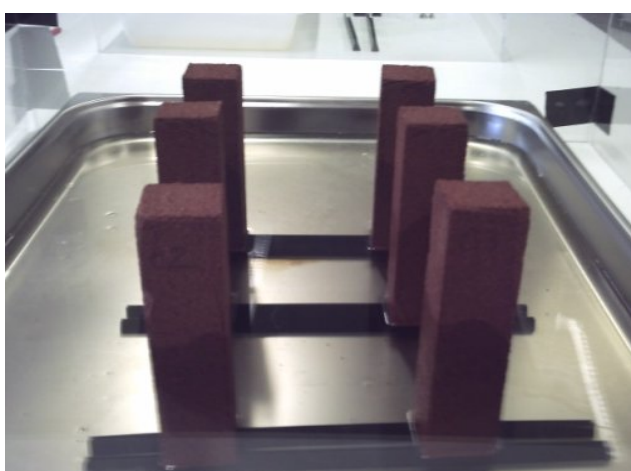
a)



b)



c)



d)

Figura 5.3: Fases do ensaio de absorção capilar - a) Secagem dos corpos de prova;
b) Arrefecimento; c) e d) Ensaio dos provetes

A absorção capilar e a altura da ascensão capilar foram calculadas a partir das seguintes fórmulas:

1. Absorção de água por capilaridade no tempo t_i :

$$\text{Absorção capilar} = \frac{M_i - M_0}{A} \text{ [g/mm}^2\text{]} \quad (5.3)$$

2. Altura da ascensão capilar:

$$\text{Altura de ascensão capilar} = \frac{\sum_1^4 h}{4} \text{ [mm]} \quad (5.4)$$

Onde:

M_i - Massa ao fim de tempo t_i [g]; M_0 - Massa inicial [g]; A - Área em contacto com a água [mm];
 h - Altura da ascensão capilar [mm];

Os coeficientes de absorção capilar das argamassas foram calculados de acordo com a norma EN 1015 - 18 [51].

5.2.4 - Porosidade e Massa Volúmica no estado endurecido

O cálculo da porosidade das argamassas foi feito a partir da porosidade aberta. A porosidade aberta foi calculada pela seguinte fórmula:

$$P (\%) = \left(\frac{m_3 - m_1}{m_3 - m_2} \right) \times 100 \quad (5.5)$$

Onde:

P - Porosidade aberta [%];

m_1 - Massa seca [g];

m_2 - Massa saturada imerso (volume deslocado) [g];

m_3 - Massa saturada com superfície seca [g];

A massa volúmica das argamassas no estado endurecido foi determinada de acordo com a norma EN1015-10 [52], dada pela fórmula 5.7:

$$V_s = \frac{m_3 - m_2}{\rho_w} \quad (5.6)$$

$$\rho = \frac{m_1}{V_s} \quad (5.7)$$

Em que:

ρ_w - Massa volúmica (densidade) da água [Kg/m³];

m_1 - Massa seca [g];

m_2 - Massa saturada imerso [g];

m_3 - Massa saturada com superfície seca [kg];

V_s - Volume da amostra [m³];

ρ - Massa volúmica (densidade) da amostra [Kg/m³];

5.2.5 - Determinação da Resistência Térmica

A resistência térmica é uma medida da capacidade de um material em se opor ao fluxo de calor devido a uma diferença de temperatura. A transferência de calor através de um material pode ocorrer por condução, convecção ou radiação térmica. Neste trabalho o mecanismo mais relevante foi o de condução de calor, que tem lugar quando a transferência de calor de uma região a alta temperatura para outra a temperatura mais baixa, ocorre através de um meio sólido.

A resistência térmica foi determinada de acordo com a norma ASTM E1530 (guarded heat flow meter method) [53]. Na figura 5.4 apresenta-se o sistema adoptado para a medição da resistência térmica.



Figura 5.4: Dispositivo para determinação da resistência térmica.

A lei da condução térmica, também conhecida como lei de Fourier, estabelece que a taxa de transferência de calor através de um material é proporcional ao gradiente de temperatura, e perpendicular à direcção de propagação.

$$q'' = \frac{P}{A} = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \quad (5.8)$$

Onde:

q'' - Fluxo de calor [W/m^2];

P - Potência térmica (potência eléctrica dissipada) [W];

A - Área atravessada pelo calor [m^2] (área aquecida);

A expressão acima aplica-se ao caso unidimensional, quando há gradiente de temperatura apenas numa direcção.

Quando se conhece a temperatura nas superfícies e se pretende calcular o fluxo de calor por condução entre elas, basta integrar a equação 5.8 e fica:

$$q'' = \frac{\lambda(T_2 - T_1)}{e} \quad (5.9)$$

Onde:

q'' - Fluxo de calor [W/m^2]; λ - Condutibilidade térmica [$W/m \text{ } ^\circ C$]; e - Espessura do material [m];
 (T_2-T_1) - diferença de temperatura entre as superfícies (ΔT) [$^\circ C$];

A equação 5.9 pode reescrita da seguinte forma:

$$q'' = \frac{\Delta T}{R_t} \quad (5.10)$$

Onde:

q'' - Fluxo de calor [W/m^2]; ΔT - Diferença de temperatura entre as superfícies [$^\circ C$];
 R_t - Resistência térmica [$m^2 \text{ } ^\circ C/W$];

A potência térmica (P) propiciada pela fonte quente pode ser estimada através da potência eléctrica dissipada por efeito de joule, que é o produto da corrente eléctrica I com a tensão eléctrica V , dada pela equação 5.11.

$$P = V \times I \quad (5.11)$$

Substituindo a equação 5.11 na equação 5.8 vem que:

$$q'' = \frac{V \times I}{A} \quad (5.12)$$

Substituindo a equação 5.12 na equação 5.10 vem que:

$$R_t = \frac{A \times \Delta T}{V \times I} \quad (5.13)$$

Com a resistência térmica calculada pode-se determinar a condutibilidade térmica (λ) do material.

$$R_t = \frac{e}{\lambda} \quad \Rightarrow \quad \lambda = \frac{e}{R_t} \quad (5.14)$$

5.2.5.1 - Fonte quente

5.2.5.1.1 - Instalação experimental (montagem)

Na elaboração da fonte quente foi utilizado uma placa de alumínio com superfície lisa com 1050 mm de altura e 400 mm de largura. Foi escolhido o alumínio por possuir uma boa condutibilidade térmica, importante de modo a eliminar o efeito do aquecimento discreto imposto na placa. O aquecimento da placa ocorre por dissipação de energia eléctrica num circuito construído para o efeito na sua face posterior. Ela foi montada num caixilho construído em aglomerado de madeira (MDF), obtendo-se assim um conjunto com a estabilidade necessária à sua integração na restante

unidade experimental. Para reduzir as perdas de calor através da face posterior deste conjunto, foi ensanduichada, entre a placa de alumínio e o caixilho, uma placa de lã de vidro (Poliglas, LVP-2) com 50 mm de espessura e que, de acordo com a informação do fabricante, possui uma condutibilidade térmica de $0.039 \text{ W/m}^\circ\text{C}$. Atendendo à técnica utilizada, termografia por infravermelhos, e seguindo um procedimento experimental semelhante ao utilizado por Brójo et al. (1997), a superfície foi pintada com uma tinta preta de elevada emissividade (Presto Flux, 200 Thermo Spray 800°C - negro mate), de forma a maximizar a energia radiante emitida [54].

O esquema da secção transversal pode ser visualizado na figura 5.5, onde se encontram indicadas as suas dimensões mais importantes.

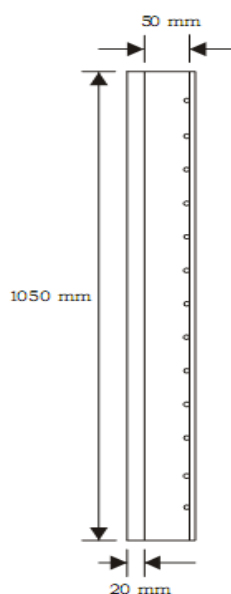


Figura 5.5: Esquema da secção transversal da placa [54].

5.2.5.1.2 - Sistema de aquecimento

Como foi referido anteriormente, o aquecimento da placa ocorre por dissipação de energia eléctrica por efeito de Joule, num circuito montado na sua face posterior.

A concepção do circuito seguiu-se um procedimento que permite a obtenção de uma distribuição uniforme do fluxo de calor. Foi utilizado fio de NiCr (Omega Engineering Inc., NI60-040), com 1mm de diâmetro e resistência eléctrica igual a $1,43 \Omega/\text{m}$. O fio foi disposto paralelamente, por elementos, tendo-se utilizado fio condutor de cobre para fazer as respectivas ligações. A resistência eléctrica do conjunto é de $20,5 \Omega$. A fixação do circuito eléctrico à placa foi efectuada através da utilização combinada de dois tipos de cola (Omega Engineering Inc., Omegabond OB600 e Omegabond OB-700) que adquirem forte consistência após um período de cura de cerca de 24 horas. As colas deste género, à base de fosfato de magnésio, são especialmente indicadas para este tipo de aplicações por possuírem reduzida condutibilidade

eléctrica e razoável condutibilidade térmica. Na figura 5.6 pode visualizar-se o aspecto final do conjunto [54].



Figura 5.6: Conjunto placa de alumínio/caixilho em MDF, com o respectivo sistema de aquecimento e instrumentação [54].

Para o controlo do aquecimento da placa utiliza-se uma fonte de alimentação monofásica de tensão variável (Projecontrol, PSO220) que se encontrava ligada a um estabilizador de tensão monofásico (Projecontrol, EET406). Para o cálculo da potência eléctrica dissipada foram monitorizadas a tensão e a corrente eléctrica fornecida, tendo-se utilizado para o efeito dois multímetros digitais (Fluke Co., 8840A e Fluke Co., 45, respectivamente). O aspecto geral deste conjunto, pode ver-se na figura 5.7. O fluxo de calor produzido obteve-se dividindo a potência eléctrica dissipada no circuito pela área da superfície aquecida ($1050 \times 400 \text{ mm}^2$) [54].

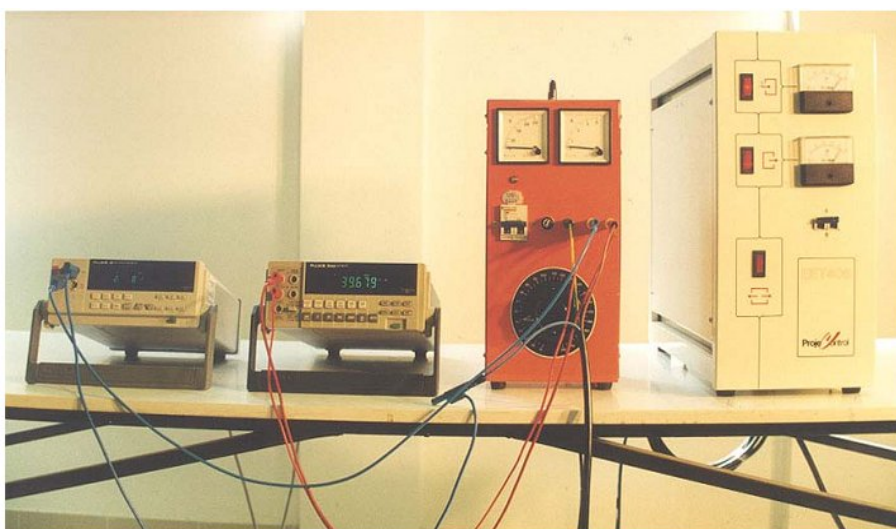


Figura 5.7: Equipamento auxiliar do sistema de aquecimento [54].

5.2.5.1.3 - Temperatura no interior da placa

Para quantificar as perdas de calor por condução pela parte posterior da placa (fonte quente), esta foi instrumentada com termopares, em três níveis, localizados na placa de alumínio e na face interior da tampa do caixilho em MDF. Foram efectuados furos de pequeno diâmetro na placa de alumínio, até cerca de metade da sua espessura, onde foram posteriormente posicionados os termopares. Uma vez que a placa contém o circuito eléctrico de aquecimento, os termopares foram revestidos com a mesma massa utilizada na construção do circuito, de forma a prevenir eventuais perturbações na leitura do sensor. Na face interior da tampa do caixilho foram também colocados termopares, em cotas semelhantes às da placa de alumínio, fixados com recurso a uma fita autocolante (Comark, thermocouple attachment pads) apropriada para esse efeito [54]. Na figura 5.6 pode ver-se a localização destes termopares, quer os fixados à placa de alumínio, quer os fixados à tampa do caixilho.

5.2.5.2 - Sistema de arrefecimento

O sistema de arrefecimento é composto por um equipamento de controlo de temperatura huber unistat CC (figura 5.8) ligado a um piso radiante. O equipamento de controlo de temperatura tem como base o princípio de banho termostático fechado, onde é introduzida uma temperatura de operação, definida esta temperatura de trabalho o sistema trabalha até atingir a condição permanente.



Figura 5.8: Fonte de arrefecimento.

5.2.5.2.1 - Montagem do sistema de arrefecimento

Para a construção do sistema de arrefecimento foram necessárias cofragens, isolamento, tubagem, argamassa de cimento e cal hidratado e revestimento superficial. A cofragem utilizada

foi em MDF branco com as dimensões seguintes $890 \times 889 \times 70 \text{ mm}^3$, e a espessura lateral de 10 mm e a base de 160 mm. O isolamento utilizado foi XPS (poliestireno extrudado) de 3 cm, colocada em cima da base da cofragem e depois foi fixada a tubagem (mangueira flexível) as placas de isolamento com auxílio de cola quente e nas curvaturas foram colocadas reforços temporários de pregos de aço para melhor fixação e melhor curvatura (ver a figura 5.9) [55].



Figura 5.9: Colocação do isolamento e fixação da tubagem [55].

Depois de algum tempo de secagem da cola e garantida a fixação da tubagem no isolamento foram removidos os pregos de aço. Também foram colocadas 4 termopares tipo K no interior para o controle de temperatura interior (ver figura 5.10). Após a preparação da base com a colocação de isolamento, da tubagem e termopares, foi colocada uma camada de 24 mm de argamassa cimento e cal hidráulica como ilustra a figura 5.11 [55].

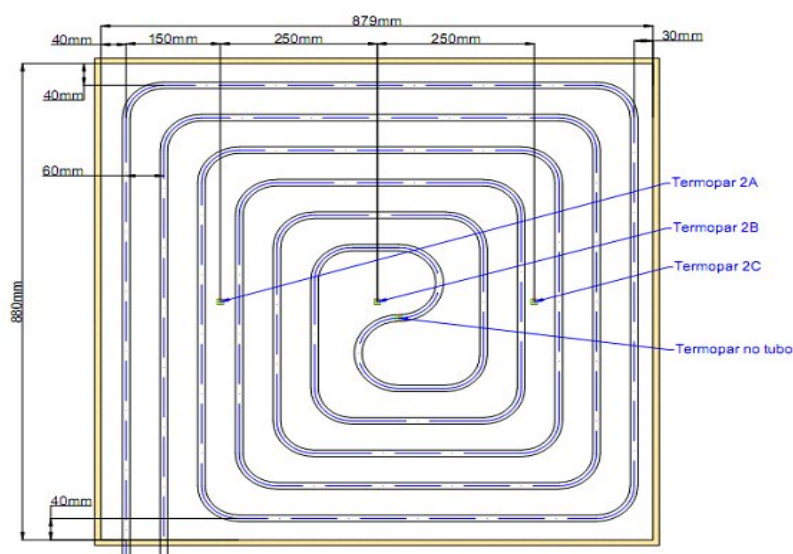


Figura 5.10: Localização dos termopares interiores [55].

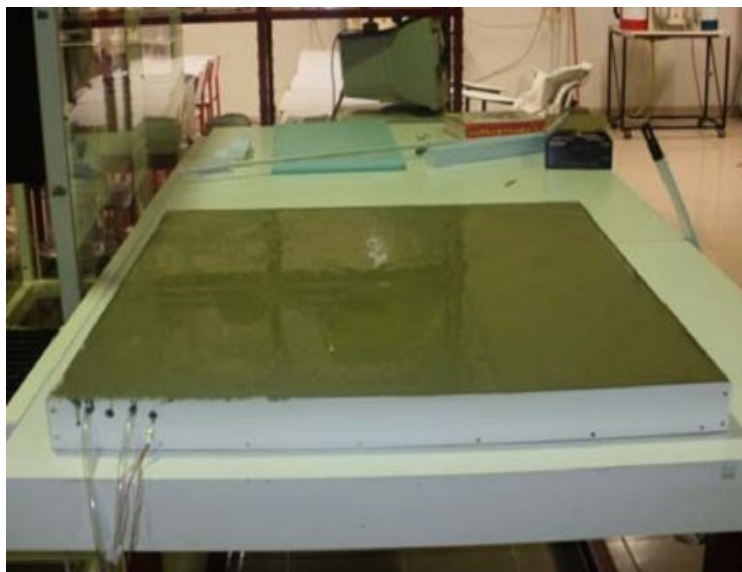


Figura 5.11: Aspecto após a colocação da camada de argamassa [55].

Na figura 5.12 apresenta-se um corte do sistema de arrefecimento

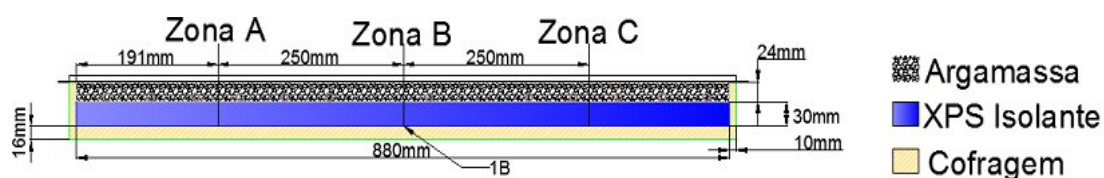


Figura 5.12: Corte do piso antes e da colocação do revestimento [55].

Depois da argamassa seca foi colocada o revestimento cerâmica como ilustra a figura 5.13.



Figura 5.13: Aspecto final do sistema de arrefecimento.

5.2.5.3 - Sistema para medição de temperatura

Utilizou-se duas técnicas, distintas, na medição de temperatura. Para a verificar o fluxo de calor à superfície, fez-se uso de um sistema de termografia por infravermelhos, enquanto que para a medição das restantes temperaturas, se utilizaram termopares.

5.2.5.3.1 - Utilização da termografia por infravermelhos

A termografia por infravermelho consiste na medição da energia de radiação (calor) dos corpos, que não são visíveis pelo olho humano, através de uma câmara termográfica. Esta câmara é um aparelho que detecta a energia infravermelha (calor) e converte-a em sinal eléctrico e produz imagens, efectuando os cálculos da temperatura [56].

A termografia por infravermelhos possibilita a medição contínua e simultânea da temperatura de uma superfície, em tempo real e sem necessidade de contacto. Recorreu-se a este sistema para obter a distribuição da temperatura na superfície em estudo.

O sistema utilizado (Nec San-ei, TH1104) possui um detector de HgCdTe, arrefecido de modo termoeléctrico, que é sensível na gama de comprimentos de onda entre 3 e 5,3 μm . É constituído por dois módulos, a câmara de termografia, que possui o detector de infravermelhos, e a unidade de aquisição e processamento de sinal, também responsável pelo controlo da câmara. Este módulo, possui, ainda, um monitor colorido onde pode visualizar-se a imagem térmica (termograma) da superfície em análise [54].

Para proceder à calibração do sistema foi utilizado uma placa de alumínio, com dimensões 120 x 120 x 20 mm^3 , que faz parte de um sistema didáctico, existente no laboratório, destinado ao estudo da transferência de calor por convecção (Gunt, WL 352). A placa é aquecida por efeito de Joule, existindo, para o efeito, numa das suas faces, um circuito eléctrico composto por quatro elementos aquecedores. O controlo do aquecimento é efectuado por uma unidade específica, integrante do sistema, podendo utilizar-se potências eléctricas com valores entre 0 W e 170 W [54].

A superfície oposta à que contém o circuito de aquecimento, foi pintada com a mesma tinta preta utilizada nas superfícies e instrumentada com quatro termopares, do tipo T, para medição da sua temperatura. Neste caso, o erro associado à leitura da temperatura pelos termopares é de $\pm 0.5^\circ\text{C}$. O aspecto geral da placa utilizada figura 5.14 [54].

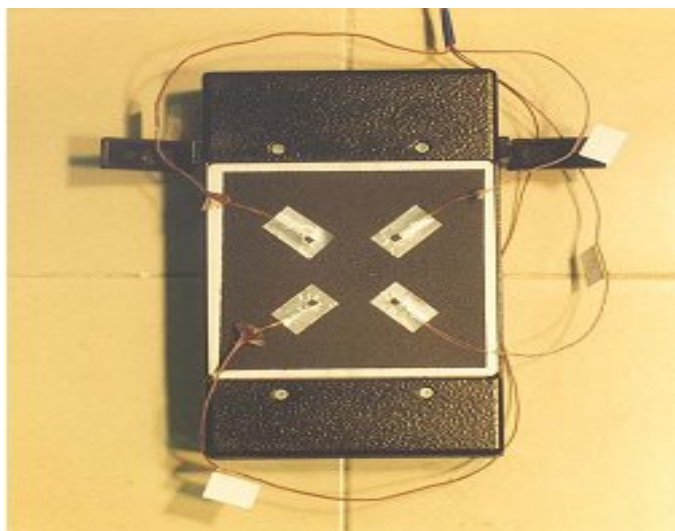


Figura 5.14: Placa utilizada na calibração do sistema de TIV e respectiva instrumentação [54].

O eixo da câmara foi posicionado perpendicularmente à superfície em estudo e a uma distância de 1100 mm.

Na figura 5.15 apresenta-se um termograma relativo a um dos ensaios de calibração. Para a medição da temperatura da superfície recorreu-se ao software PIC-Win-Iris tendo sido definido um círculo, compreendido entre os quatro termopares, para o qual se obteve, por integração, o valor médio da temperatura. Como se pode observar no termograma, a distribuição da temperatura na superfície pode considerar-se uniforme [54].

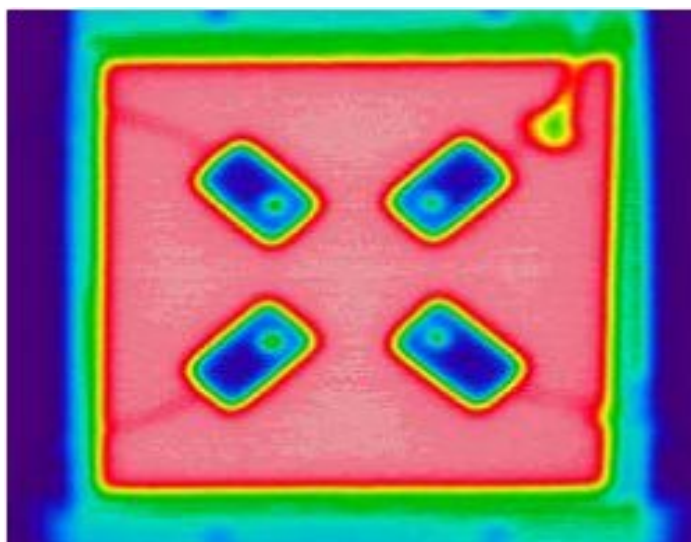


Figura 5.15: Termograma relativo à calibração do sistema de TIV [54].

Com a finalidade de fazer a correspondência entre a temperatura indicada pelo sistema de termografia e a temperatura real, foi utilizada uma relação polinomial de 3ª ordem para representar a curva de calibração, tal como é sugerido por Vermeulen (1997). A curva assim

obtida é apresentada na figura 5.16, tendo sido estimado o seu erro, dentro da gama representada, como sendo aproximadamente $\pm 0.6^\circ\text{C}$.

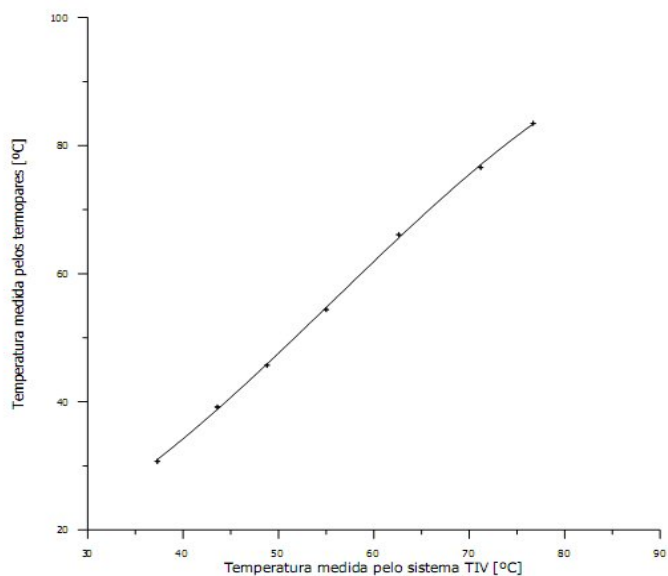


Figura 5.16: Curva de calibração do sistema de termografia por infravermelhos [54].

Para os ensaios termografia, colocou-se a placa de aquecimento horizontalmente e posicionou-se o eixo da câmara de forma que à superfície da placa seja visível na sua totalidade e a melhor resolução possível. A figura 5.17 permite ter uma ideia do posicionamento da câmara relativamente à superfície em estudo.

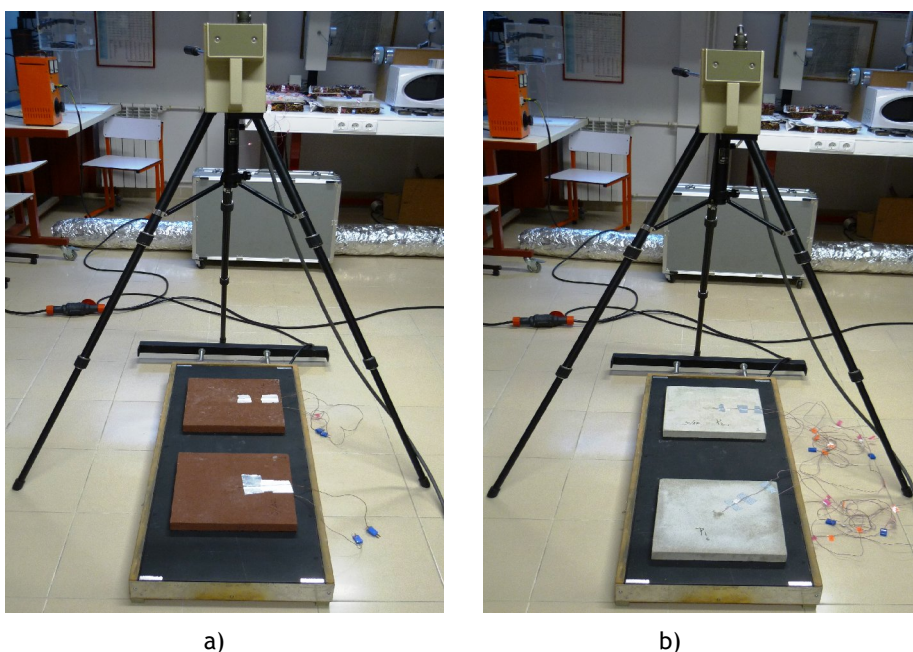


Figura 5.17: a) e b) Posicionamento da câmara do sistema de TIV.

5.2.5.3.2 - Utilização de termopares

A medição de temperaturas superficiais foram feitas, utilizando termopares de Cobre - Constantan, tipo T. O fio, adquirido em bobina (Omega Engineering Inc., TGT30), tem um diâmetro de 0.25 mm e é revestido por teflon e por uma trança de fibra de vidro. A junção foi realizada no laboratório por fusão em banho de mercúrio. Os termopares foram ligados a um sistema de aquisição (Omega Engineering Inc., OMB-Tempscan 1100), como se apresenta na figura 5.18.

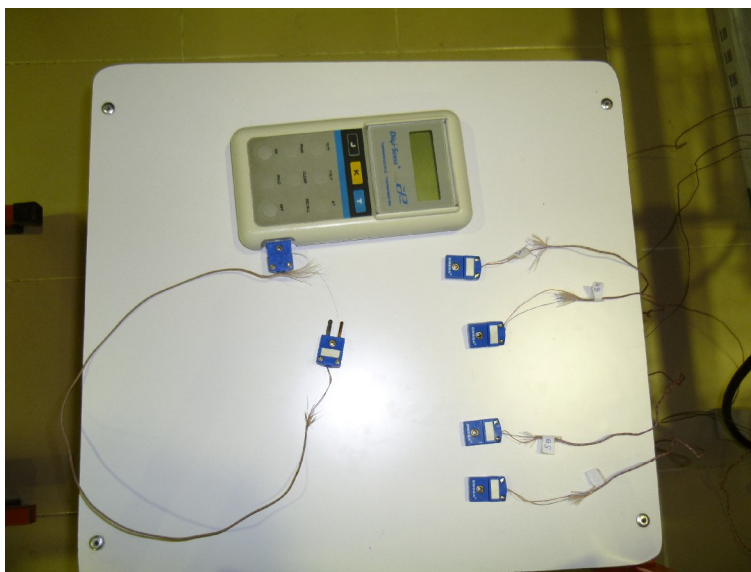


Figura 5.18: Sistema de aquisição das temperaturas (termopares).



Figura 5.19: Fonte quente por cima e fonte fria por baixo.



Figura 5.20: Preparação para o ensaio da argamassa de cimento.

CAPÍTULO 6 - Apresentação e discussão de resultados

6.1 - Propriedades mecânicas	67
6.1.1 - Resistência à compressão	67
6.1.2 - Resistência à flexão	71
6.2 - Absorção de água por capilaridade	74
6.2.1 - Absorção de água por capilaridade das argamassas de cimento	74
6.2.2 - Absorção de água por capilaridade das argamassas geopoliméricas	75
6.3 - Porosidade e Massa Volúmica das argamassas	77
6.3.1 - Porosidade e Massa volúmica das argamassas geopoliméricas	77
6.3.2 - Porosidade e Massa volúmica das argamassas de cimento	78
6.4 - Propriedades térmicas das argamassas.....	79
6.4.1 - Resistência e condutibilidade térmica das argamassas de cimento	79
6.4.2 - Resistência e condutibilidade térmica das argamassas geopoliméricas	81
6.4.3 - Termografia por infravermelhos das argamassas	85
6.5 - Caracterização das argamassas segundo EN 998 - 1 e CSTB - MERUC	87
6.5.1 - Classificação das argamassas segundo a norma EN 998 - 1.....	89
6.5.2 - Classificação das argamassas segundo a CSTB - MERUC	90

6.1 - Propriedades mecânicas

6.1.1 - Resistência à compressão

A rotura dos provetes geopoliméricos ensaiados à compressão tiveram o mesmo tipo de rotura que os provete de cimento Portland. Na figura 6.1 apresenta-se os dois tipos de rotura.



Figura 6.1: Rotura por compressão das argamassas - a) Argamassam cimento sem ar;
c) Argamassas de cimento com ar; d) Argamassas geopoliméricas sem ar;
d) Argamassas geopoliméricas com ar.

Os resultados da evolução da resistência à compressão das argamassas geopoliméricas e cimento Portland estão ilustrados nas figuras 6.2 e 6.3.

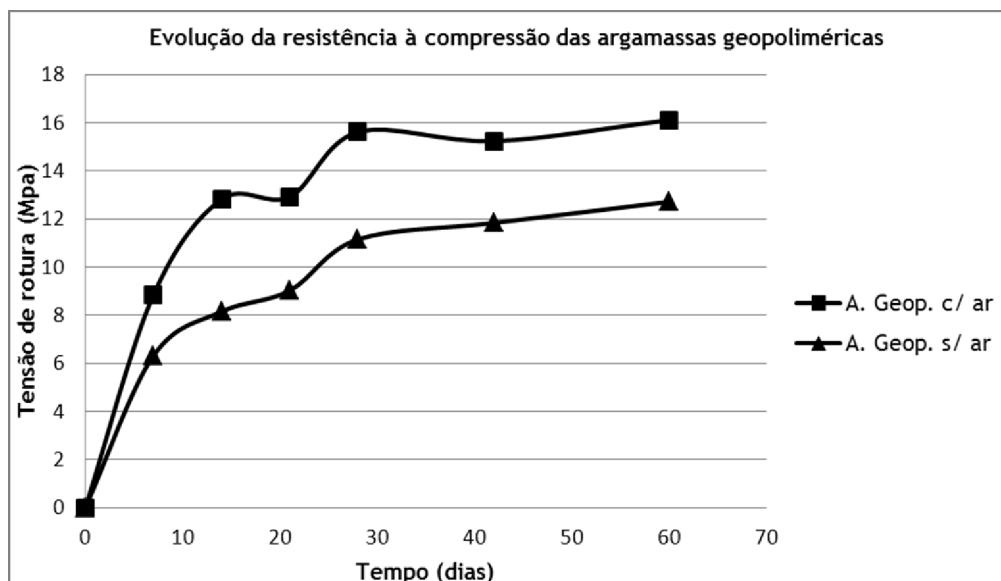


Figura 6.2: Resistência à compressão das argamassas geopoliméricas.

Como pode ver na figura 6.2 as argamassas geopoliméricas com ar introduzido apresentam maior resistência à compressão do que as argamassas sem ar, isto deve-se ao facto de que o ar introduzido na mistura melhora um pouco a trabalhabilidade da argamassa geopolimérica e também melhora a distribuição dos poros, uma vez que a argamassa geopolimérica à base de lamas apresenta um índice de porosidade elevada.

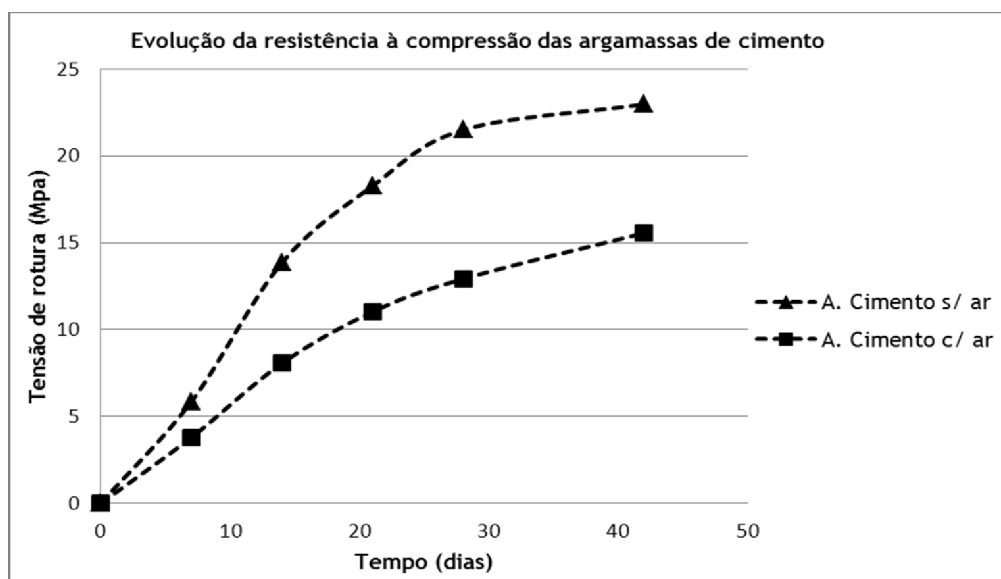


Figura 6.3: Resistência à compressão das argamassas de cimento.

As argamassas de cimento sem ar incorporado apresentam maiores resistências à compressão. Como indica a literatura sobre a actuação do ar na argamassa, faz aumentar a porosidade com dimensões superiores e melhora a distribuição de poros e com isso interfere na estrutura da argamassa. Por outro lado os poros podem ocupar parcialmente o espaço de ligação entre o ligante e agregado, diminuindo a resistência mecânica [57].

Para perceber melhor a evolução da resistência à compressão das argamassas geopoliméricas e de cimento fez-se uma análise comparativa entre elas. Estas comparações estão ilustradas nas figuras 6.4, 6.5, 6.6 e 6.7.

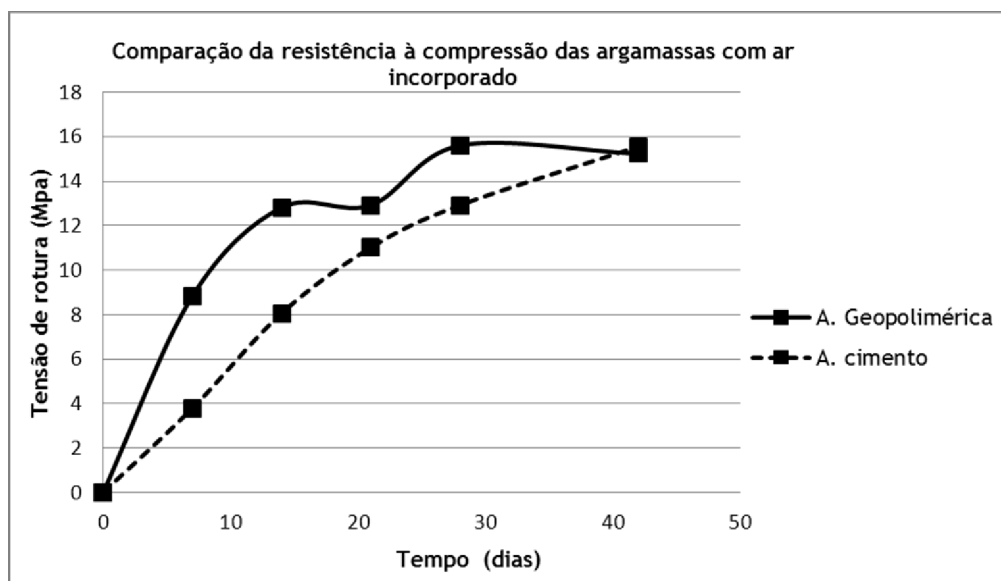


Figura 64: Resistência à compressão de argamassas com ar incorporado.

Como se pode ver na figura 6.4 a argamassa geopolimérica apresenta maior resistência à compressão nas idades iniciais do que argamassa de cimento, isto confere com os resultados encontrados por Fernando Torgal [1].

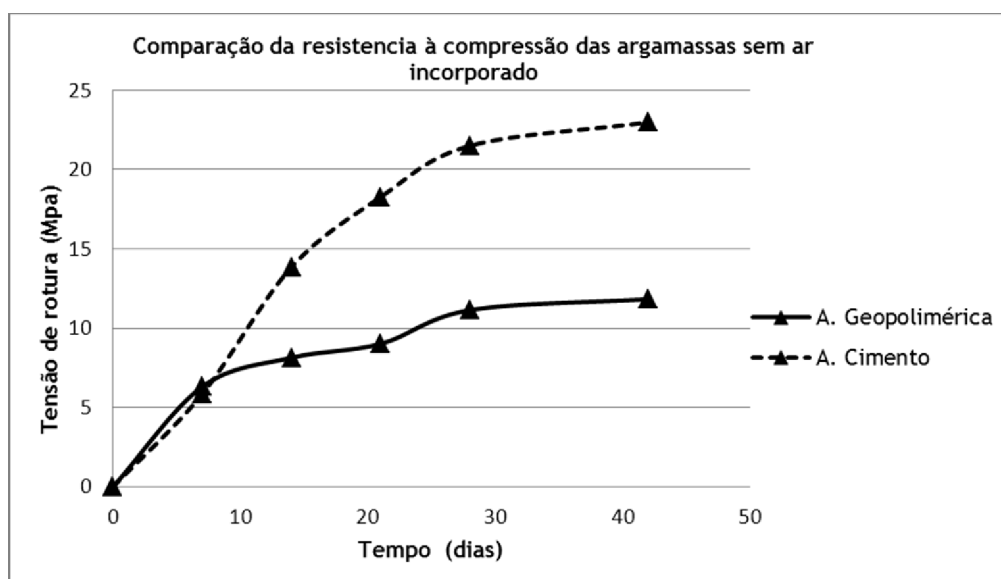


Figura 6.5: Resistência à compressão das argamassas sem ar incorporado.

Mesmo nas argamassas sem ar incorporado verifica-se melhor resistência à compressão aos 7 dias o que está de acordo com o esperado, mas a partir daí a argamassa de cimento continua a hidratar e a ganhar resistência enquanto que a argamassa geopolimérica a geopolimerização continua mas não com o mesmo ganho de resistência (figura 6.5).

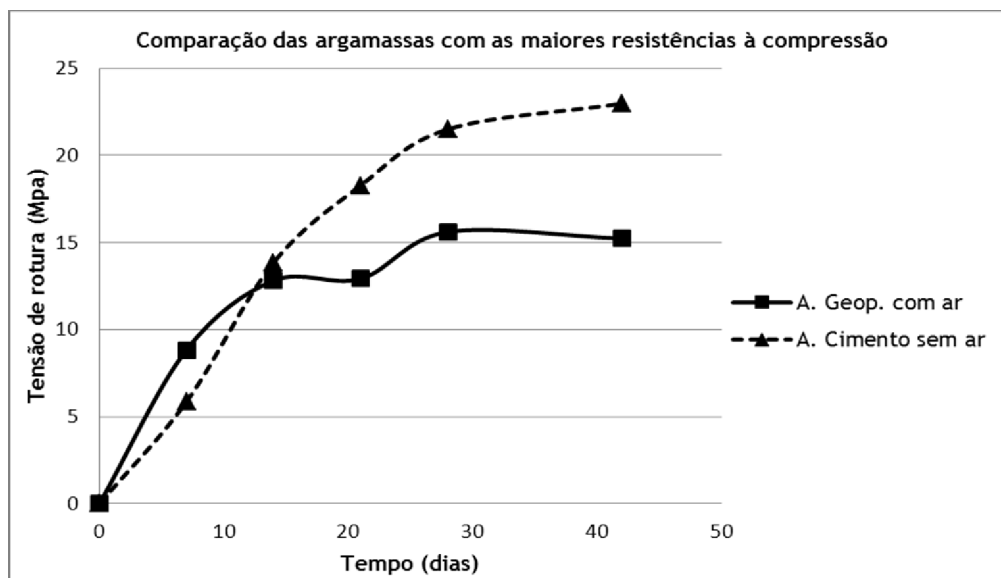


Figura 6.6: Argamassas com as melhores resistências.

A resistência inicial da argamassa geopolimérica é superior à resistência inicial da argamassa de cimento, mas após 14 dias esta tendência inverteu-se. A argamassa geopolimérica não tem um ganho de resistência tão elevado com a geopolimerização, como a argamassa de cimento. Ou seja, com a hidratação o ganho de resistência das argamassas de cimento, a partir dos 14 dias, é superior à das argamassas geopoliméricas (figura 6.6).

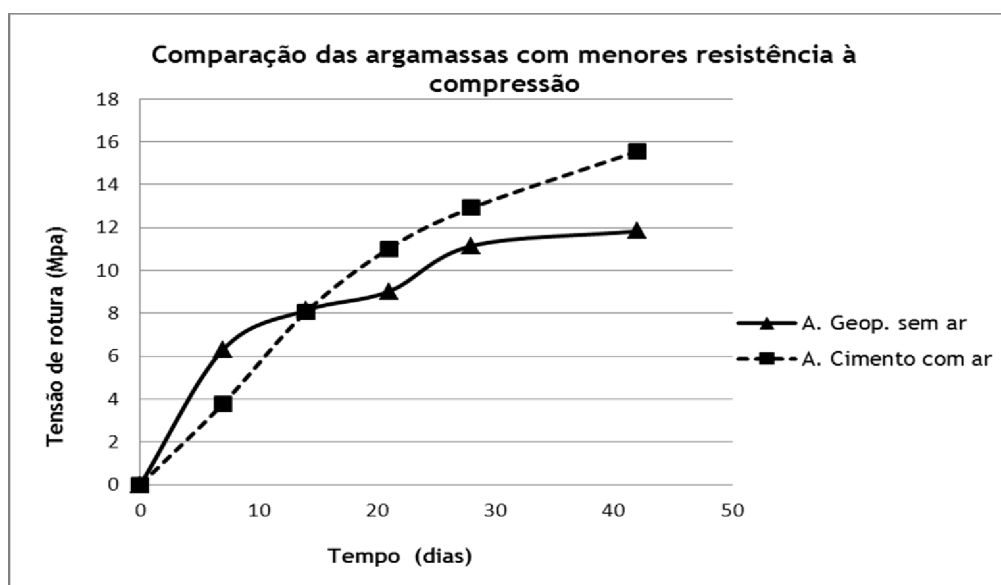


Figura 6.7: Argamassas com menores resistências.

Mesmo nas argamassas com menores resistências a argamassa geopolimérica apresenta melhores resistências iniciais do que argamassa cimento, como era de esperado, como se apresenta na figura 6.7. Também neste caso, o ganho de resistência das argamassas de cimento é superior aos da argamassa geopolimérica, a partir dos 14 dias.

6.1.2 - Resistência à flexão

A rotura dos provetes ensaiados à flexão das argamassas de cimento e das argamassas de geopolímeros foi do mesmo tipo. De seguida apresenta-se a rotura das argamassas.

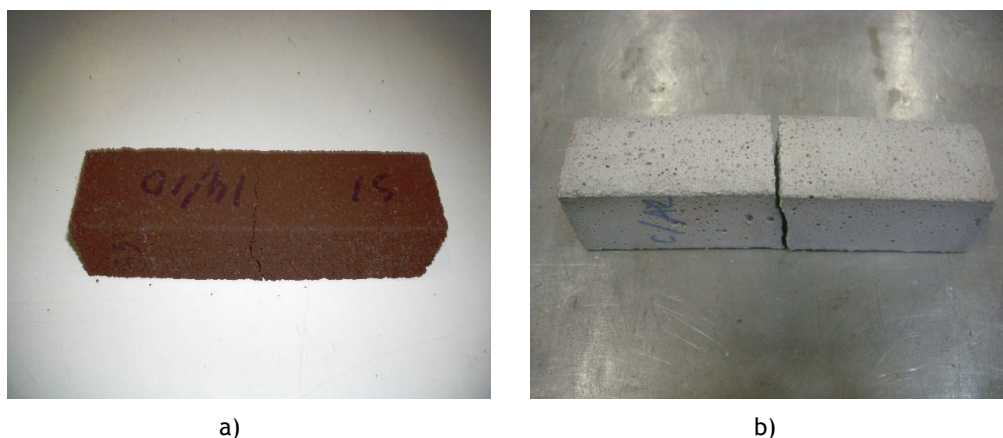


Figura 6.8: Rotura por flexão das argamassas - a) Argamassa geopolimérica;
b) Argamassa de cimento.

Nas figuras seguintes (6.9 e 6.10) apresenta-se a evolução da resistência à flexão das argamassas.

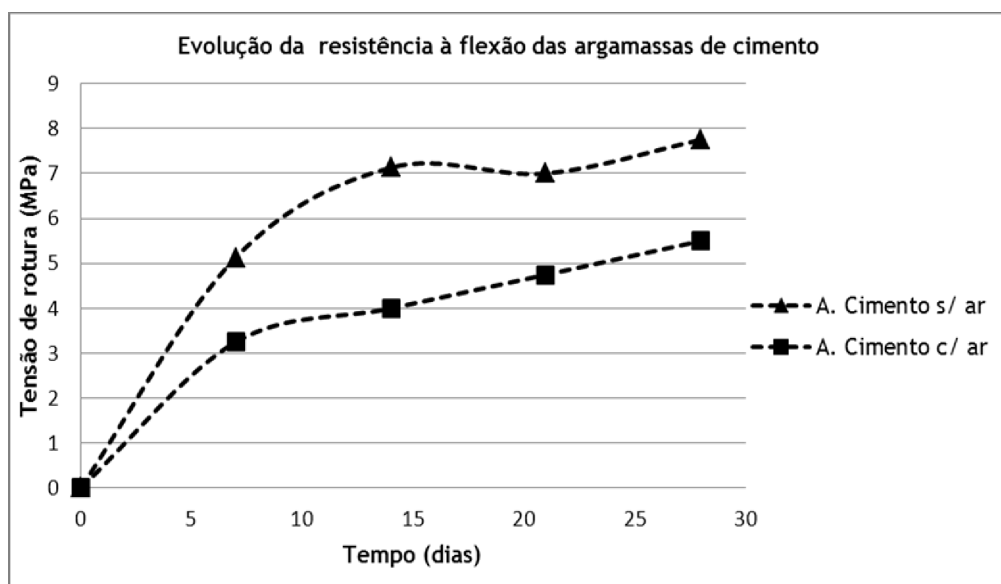


Figura 6.9: Evolução da resistência à flexão das argamassas de cimento.

Como pode ver na figura 6.9 a resistência à flexão da argamassa de cimento com ar é inferior a de sem ar, isto deve-se ao facto, como foi referido anteriormente, o ar interferir na estrutura da argamassa de cimento.

Tal como na compressão, a resistência à flexão das argamassas geopoliméricas sem ar incorporado é inferior à com ar. No entanto, neste caso, há uma ligeira diferença na resistência aos 7 dias (figura 6.10).

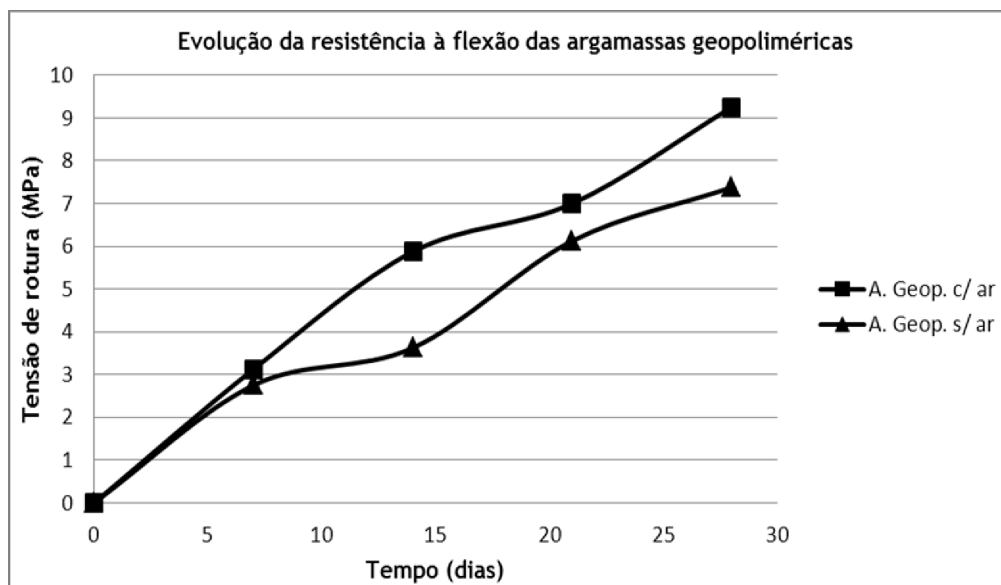


Figura 6.10: Evolução da resistência à flexão das argamassas geopoliméricas.

Fez-se comparação da resistência à flexão entre as argamassas geopoliméricas e as argamassas de cimento para ver qual das duas argamassas apresentam maiores resistências à flexão. As figuras 6.11, 6.12 e 6.13 ilustram essas comparações.

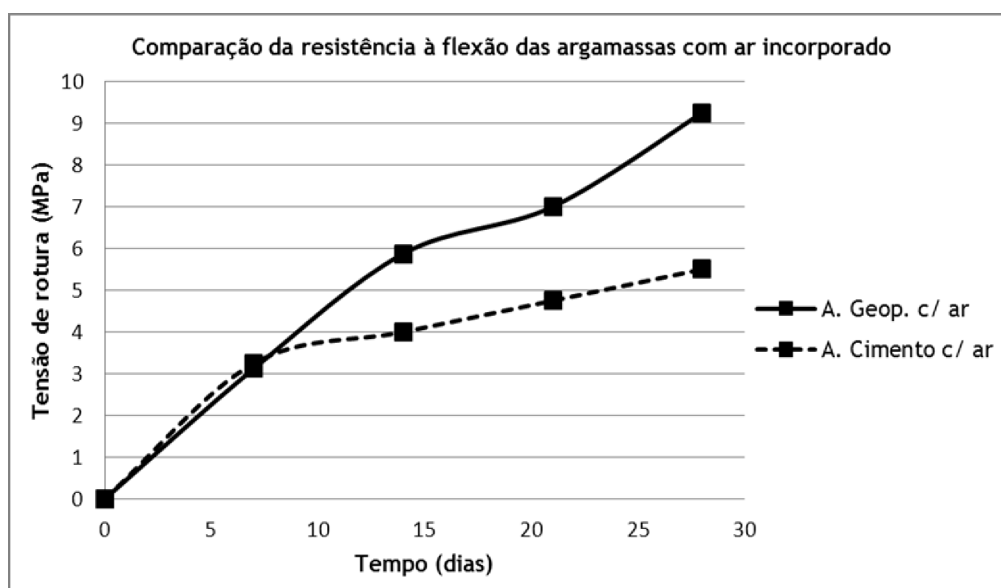


Figura 6.11: Resistência à flexão das argamassas com ar incorporado.

As argamassas de cimento com ar incorporado apresentam valores de resistência à flexão idênticos aos das argamassas geopoliméricas com ar incorporados até aos 7 dias. Como se pode ver a evolução da resistência até aos 7 dias é semelhante entre as duas argamassas o que não acontece na resistência à compressão (ver figura 6.11).

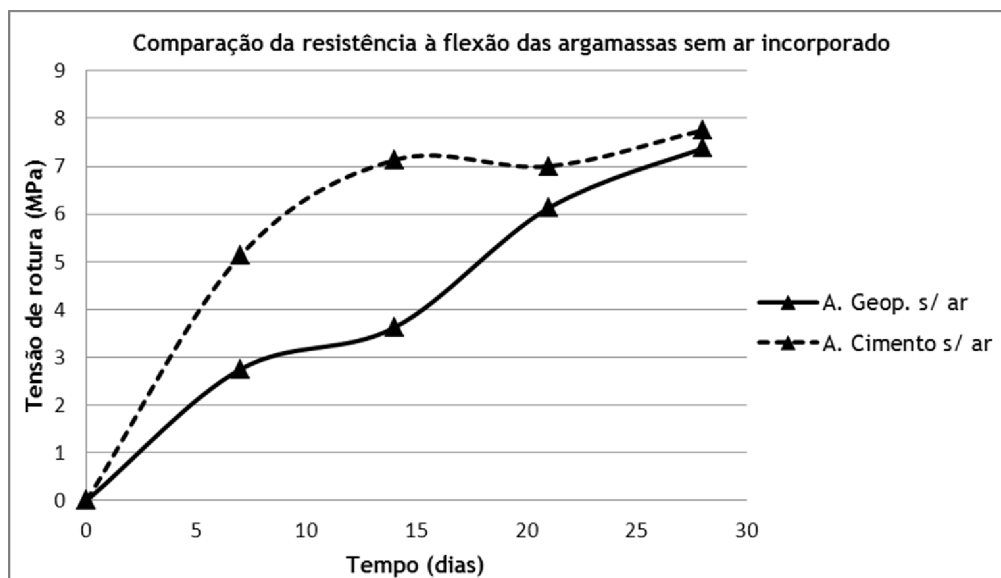


Figura 6.12: Resistência à flexão das argamassas sem ar incorporado.

Na figura 6.12 pode ver-se que as argamassas de cimento sem ar incorporado apresentam valores de resistência à flexão iniciais superiores aos das argamassas geopoliméricas sem ar incorporados, mas a partir dos 28 dias a evolução da resistência das duas argamassas tende a aproximar.

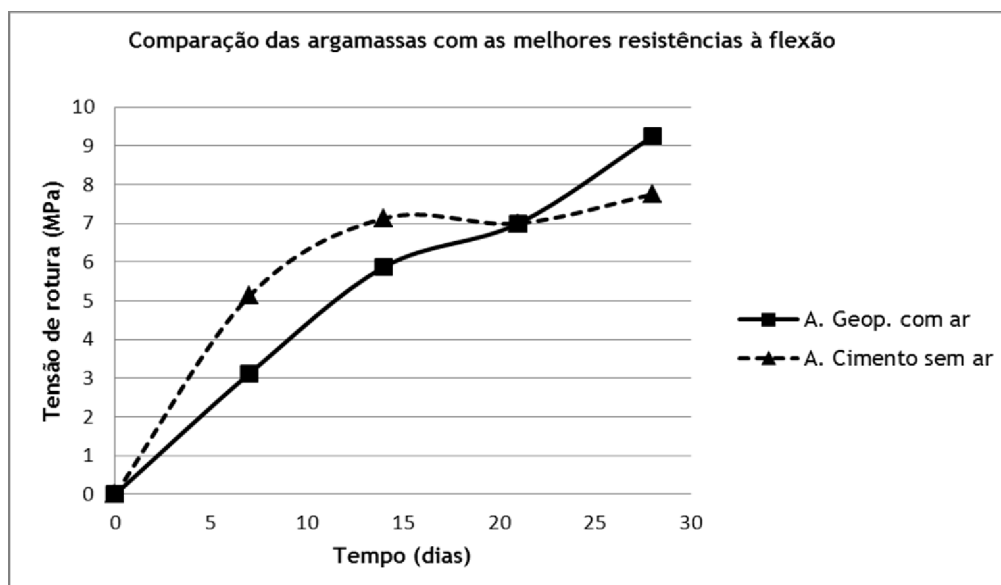


Figura 6.13: Argamassas com as melhores resistências.

Como se pode ver na figura 6.13 as resistências iniciais das argamassas geopoliméricas são inferiores as de argamassas cimento, mas superior a partir dos 21. Este efeito também foi constatado por Fernando Torgal [1], resistências iniciais à flexão baixa e depois um aumento de resistência.

A partir dos resultados de resistências a compressão e resistências à flexão verificou-se que as argamassas geopoliméricas sem ar incorporados apresentam menores valores de resistências, quando comparados com as outras argamassas em estudo.

Em geral encontra-se na literatura que os geopolímeros têm resistências mecânicas superiores, mas não é este o caso. Na resistência à compressão as argamassas de cimento apresentam resultados inferiores nas idades iniciais e superiores a partir dos 21 dias, enquanto que na resistência à flexão é o contrario. Esta baixa resistência mecânica da argamassa geopolimérica tem haver com a composição da mistura, uma vez que a composição dos activadores e a razão Si/Al têm um papel preponderante na resistência mecânica [1, 12, 24]. Em termos da ductilidade das argamassas, calculada pelo quociente de resistência à flexão por resistência à compressão, pode-se dizer que as argamassas geopoliméricas são mais dúcteis, com a ductilidade superior em argamassas geopolimérica sem ar incorporado.

6.2 - Absorção de água por capilaridade

6.2.1- Absorção de água por capilaridade das argamassas de cimento

Os resultados do ensaio de absorção capilar das argamassas de cimento estão apresentados nas figuras 6.14 e 6.15. Os s provetes foram ensaiados aos 43 dias de idades.

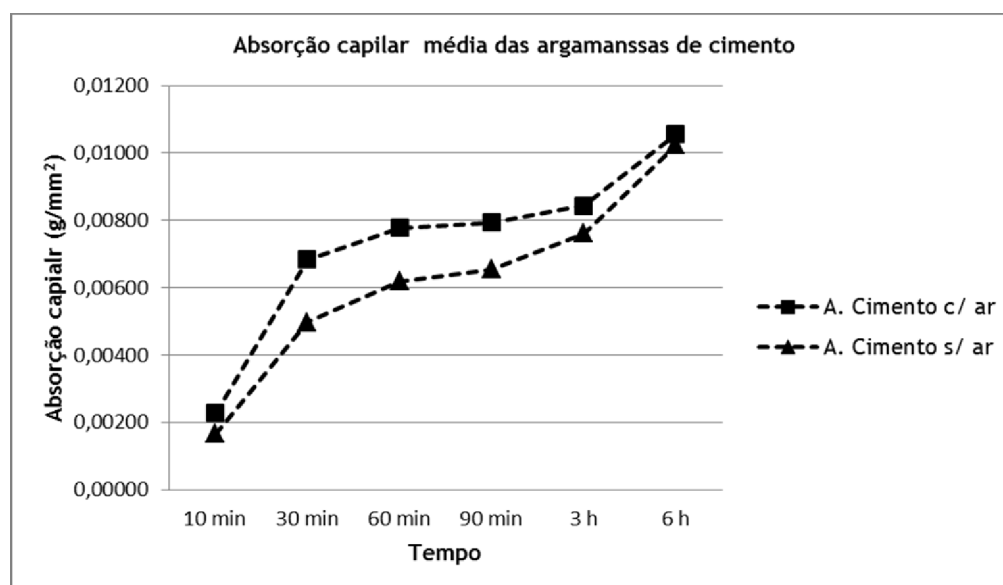


Figura 6.14: Absorção capilar média das argamassas de cimento.

A figura 6.14 mostra a evolução da absorção de água das argamassas cimento ao longo do tempo. As argamassas com ar incorporado apresentam uma maior absorção do que as argamassas sem ar, mas essa absorção não é muito acentuada. Absorção inicial devido a poros maiores e a absorção mais tarde devido a poros menores. Segundo a norma EN 1015 -18 [51], o coeficiente de absorção capilar pode ser calculado pela seguinte fórmula:

$$C = 0,1 \times (M_2 - M_1) - \text{kg}/(\text{m}^2 \times \text{min}^{0.5}) \quad (6.1)$$

Onde: M_2 e M_1 são massas em gramas [g] aos 90 e 10 minutos respectivamente.

Os coeficientes de absorção capilar das argamassas de cimento são as seguintes:

$$C_{\text{A. Cimento s/ar}} = 0,1 \times (577,93 - 570,12) = 0,781 \text{ kg}/(\text{m}^2 \times \text{min}^{0.5})$$

$$C_{\text{A. Cimento c/ar}} = 0,1 \times (491,70 - 482,64) = 0,906 \text{ kg}/(\text{m}^2 \times \text{min}^{0.5})$$

Nota-se que a argamassa de cimento sem ar incorporado apresenta coeficiente de absorção capilar inferior ao de argamassa com ar, isto porque apresenta menor porosidade que conduz menor absorção capilar.

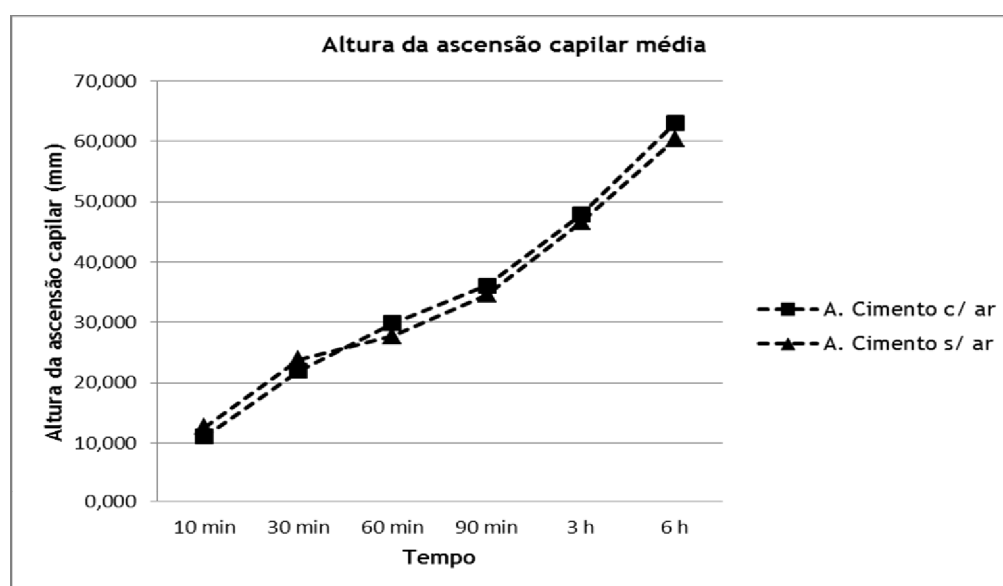


Figura 6.15: Altura da ascensão capilar das argamassas de cimento.

Como se pode ver na figura 6.15, a altura da ascensão capilar das argamassas com ar incorporado até 30 min é ligeiramente inferior a das argamassas sem ar incorporado, isto porque os poros de menores dimensões dão origem a menores velocidades iniciais de absorção mas a quantidade de água absorvida é maior [58]. Os poros pequenos são responsáveis pela resistência da ascensão capilar, justificando a menor ascensão capilar inicial da argamassa de cimento com ar incorporado.

6.2.2 - Absorção de água por capilaridade das argamassas geopoliméricas

Os resultados do ensaio de absorção capilar das argamassas geopoliméricas estão apresentados nas figuras 6.16 e 6.17. Os s provetes foram ensaiados aos 43 dias de idades.

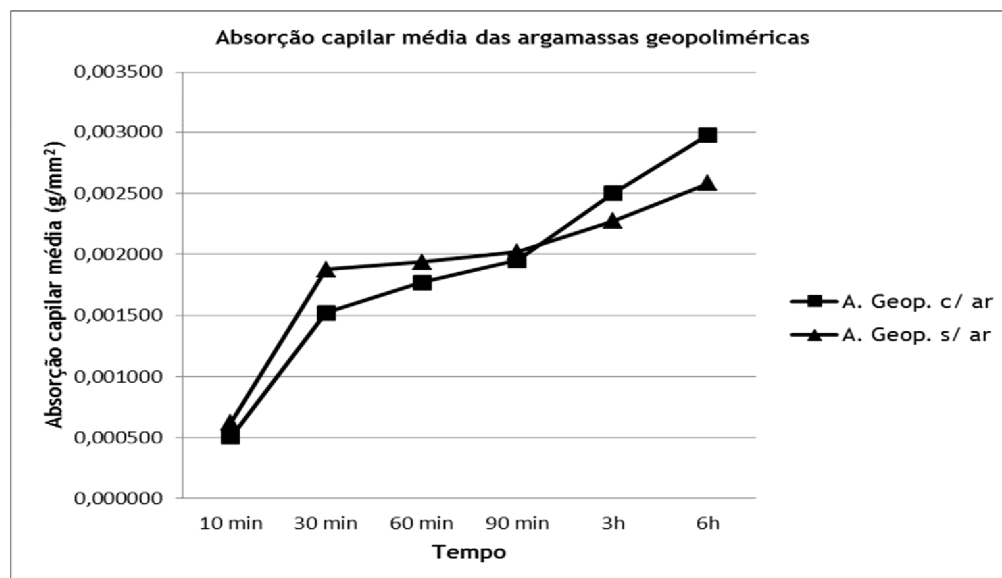


Figura 6.16: Absorção capilar das argamassas geopoliméricas.

Pode-se ver na figura 6.16, que a evolução da absorção capilar das argamassas geopoliméricas com ar na primeira hora e meia são inferiores as argamassas sem ar ao contrário do que acontece com as argamassas de cimento, e nas horas seguintes ocorre a mesma tendência que as argamassas cimento. Era de esperar este resultado, uma vez que as argamassas com ar incorporados apresentam trabalhabilidade um pouco melhor, tendo poros mais bem distribuído e de menor tamanho, enquanto que as argamassas sem ar incorporado apresentam poros maiores e em menor quantidade o que leva a um maior absorção inicial, que depois vai-se estabilizando devido a absorção de água pelos poros mais pequenos. Os coeficientes de absorção capilar das argamassas geopoliméricas são as seguintes:

$$C_{A. Geop. s/ar} = 0,1 \times (570,48 - 568,20) = 0,227 \text{ kg}/(\text{m}^2 \times \text{min}^{0.5})$$

$$C_{A. Geop. c/ar} = 0,1 \times (588,49 - 586,18) = 0,231 \text{ kg}/(\text{m}^2 \times \text{min}^{0.5})$$

Os coeficientes de absorção das argamassas geopoliméricas são idênticos, apesar de absorção capilar da argamassa sem ar incorporado ser ligeiramente superior nos instantes iniciais, e depois dos 30 minutos a absorção capilar não é tão acentuado como as argamassas com ar incorporados, fazendo aproximar os coeficientes.

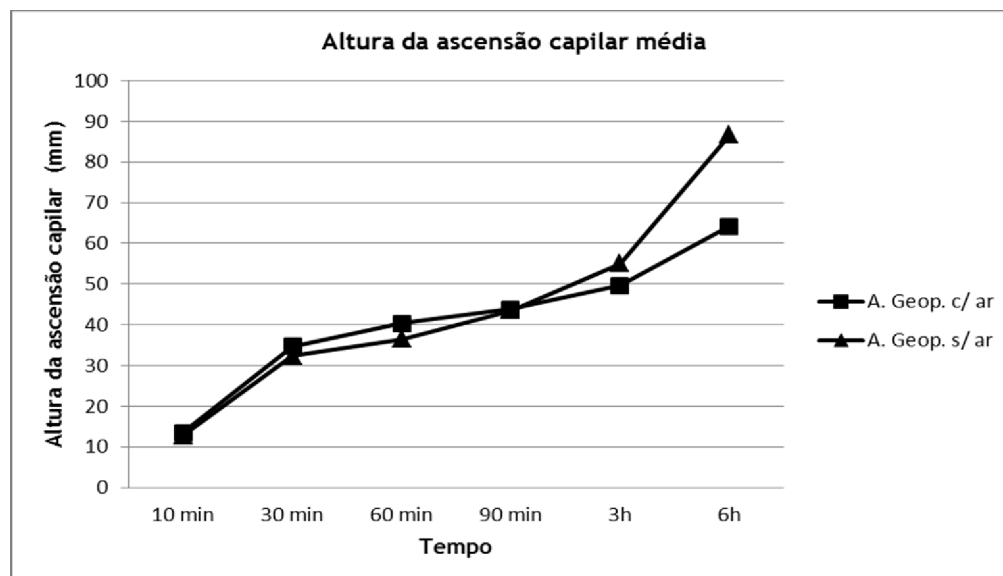


Figura 6.17: Altura da ascensão capilar das argamassas geopoliméricas.

A altura de ascensão capilar das argamassas geopoliméricas são ligeiramente diferentes, uma vez que as argamassas apresentam porosidade semelhante, maior ou menor altura dependendo da distribuição e tamanho dos poros.

6.3 - Porosidade e Massa Volúmica das argamassas

A porosidade é muito importante quando se fala de resistência térmica de um material, pois quanto mais poroso for melhor é a resistência térmica. A transferência de calor num material poroso é mais lenta, ou seja, o material tem grande capacidade de opor o calor que nela flui. Também tem uma grande influência nas propriedades físicas e mecânicas do material, principalmente a durabilidade.

6.3.1 - Porosidade e Massa volúmica das argamassas geopoliméricas

Nas tabelas 6.1 e 6.2 apresentam-se os resultados do cálculo da massa volúmica e porosidade das argamassas geopoliméricas.

Tabela 6.1: Massa volúmica das argamassas geopoliméricas.

Massa volúmica [Kg/m ³]			
A. Geop. com ar		A. Geop. sem ar	
A. G. 1	1953	A. G. 1	2115
A. G. 2	1978	A. G. 2	1965
A. G. 3	1811	A. G. 3	2145
A. G. 4	1961	A. G. 4	1478
A. G. 5	1802	A. G. 5	2171
A. G. 6	1830	A. G. 6	2082
Media	1889	Media	1993

Tabela 6.2: Porosidade aberta das argamassas geopoliméricas.

Porosidade Aberta [%]			
A. Geop. com ar		A. Geop. sem ar	
A. G. 1	17,10	A. G. 1	15,92
A. G. 2	15,96	A. G. 2	17,52
A. G. 3	24,00	A. G. 3	16,12
A. G. 4	16,73	A. G. 4	28,33
A. G. 5	24,67	A. G. 5	18,10
A. G. 6	23,14	A. G. 6	15,95
Média	20,27	Média	18,66

A porosidade aberta da argamassa geopolimérica com ar incorporado é ligeiramente superior a argamassa geopolimérica sem ar incorporada, a diferença é muito baixo, aproximadamente 2%, menos do que previsto. Com este resultado pode dizer que a argamassa geopolimérica por se só é porosa, e com a adição de introdutor de ar não a torna mais porosa que já é, mas sim tende a melhorar a distribuição dos poros na sua estrutura e torna-la mais densa.

6.3.2 - Porosidade e Massa volúmica das argamassas de cimento

Nas tabelas a seguir 6.4 e 6.5 apresentam-se os resultados do cálculo da massa volúmica e da porosidade.

Tabela 6.3: Massa volúmica das argamassas de cimento.

Massa volúmica [Kg/m ³]			
A. Cimento com ar		A. Cimento sem ar	
A. C. 1	1672	A. C. 1	1685
A. C. 2	1658	A. C. 2	1924
A. C. 3	1908	A. C. 3	1709
A. C. 4	1675	A. C. 4	1722
A. C. 5	1706	A. C. 5	1742
A. C. 6	1655	A. C. 6	1717
Média	1712	Média	1750

Tabela 6.4: Porosidade das argamassas de cimento.

Porosidade Aberta [%]			
A. Cimento com ar		A. Cimento sem ar	
A. C. 1	19,00	A. C. 1	19,06
A. C. 2	18,88	A. C. 2	17,60
A. C. 3	17,40	A. C. 3	17,86
A. C. 4	18,40	A. C. 4	17,55
A. C. 5	16,14	A. C. 5	17,75
A. C. 6	20,19	A. C. 6	17,89
Média	18,33	Média	17,95

A diferença da porosidade entre as duas argamassas é muito baixo, a percentagem do introdutor de ar utilizado teve pouca influência, não teve o efeito desejado que era aumentar a porosidade das argamassas de cimento. Quando comparadas as porosidades das argamassas de cimento e argamassas geopoliméricas vê-se que mesmo as argamassas geopoliméricas sem ar incorporados tem uma porosidade superior às das argamassas de cimento. Apesar da porosidade aberta não corresponder a porosidade total, mas estão relacionados da seguinte forma, quanto maior for a porosidade total, maior será a porosidade aberta. Era de esperar uma maior diferença de porosidade entre as argamassas, mas isto pode ser devido a compactação das argamassas, uma vez que as argamassas com ar incorporadas são mais fáceis de compactar e com isso uma maior quantidade de ar é expulsa da estrutura, principalmente no caso das argamassas geopoliméricas, diminuindo a porosidade [59].

As massas volúmicas das argamassas geopoliméricas com ar e sem ar incorporado são idênticas, uma vez que as porosidades também são idênticas. Quanto as argamassas de cimento acontecem o mesmo, com a diferença ainda menor.

6.4 - Propriedades térmicas das argamassas

A determinação das propriedades térmicas (resistência e condutibilidade térmica) das argamassas, principalmente as geopoliméricas, é muito importante para poder avaliar o seu comportamento térmico como revestimento.

6.4.1 - Resistência e condutibilidade térmica das argamassas de cimento

Os resultados obtidos da resistência e a condutibilidade térmica das argamassas de cimento, estão apresentados nas tabelas seguintes (6.5 e 6.6). Na tabela 6.5 apresentam-se as variações das temperaturas superficiais com as potências correspondentes.

Tabela 6.5: Variação de temperatura das argamassas de cimento.

Elemento	Tensão imposta [V]	Tensão medida [V]	Corrente [A]	Potência dissipada [W]	T Sup. [°C]	T Inf. [°C]	ΔT [°C]
A. Cimento com ar (1)	50	48,61	2,52	122,29	40,85	31,70	9,15
	55	53,64	2,77	148,76	45,55	34,95	10,60
	60	58,69	3,03	178,07	50,75	38,35	12,40
	65	63,19	3,26	206,24	55,75	41,65	14,10
	70	67,54	3,49	235,45	60,25	44,95	15,30
A. Cimento sem ar (2)	50	48,61	2,52	122,29	42,25	33,45	8,80
	55	53,64	2,77	148,76	47,45	37,15	10,30
	60	58,69	3,03	178,07	52,95	41,05	11,90
	65	63,19	3,26	206,24	58,45	44,95	13,50
	70	67,54	3,49	235,45	62,80	48,225	14,58

Na tabela 6.6 apresentam-se os resultados obtidos da resistência e condutibilidade térmica das argamassas de cimento.

Tabela 6.6: Resistência e condutibilidade térmica das argamassas de cimento.

Elemento	Potência dissipada [W]	Fluxo de calor [q"]	Resistência térmica [R _t]	Condutibilidade térmica [λ]
A. Cimento com ar (1)	122,29	291,17	0,0314	0,9546
	148,75	354,18	0,0299	1,0024
	178,07	423,97	0,0292	1,0257
	206,24	491,05	0,0287	1,0448
	235,45	560,60	0,0273	1,0992
A. Cimento sem ar (2)	122,29	291,17	0,0302	0,9926
	148,75	354,18	0,0291	1,0316
	178,07	423,97	0,0281	1,0688
	206,24	491,05	0,0275	1,0912
	235,45	560,60	0,0260	1,1539

Para melhor percepção da evolução da resistência e da condutibilidade térmica das argamassas de cimento com o aumento da potência fizeram-se dois gráficos, um ilustrando a evolução da resistência térmica e outro a condutibilidade térmica (figura 6.18 e 6.19 respectivamente).

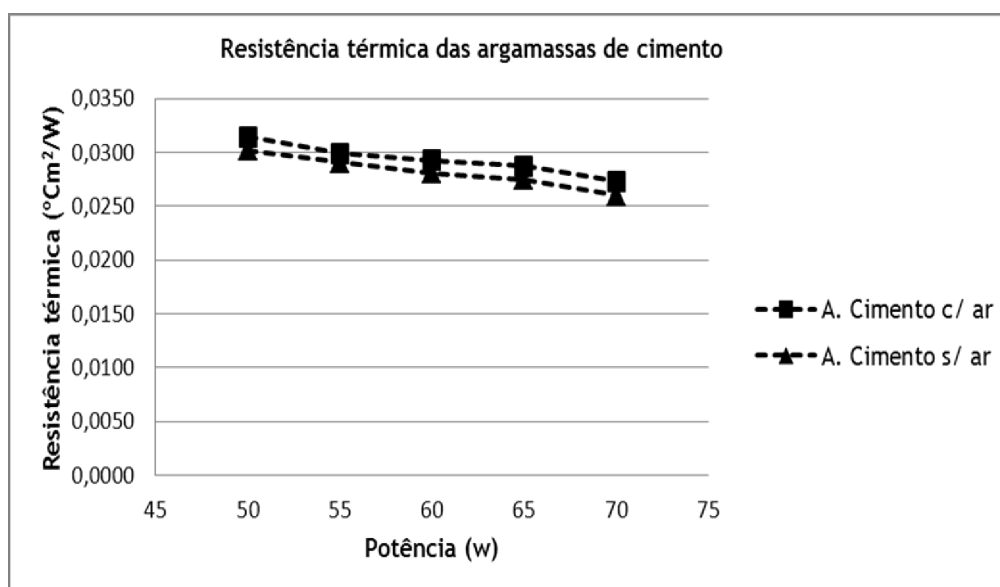


Figura 6.18: Resistência térmica das argamassas de cimento.

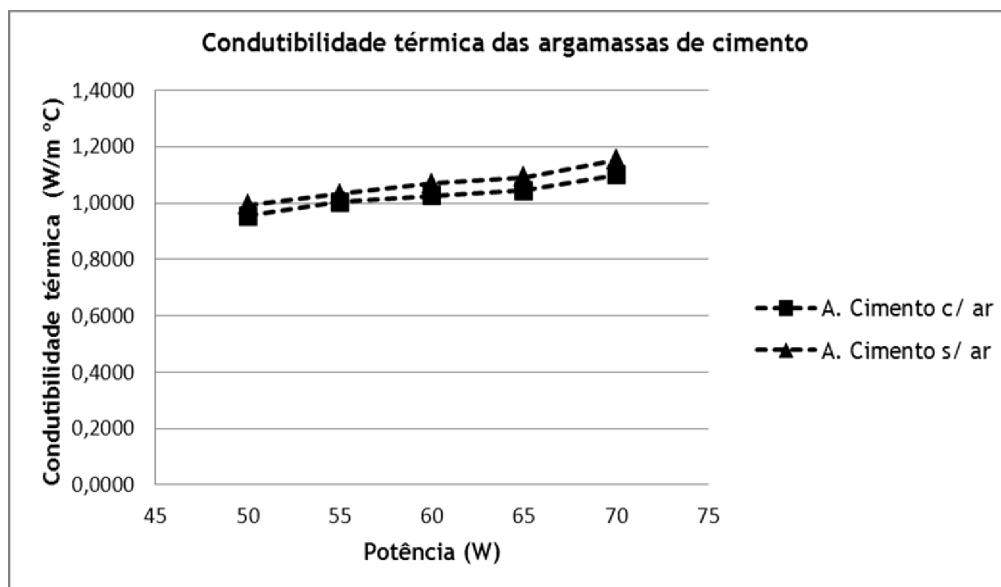


Figura 6.19: Condutibilidade térmica das argamassas de cimento.

A resistência térmica da argamassa de cimento com ar incorporado é ligeiramente superior que a argamassa de cimento sem ar para as deferentes potências, isto deve ao facto de a argamassa com ar ser mais porosa, e a transmissão de calor é inferior. Como se pode ver na tabela 6.6 a argamassa sem ar incorporado tem menos capacidade de se opor a transferência de calor. Como a condutibilidade térmica das argamassas de cimento é o inverso da resistência térmica, quando maior é a resistência térmica menor será a sua condutibilidade térmica.

6.4.2 - Resistência e condutibilidade térmica das argamassas geopoliméricas

Os resultados obtidos dos ensaios térmicos estão apresentados nas tabelas seguintes. Na tabela 6.7 apresenta-se a variação das temperaturas superficiais com as respectivas potências.

Tabela 6.7: Variação de temperatura das argamassas geopoliméricas.

Elemento	Tensão imposta [V]	Tensão medida [V]	Corrente [A]	Potência dissipada [W]	T Sup. [°C]	T Inf. [°C]	ΔT [°C]
A. Geopolimérica com ar	50	51,69	2,68	138,68	46,60	34,30	12,30
	55	56,73	2,94	166,56	51,80	37,60	14,20
	60	61,21	3,16	193,11	57,00	41,20	15,80
	65	66,05	3,43	226,47	63,10	45,20	17,90
	70	70,40	3,63	255,19	67,40	48,00	19,40
A. Geopolimérica sem ar	50	51,69	2,68	138,68	45,20	34,20	11,00
	55	56,73	2,94	166,56	50,60	37,60	13,00
	60	61,21	3,16	193,11	55,50	41,35	14,15
	65	66,05	3,43	226,47	60,65	45,55	15,10
	70	70,40	3,63	255,19	65,30	48,30	17,00

Nota-se que a diferença da variação das temperaturas superficiais das argamassas geopoliméricas é superior quando comparado com a variação da temperatura superficial das argamassas de cimento.

Tabela 6.8: Resistência e condutibilidade térmica das argamassas geopoliméricas.

Elemento	Potência dissipada [W]	Fluxo de calor [q"]	Resistência térmica [R _t]	Condutibilidade térmica [λ]
A. Geopolimérica com ar	138,68	330,18	0,0373	0,8053
	166,56	396,57	0,0358	0,8378
	193,10	459,77	0,0344	0,8730
	226,47	539,22	0,0332	0,9037
	255,19	607,59	0,0319	0,9396
A. Geopolimérica sem ar	138,68	330,18	0,0333	0,9005
	166,56	396,57	0,0328	0,9152
	193,10	459,77	0,0308	0,9748
	226,47	539,22	0,0280	1,0713
	255,19	607,59	0,0280	1,0722

Apresentam-se nas figuras 6.20 e 6.21 a evolução da resistência e condutibilidade térmica das argamassas geopoliméricas.

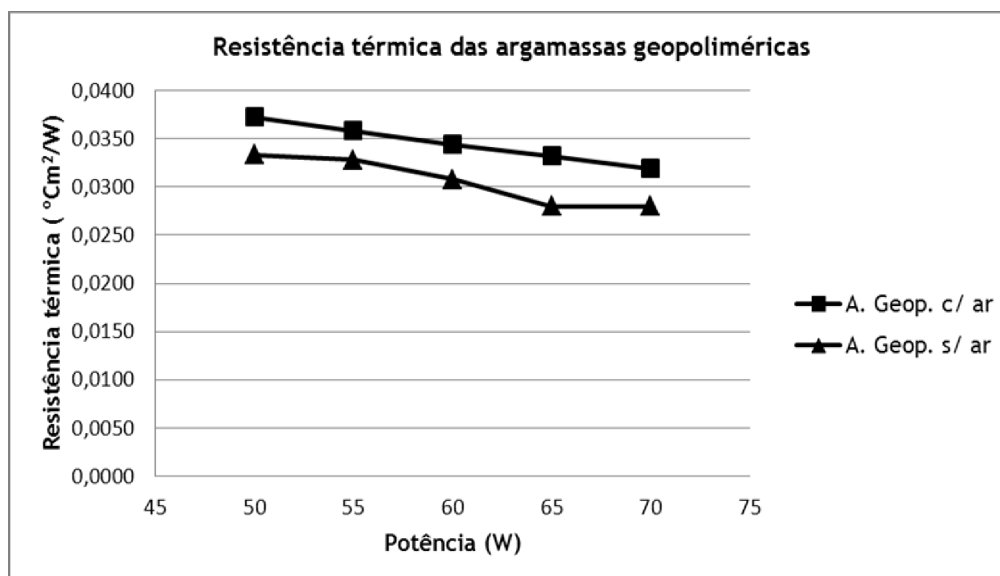


Figura 6.20: Resistência térmica das argamassas geopoliméricas.

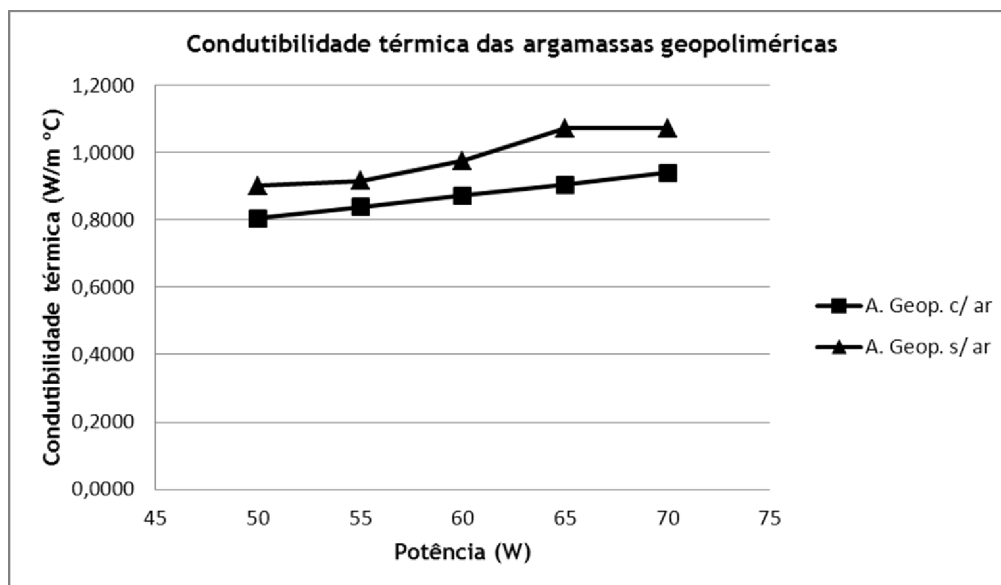


Figura 6.21: Condutibilidade térmica das argamassas geopoliméricas.

As variações da temperatura superficial da argamassa geopolimérica com ar para as diferentes potências são superiores quando comparados com a argamassa geopolimérica sem ar. Esta diferença é causada pelo introdutor de ar que aumenta um pouco a trabalhabilidade, ficando a argamassa mais densa e com os poros mais bem distribuídos, mas que conduz a uma menor transferência de calor. Quanto maior é a diferença da temperatura superficial maior será a resistência térmica.

A partir dos resultados obtidos no ensaio térmico das duas argamassas, fez-se a comparação da resistência e da condutibilidade térmica das duas argamassas. Nas figuras seguintes estão apresentadas essas comparações.

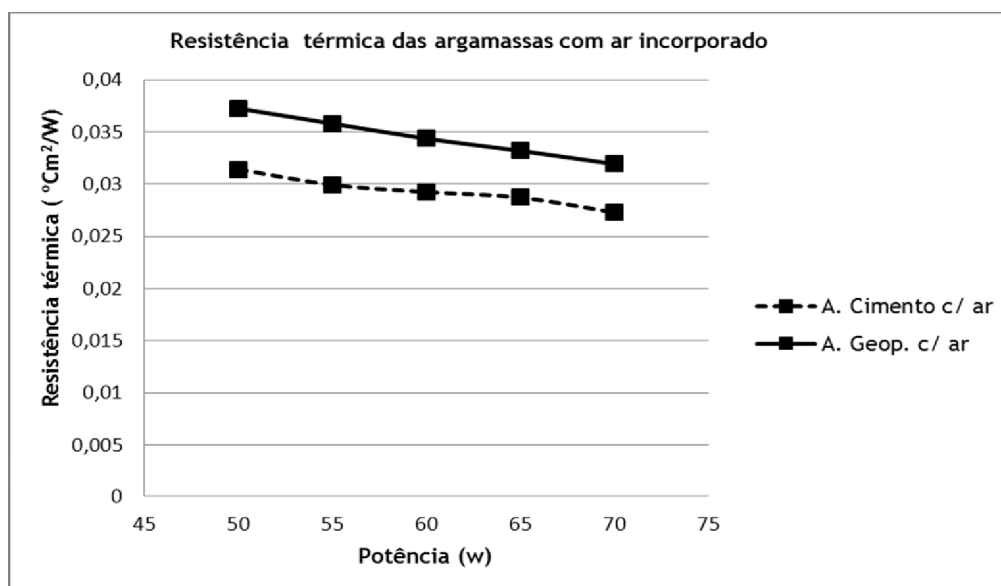


Figura 6.22: Comparação da resistência térmica das argamassas com ar incorporado.

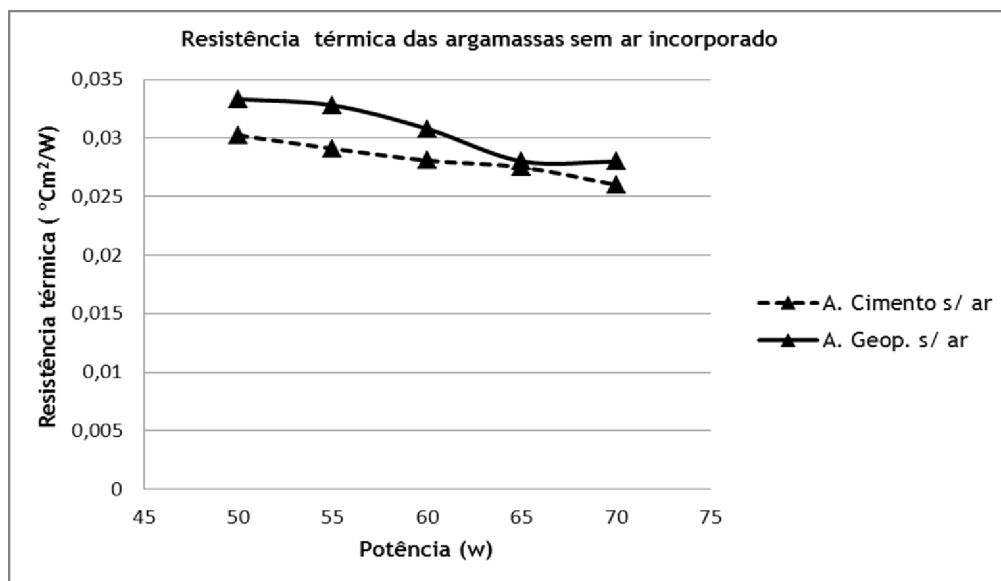


Figura 6.23: Comparação da resistência térmica das argamassas sem ar incorporado.

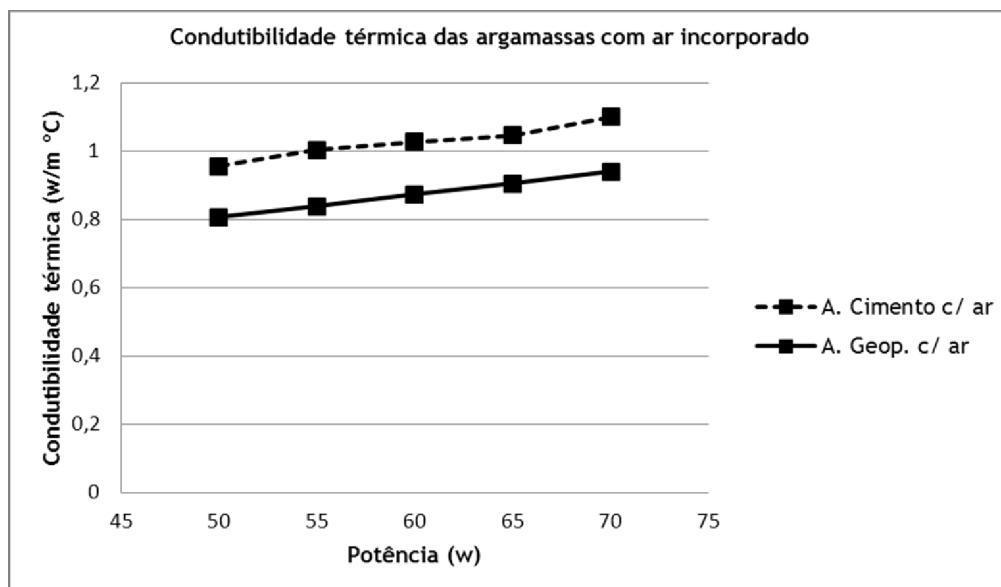


Figura 6.24: Comparação da condutibilidade térmica das argamassas com ar incorporado.

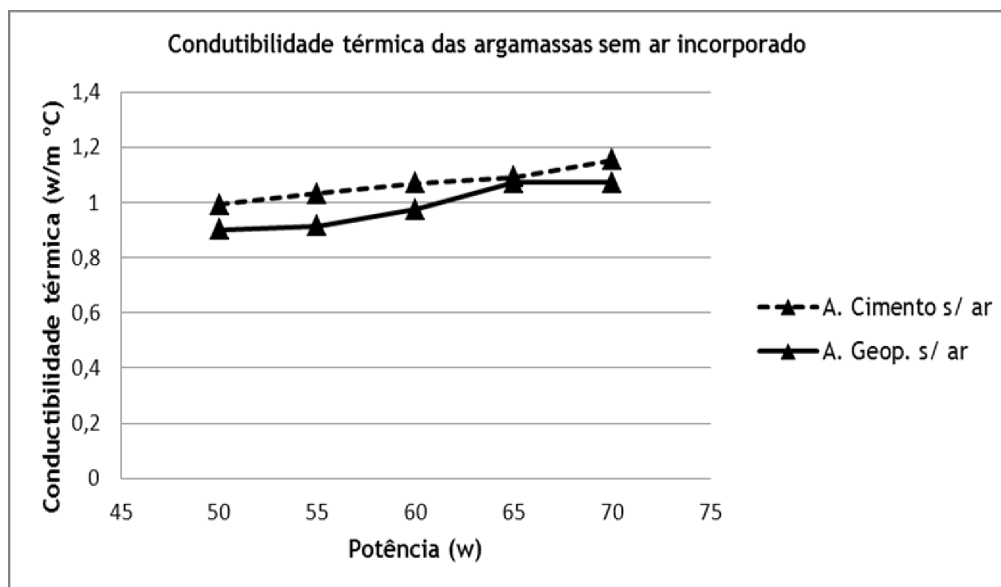


Figura 6.25: Comparação da condutibilidade térmica das argamassas sem ar incorporado.

Analisando as figuras conclui-se que as argamassas geopoliméricas apresentam melhores valores de resistência térmica do que as argamassas de cimento, mesmo quando comparando as argamassas geopoliméricas sem ar com as argamassas de cimento com ar incorporado.

6.4.3 - Termografia por infravermelhos das argamassas

O ensaio de termografia por infravermelho foi feito para verificar a evolução da temperatura superficial das argamassas em tempo real. Este ensaio permite também ter uma ideia da diferença de temperatura superficial entre as argamassas, permitindo comparar os desempenhos.

Na figura 6.26 ilustra a termografia por infravermelho da fonte de aquecimento, e nota-se que a distribuição de temperatura é uniforme em toda placa.

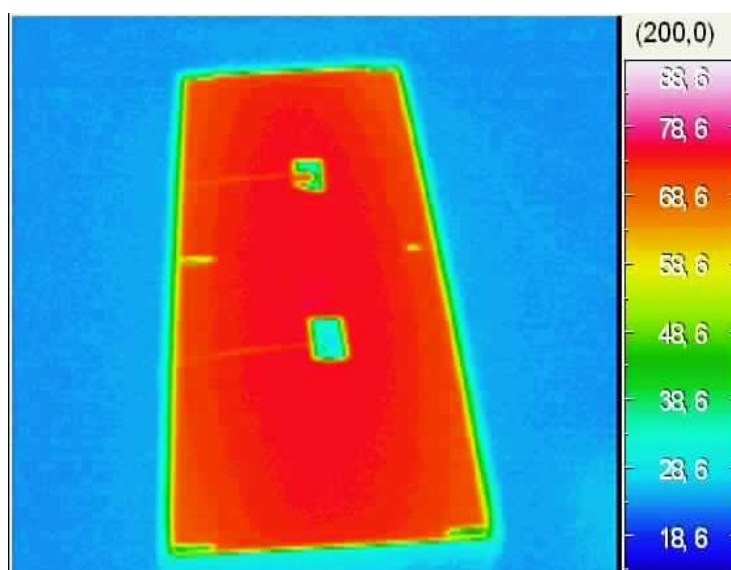


Figura 6.26: Termografia da fonte quente.

A figura 6.27 ilustra a termografia por infravermelhos das argamassas geopoliméricas. Nota-se que a diferença de desempenho entre as duas placas de argamassas indicia um menor valor de resistência térmica quando o ar é incorporado, contrariando os resultados do ensaio anteriormente observado. Fez-se a medição da temperatura superficial com a ajuda de termopar durante este ensaio para confirmar a temperatura indicada, e com isso verificou-se que temperatura indicada pela termografia não corresponde com a temperatura superficial. A argamassa com ar incorporado apresenta menor temperatura superficial.

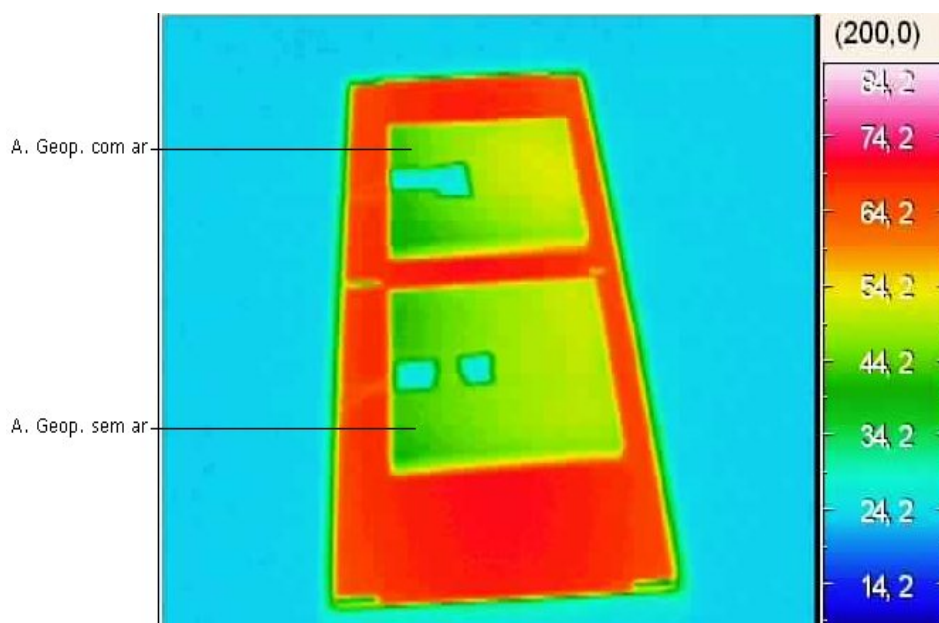


Figura 6.27: Termografia das argamassas geopoliméricas.

Na figura 6.28 apresenta-se o ensaio da termografia por infravermelho das argamassas de cimento. As temperaturas superficiais indiciam a um melhor desempenho da argamassa com ar incorporado, confirmando os resultados obtidos no ensaio.

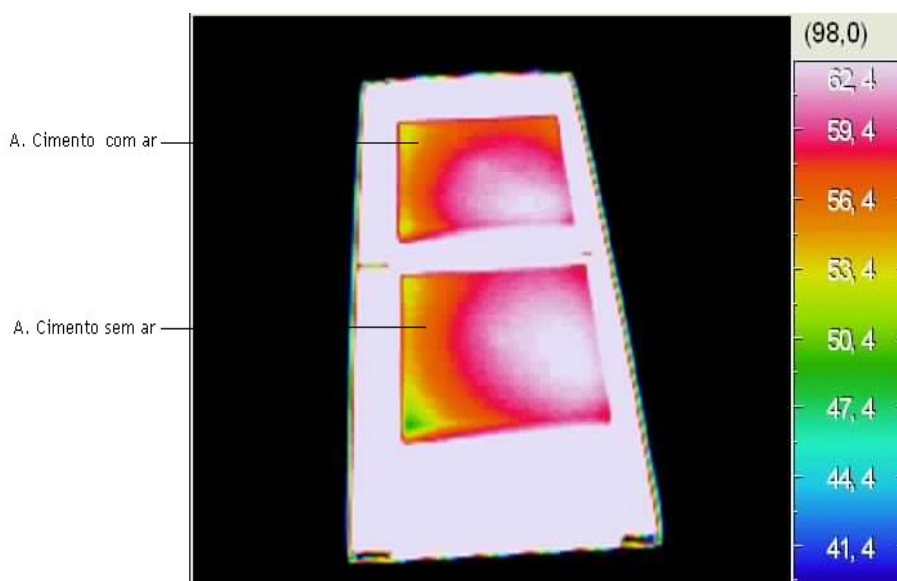


Figura 6.28: Termografia das argamassas de cimento.

Para uma percepção melhor do desempenho das argamassas sem ar incorporado, fez-se uma termografia comparando-as. A figura 6.29 ilustra a termografia por infravermelhos das argamassas.

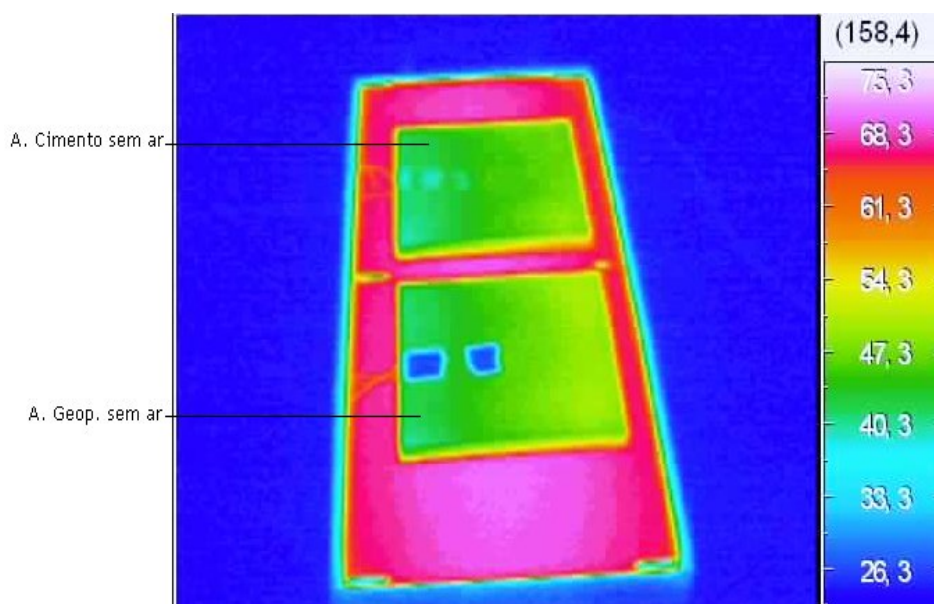


Figura 6.29: Termografia das argamassas sem ar incorporado.

A termografia ilustrada na figura 6.29 indicia um menor desempenho da argamassa geopolimérica, no entanto é necessário ter em atenção para uma correcta interpretação das imagens termográficas, que as duas placas apresentam valores de emissividade diferentes. Este facto foi verificado ao comparar as temperaturas indicadas pelo equipamento termografia com as medições locais de temperatura com o recurso a termopares. Acresce o facto de as placas não serem igualmente planas o que prejudica o contacto entre as placas e a superfície aquecedora.

6.5 - Caracterização das argamassas segundo EN 998 - 1 e CSTB - MERUC

A norma EN 998 - 1 [60], define a nível europeu, as especificações para argamassas para revestimento, no que respeita a rebocos para aplicação em paramentos interiores e exteriores. Na referida norma, são apresentadas as propriedades da argamassa no estado fresco e endurecido. Na Tabela 6.9 são apresentados os requisitos exigidos para as argamassas de revestimento no estado endurecido, em função das suas propriedades físicas, mecânica e térmica.

Tabela 6.9: Classificação das propriedades das argamassas endurecidas (EN 998-1).

	Categorias	Valores
Intervalo de resistência à compressão a 28 dias	CS I	0,4 a 2,5 N/mm ²
	CS II	1,5 a 5 N/mm ²
	CS III	3,5 a 7,5 N/mm ²
	CS IV	> 6 N/mm ²
Absorção de água por capilaridade	W0	Não especificado
	W1	$C \leq 0,40 \text{ Kg/m}^2 \cdot \text{min}^{0.5}$
	W2	$C \leq 0,2 \text{ Kg/m}^2 \cdot \text{min}^{0.5}$
Condutibilidade térmica	T1	$\leq 0,1 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$
	T2	$\leq 0,2 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$

A CSTB criou a Classificação MERUC [61] para distinguir as argamassas segundo as suas propriedades, em que essas propriedades possuem critérios de desempenho que são divididos em seis classes (ver tabela 6.10), onde:

M - Densidade de massa no estado endurecido [kg/dm³];

E - Módulo de deformação [MPa];

R - Resistência à tracção na flexão [MPa];

U - Retenção de humidade (água) [%];

C - Coeficiente de capilaridade [g/dm²/min^{1/2}].

Tabela 6.10: Classificação das argamassas para revestimento (CSTB).

Classes	M	E	R	U	C
	kg/dm ³	MPa	MPa	%	g/dm ² · min ^{1/2}
1	< 1,2	< 5.000	< 1,5	< 78	< 1,5
2	1,0 a 1,4	3.500 a 7.000	1,2 a 2,0	75 a 85	1,0 a 2,5
3	1,2 a 1,6	5.000 a 10.000	1,5 a 2,5	82 a 90	2,0 a 4,0
4	1,4 a 1,8	7.500 a 14.000	2,0 a 3,2	88 a 94	3,0 a 7,0
5	1,6 a 2,0	12.000 a 20.000	2,7 a 4,0	92 a 97	5,0 a 12,0
6	> 2,0	> 16.000	> 3,4	96 a 100	> 10,0

Os condicionantes que limitam o uso do tipo de argamassas são as seguintes:

- Tipo de exposição da parede do envelope da edificação;
- Condições atmosféricas;
- Tipo de revestimento de acabamento, decorativo;

Em relação ao tipo de exposição da parede, as argamassas devem ter as seguintes classificações:

- Forte exposição à chuva (C1 ou C2)
- Exposição a choques e deterioração ($E \geq 3$ e $R \geq 3$)
- Parede enterrada ($M \geq 4$, $R \geq 3$ e $C \leq 2$)

Em relação condições atmosférica e tipo de revestimento, as argamassas devem ter as seguintes classificações:

- Clima quente ou vento (U5 ou U6)
- Clima frio (M5 ou M6)
- Cerâmico ($E \geq 4$ e $R \geq 4$)

6.5.1 Classificação das argamassas segundo a norma EN 998 - 1

A partir dos resultados obtidos dos ensaios realizados, a classificação das argamassas foram as seguintes (tabela 6.11):

Tabela 6.11: Classificação das argamassas segundo a norma EN 998-1.

Argamassas	R_c [MPa]	C [$\text{kg}/(\text{m}^2 \times \text{min}^{0.5})$]	Classificação
A. de cimento s/ ar	21,50	0,0781	CS IV; W2
A. de cimento c/ ar	12,92	0,0906	CS IV; W2
A. geopolimérica s/ ar	11,15	0,0227	CS IV; W2
A. geopolimérica c/ ar	15,60	0,0231	CS IV; W2

Como pode ver na tabela 6.11, as argamassas em estudo pertencem a mesma classe, em termos de absorção, a mais exigente, e de resistência à compressão, a mais elevada. Os valores apresentados na tabela 6.11 correspondem ao ensaio aos 28 dias. Segundo a EN 998-1 (tabela 2) estas argamassas não possuem requisitos para serem aplicados como revestimentos/rebocos ligeiros, isolamento térmico e renovação, uma vez que as classes à compressão requeridas variam entre CS I e CS II, que corresponde a uma classe mais baixa. Quanto à absorção capilar a classe requerida para isolamento térmico é a classe W1.

6.5.2 - Classificação das argamassas segundo a CSTB - MERUC

A seguir apresenta - se a tabela de classificação CSTB - MERUC.

Tabela 6.12: Classificação das argamassas segundo CSTB - MERUC.

Argamassas	Densidade [Kg/m ³]	R _T [MPa]	C [g/(dm ² x min ^{0.5})]	Classificação
A. de cimento s/ ar	1750	7,75	0,781	C1; R6; M5
A. de cimento c/ ar	1712	5,50	0,906	C1; R6; M5
A. geopolimérica s/ ar	1993	7,38	0,227	C1; R6; M5
A. geopolimérica c/ ar	1889	9,25	0,231	C1; R6; M5

Segundo a CSTB - MERUC, as argamassas apresentam as mesmas classificações para resistência à tracção na flexão, coeficiente de absorção capilar e para massa volúmica.

Segundo as classificações CSTB - MERUC e EN 998-1, as argamassas podem ser empregues em qualquer das condições descrita anteriormente sem qualquer limitação, uma vez que respeitam todos os condicionantes.

CAPÍTULO 7 - Conclusões finais

7.1 - Conclusões finais	92
7.2 - Investigações futuras	93

7.1 - Conclusões finais

Pretendeu-se com este trabalho avaliar as propriedades físicas de uma argamassa geopolimérica, para a aplicação em paredes de edifícios contribuindo para a melhoria do desempenho energético da envolvente. Para além da avaliação do comportamento térmico, também foram avaliadas as suas propriedades físico-mecânicas para verificar a sua aplicabilidade.

Neste capítulo apresenta-se as conclusões tiradas ao longo do presente trabalho.

No estudo realizado sobre os constituintes verificou-se que a lama residual das minas da Panasqueira utilizada no presente trabalho apresenta composição química um pouco diferente da lama utilizada por Fernando Torgal [1]. Não foram detectados alguns óxidos, tais como Cu e As, como anteriormente. Estes dois óxidos são metais pesados contaminantes da lama. Esta é rica em sílica e alumina e também tem uma boa percentagem de óxido de ferro que, segundo Xu et. al. é um dos elementos que contribui de forma significativa para a resistência à compressão dos ligantes do tipo geopolimérico.

O tratamento térmico das lamas a temperatura de 800°C durante 2h no forno estático (mufla) com objectivo de aumentar a sua reactividade, por via de desidroxilação estrutural, teve o efeito desejado, aumentando de forma significativa a sua reactividade e consequentemente o aumento da resistência mecânica.

A superfície específica (finura) da lama residual, no seu estado natural, é baixa, e para a aumentar fez-se um estudo de qual seria a melhor forma. O estudo baseia-se sobretudo na moagem da lama antes e depois de calcinação, tendo-se verificado que a lama natural moída durante 6h apresenta um aumento da superfície específica, que depois quando calcinada durante 2h volta a diminuir devido à sua aglutinação durante o tratamento térmico. Verificou-se ainda que a melhor forma de aumentar a superfície específica e aumentar a reactividade é calcinar e depois moer. Também a partir das imagens microscópicas e da análise granulométrica das lamas chega-se a mesma conclusão.

Verificou-se que a reactividade e a resistência mecânica das argamassas são afectadas com a granulometria da areia. No caso da areia com maior percentagem de partículas grossas misturada com o precursor de finura elevada, o geopolímero resultante apresenta boa resistência mecânica. Também quando ambos apresentam elevado índice de finura o geopolímero resultante apresenta boas características mecânicas, mas foi necessário adicionar mais água e activadores para manter a mesma trabalhabilidade.

Nos estudos realizados com as argamassas, chegaram-se as seguintes conclusões:

- A quantidade de introdutor de ar utilizado com objectivo de aumentar a porosidade das argamassas não teve o efeito desejado, uma vez que a diferença da porosidade entre as

argamassas com e sem ar foi pequena. Isto pode ser devido a dois motivos: a quantidade de introdutor de ar utilizado foi pequena, e/ou ter havido excesso de compactação.

- A trabalhabilidade aumenta com a incorporação de ar, mas não de forma significativo. A adição de água melhora de forma mais eficaz a trabalhabilidade, mas essa adição de água deve ser feita de forma a não aumentar muito a razão H_2O/Na_2O para não interferir nas propriedades mecânicas.
- As argamassas geopoliméricas apresentaram elevada resistência mecânica, principalmente nas idades iniciais. A evolução da resistência à compressão das argamassas geopoliméricas ao longo do tempo não foi tão acentuada como as de argamassas de cimento. No entanto pensa-se que tal pode ser superado com a diminuição da razão H_2O/Na_2O e com o aumento da concentração de hidróxido de sódio, como já verificados por outros autores. Em relação a resistência à flexão, as argamassas geopoliméricas apresentam melhores resultados do que as argamassas de cimento Portland.
- Em termos de absorção capilar as argamassas geopoliméricas apresentam um coeficiente de absorção capilar relativamente baixo.
- As argamassas geopoliméricas apresentam uma boa resistência térmica, melhores que as argamassas de cimento. E essa resistência pode ser ainda melhorada com o aumento de % de ar incorporado.
- Segundo a norma EN 998-1 e CSTB - MERUC, as argamassas estudadas possuem boas propriedades para serem aplicados como revestimento.

7.2 - Investigações futuras

Como se pode perceber durante a realização do presente trabalho há alguns aspectos que necessitam de estudos mais aprofundados tais como:

- Influência da granulometria da areia na reactividade do geopolímero.
- Formas de aumentar a trabalhabilidade, por meio de superplastificantes ou outro tipo aditivo.
- Estabilidade térmica das argamassas quando exposto a elevadas temperatura.
- Influência da utilização de outros tipos de activadores alcalinos e adição de outros tipos de materiais como cinzas entre outros.

Bibliografia

- [1] Torgal, Fernando M. A. S. P. (2006). “DESENVOLVIMENTO DE LIGANTES OBTIDOS POR ACTIVACÃO ALCALINA DE LAMAS RESIDUAIS DAS MINAS DA PANASQUEIRA”, Tese de Doutoramento, Departamento de Engenharia Civil e Arquitectura da Universidade da Beira Interior.
- [2] Fletcher Ross, Catherine Nicholson, Neville Miller, Clive Stirling, Jon Morris, Steve Hodges, Kenneth MacKenzie, and Martin Schmücker. “BUILDING INNOVATION THROUGH GEOPOLYMER TECHNOLOGY”, Chemistry in New Zealand September 2005.
- [3] Davidovits, Joseph (1994). “PROPERTIES OF GEOPOLYMER CEMENTS”, Alkaline cements and Concretes, Kiev-Ukraine.
- [4] Osório, Paulo Dias Lopes (2006). “CONCEPÇÃO DE UM SAFEROOM ANTI - TORNADO EM BETÃO GEOPOLIMÉRICO”, Tese de Mestrado em Engenharia civil, Universidade do Minho.
- [5] Sepúlveda, Jacinto. “<http://engenhariacivil.wordpress.com/2007/07/03/geopolimeros/>”.
- [6] Mendonça, Carlos M. D. (2007). “ACTIVAÇÃO ALCALINA E INERTIZAÇÃO DE RESÍDUOS INDUSTRIAIS”, Tese de Mestrado em Gestão Ambiental, Materiais e valorização de Resíduos, Departamento de Engenharia Cerâmica e do Vidro da Universidade de Aveiro.
- [7] Davidovits, Joseph (2002). “30 YEARS OF SUCCESSES AND FAILURES IN GEOPOLYMER APPLICATIONS. MARKET TRENDS AND POTENTIAL BREAKTHROUGHS”, Geopolymer Conference, October 2002, Melbourne - Australia.
- [8] Teixeira Pinto, A. “NOVOS SISTEMAS LIGANTES OBTIDOS POR ACTIVACÃO ALCALINA (GEOPOLIMERIZAÇÃO) ”, Construção Magazine.
- [9] www.geopolimero.com.br
- [10] Pavel Rovnaník (2010). “EFFECT OF CURING TEMPERATURE ON THE DEVELOPMENT OF HARD STRUCTURE OF METAKAOLIN-BASED GEOPOLYMER”, Construction and Building Materials 24 (2010) 1176-1183.
- [11] Peter Duxson, Grant C. Lukey, and Jannie S. J. van Deventer (2006). “THERMAL CONDUCTIVITY OF METAKAOLIN GEOPOLYMERS USED AS A FIRST APPROXIMATION FOR DETERMINING GEL INTERCONNECTIVITY”, Materials and Interfaces - Ind. Eng. Chem. Res. 2006, 45, 7781-7788.
- [12] Xiaolu Guo, Huisheng Shi, Warren A. Dick (2010). “COMPRESSIVE STRENGTH AND MICROSTRUCTURAL CHARACTERISTICS OF CLASS C FLY ASH GEOPOLYMER”, Cement & Concrete Composites 32 (2010) 142-147.

- [13] Peter Duxson, Grant C. Lukey, Jannie S.J. van Deventer (2006). "THERMAL EVOLUTION OF METAKAOLIN GEOPOLYMERS: PART 1 - PHYSICAL EVOLUTION", *Journal of Non-Crystalline Solids* 352 (2006) 5541-5555.
- [14] Maurice Guerrieri and Jay G. Sanjayan (2010). "BEHAVIOR OF COMBINED FLY ASH /SLAG-BASED GEOPOLYMERS WHEN EXPOSED TO HIGH TEMPERATURES", *Fire and Materials - fire mater.* 2010; 34:163-175.
- [15] J. W. Phair and J. S. J. van Deventer (2002). "CHARACTERIZATION OF FLY-ASH-BASED GEOPOLYMERIC BINDERS ACTIVATED WITH SODIUM ALUMINATE", *Ind. Eng. Chem. Res.* 2002, 41, 4242-4251.
- [16] J. Temuujin, R.P. Williams, A. Van Riessen (2009). "EFFECT OF MECHANICAL ACTIVATION OF FLY ASH ON THE PROPERTIES OF GEOPOLYMER CURED AT AMBIENT TEMPERATURE", *Journal of Materials Processing Technology* 209 (20 09) 5276-5280.
- [17] Jixing Xie, Jie Yin, Junjing Chen, Jianzhong Xu (2009). "STUDY ON THE GEOPOLYMER BASED ON FLY ASH AND SLAG", *International Conference on Energy and Environment Technology*.
- [18] A. Fernandez-Jimenez, I. García-Lodeiro, A. Palomo (2007). "DURABILITY OF ALKALI-ACTIVATED FLY ASH CEMENTITIOUS MATERIALS", *Advances in geopolymer science & technology - J Mater Sci* (2007) 42:3055-3065.
- [19] William D. A. Rickard and Arie van Riessen (2010). "THERMAL CHARACTER OF GEOPOLYMERS SYNTHESIZED FROM CLASS F FLY ASH CONTAINING HIGH CONCENTRATIONS OF IRON AND ALUMINA", *Int. J. Appl. Ceram. Technol.*, 7 [1] 81-88 (2010).
- [20] Tatiana Bakharev, Jay Gnananandan Sanjayan, Yi-Bing Cheng (1999). "ALKALI ACTIVATION OF AUSTRALIAN SLAG CEMENTS", *Cement and Concrete Research* 29 (1999) 113-120.
- [21] Jadambaa Temuujin, Amgalan Minjigmaa, William Rickard, Melissa Lee, Iestyn Williams, Arie van Riessen (2009). "PREPARATION OF METAKAOLIN BASED GEOPOLYMER COATINGS ON METAL SUBSTRATES AS THERMAL BARRIERS", *Applied Clay Science* 46 (2009) 265 -270.
- [22] Guangren Qian, Darren Delai Sun, Joo Hwa Tay (2003). "IMMOBILIZATION OF MERCURY AND ZINC IN AN ALKALI-ACTIVATED SLAG MATRIX", *Journal of Hazardous Materials B101* (2003) 65-77.
- [23] František Škvára, Josef Doležal, Pavel Svoboda, Lubomír Kopecký, Simona Pawlasová, Martin Lucuk, Kamil Dvořáček, Martin Beksa, Lenka Myšková, Rostislav Šulc. "CONCRETE BASED ON FLY ASH GEOPOLYMERS", *Mechanical and engineering properties of geopolymers materials based on alkali activated ashes - CEZ: MSM 6046137302*.

[24] P. Duxson, S.W. Mallicoat, G.C. Lukey, W.M. Kriven, J.S.J. van Deventer (2007). "THE EFFECT OF ALKALI AND SI/AL RATIO ON THE DEVELOPMENT OF MECHANICAL PROPERTIES OF METAKAOLIN-BASED GEOPOLYMERS", *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects* 292 (2007) 8-20.

[25] Peter Duxson, Grant C. Lukey, Jannie S. J. van Deventer (2007). "PHYSICAL EVOLUTION OF NA-GEOPOLYMER DERIVED FROM METAKAOLIN UP TO 1000 C", *Advances in geopolymer science & technology - J Mater Sci* (2007) 42:3044-3054.

[26] T. W. Cheng and J. P. Chiu (2003). "FIRE-RESISTANT GEOPOLYMER PRODUCED BY GRANULATED BLAST FURNACE SLAG", *Minerals Engineering* 16 (2003) 205-210.

[27] Alexandre Silva de VARGAS, Denise C. C. Dal MOLIN, António C. F. VILELA, Said JALALI, João Paulo Castro GOMES (2007). "CINZAS VOLANTES ÁLCALI-ATIVADAS COM SOLUÇÃO COMBINADA DE NAOH E CA(OH)₂", *Revista Matéria*, v. 12, n. 3, pp. 462 - 469, 2007.

[28] Suresh Thokchom, Dr. Partha Ghosh and Dr. Somnath Ghosh (2009). "ACID RESISTANCE OF FLY ASH BASED GEOPOLYMER MORTARS", *International Journal of Recent Trends in Engineering*, Vol. 1, No. 6, May 2009.

[29] Torgal, Fernando M. A. S. Pacheco, J. P. Castro-Gomes, Said Jalali (2005). "TRATAMENTO TÉRMICO DAS LAMAS RESIDUAIS DAS MINAS DA PANASQUEIRA: INFLUÊNCIA DO TEMPO E DA TEMPERATURA DE CALCINAÇÃO", *Conferência Engenharia 2005 - Inovação e Desenvolvimento: actas*. Universidade da Beira Interior, 2005.

[30] Torgal, Fernando M. A. S. Pacheco, J. P. Castro-Gomes, Said Jalali (2007). "LIGANTES OBTIDOS POR ACTIVAÇÃO ALCALINA DE LAMAS RESIDUAIS DAS MINAS DA PANASQUEIRA. PARTE 1. PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS", *Congresso Construção 2007 - 3º Congresso Nacional*, Universidade de Coimbra, Dezembro 2007.

[31] Torgal, Fernando M. A. S. Pacheco, J. P. Castro-Gomes, Said Jalali (2008). "INVESTIGAÇÃO SOBRE A EVOLUÇÃO DA RESISTÊNCIA EM ARGAMASSAS GEOPOLIMÉRICAS À BASE DE LAMAS RESIDUAIS DAS MINAS DA PANASQUEIRA", *Engenharia civil*. ISSN 0873-1152. 32 (2008) 5-14, Universidade do Minho.

[32] Torgal, Fernando M. A. S. Pacheco, J. P. Castro-Gomes, Said Jalali (2007). "LIGANTES OBTIDOS POR ACTIVAÇÃO ALCALINA DE LAMAS RESIDUAIS DAS MINAS DA PANASQUEIRA. PARTE 3. INFLUÊNCIA DOS AGREGADOS NA RESISTÊNCIA E NA MICROESTRUTURA", *Congresso Construção 2007 - 3º Congresso Nacional*, Universidade de Coimbra, Dezembro 2007.

[33] Torgal, Fernando M. A. S. Pacheco, J. P. Castro-Gomes, Said Jalali (2007). "LIGANTES OBTIDOS POR ACTIVAÇÃO ALCALINA DE LAMAS RESIDUAIS DAS MINAS DA PANASQUEIRA. PARTE 2.

DURABILIDADE E POSSIBILIDADE DE CONTAMINAÇÃO AMBIENTAL”, Congresso Construção 2007 - 3º Congresso Nacional, Universidade de Coimbra, Dezembro 2007.

[34] Suresh Thokchom, Dr. Partha Ghosh and Dr. Somnath Ghosh (2009). “EFFECT OF WATER ABSORPTION, POROSITY AND SORPTIVITY ON DURABILITY OF GEOPOLYMER MORTARS”, ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences - VOL. 4, NO. 7, SEPTEMBER 2009.

[35] F.G. Collins and J.G. Sanjayan (1999). “WORKABILITY AND MECHANICAL PROPERTIES OF ALKALI ACTIVATED SLAG CONCRETE”, Cement and Concrete Research 29 (1999) 455-458.

[36] Apha Sathonsaowaphak, Prinya Chindaprasirt, Kedsarin Pimraksa (2009). “WORKABILITY AND STRENGTH OF LIGNITE BOTTOM ASH GEOPOLYMER MORTAR”, Journal of Hazardous Materials 168 (2009) 44-50.

[37] P. Chindaprasirt, T. Chareerat, V. Sirivivatnanon (2007). “WORKABILITY AND STRENGTH OF COARSE HIGH CALCIUM FLY ASH GEOPOLYMER”, Cement & Concrete Composites 29 (2007) 224-229.

[38] Kiyoshi Okada, Asami Ooyama, Toshihiro Isobe, Yoshikazu Kameshima, Akira Nakajima, Kenneth J.D. MacKenzie (2009). “WATER RETENTION PROPERTIES OF POROUS GEOPOLYMERS FOR USE IN COOLING APPLICATIONS”, Journal of the European Ceramic Society 29 (2009) 1917-1923.

[39] Subaer and Arie van Riessen (2007). “THERMO-MECHANICAL AND MICROSTRUCTURAL CHARACTERISATION OF SODIUM - POLY (SIALATE-SILOXO) (NA-PSS) GEOPOLYMERS”, Advances in geopolymer science & technology - J Mater Sci (2007) 42:3117-3123.

[40] Gasca-Tirado J. Ramón, Rubio-Ávalos J.C., Muñoz-Villarreal M.S., Manzano-Ramírez A., Reyes-Araiza J.L., Sampieri-Bulbarela S., Carlos Villaseñor-Mora, Pérez-Bueno J.J., Apatiga L.M., Amigó Borrás Vicente (2011). “EFFECT OF POROSITY ON THE ABSORBED, REEMITTED AND TRANSMITTED LIGHT BY A GEOPOLYMER METAKAOLIN BASE”, Materials Letters 65 (2011) 880-883.

[41] Kiyoshi Okada, Akihito Imase, Toshihiro Isobe, Akira Nakajima (2011). “CAPILLARY RISE PROPERTIES OF POROUS GEOPOLYMERS PREPARED BY AN EXTRUSION METHOD USING POLYLACTIC ACID (PLA) FIBERS AS THE PORE FORMERS”, Journal of the European Ceramic Society 31 (2011) 461-467.

[42] <http://www.google.com/images?hl=pt-BR&q=minas+da+panasqueira&biw=1280&bih=589>

[43] European Committee for Standardization (CEN), “NP EN 196-6:1990 - Métodos de ensaios de cimento: Determinação da finura” Versão portuguesa da norma europeia EN 196-6:1987, IPQ, 1990.

- [44] Especificação do LNEC E245 - 1971 - Inertes para argamassas e betões: Análise granulométrica.
- [45] American Society for Testing and Materials (ASTM): ASTM E11-1987 - Standard Specification for Wire Cloth and Sieves for Testing Purposes.
- [46] Norma Portuguesa Definitiva - NP 954 - Inertes para argamassas e betões: Determinação das Massas volúmicas e de absorção de Água de Areias. IGPAI, Lisboa, 1973.
- [47] Especificação do LNEC E374 - 1993 - Adjuvantes para argamassas e betões: Características e Verificação da Conformidade.
- [48] European Committee for Standardization (CEN) - Methods of test for mortar for masonry - Part 3: Determination of consistence of fresh mortar (by flow table). EN 1015-3:1999.
- [49] European Committee for Standardization (CEN) - Methods of test for mortar for masonry - Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar. EN 1015-11:1999.
- [50] Especificação do LNEC E393 - 1993 - Betões: Determinação de Absorção de Água por Capilaridade.
- [51] European Committee for Standardization (CEN) - Methods of test for mortar for masonry. Part 18: Determination of water absorption coefficient due to capillary action of hardened mortar. EN 1015-18:2002.
- [52] European Committee for Standardization (CEN) - Methods of test for mortar for masonry. Part 10: Determination of dry bulk density of hardened mortar. EN 1015-10:1999.
- [53] American Society for Testing and Materials (ASTM): ASTM E1530 - 06 Standard Test Method for Evaluating the Resistance to Thermal Transmission of Materials by the Guarded Heat Flow Meter Technique.
- [54] Pires, Luís Carlos Carvalho (2002). “ESTUDO EXPERIMENTAL DA CONVECÇÃO NATURAL EM SUPERFÍCIES VERTICAIS COM RECURSO À TERMOGRAFIA POR INFRAVERMELHOS”, Prova de Aptidão Pedagógica e Capacidade científica: Trabalho de Síntese, Departamento de Engenharia Electromecânica da Universidade da Beira Interior.
- [55] Teixeira, António Filipe Gonçalves (2010). “ESTUDO DO DESEMPENHO TÉRMICO DE UM PISO RADIANTE HIDRÁULICO COM DIFERENTES ACABAMENTOS NA SUPERFÍCIE”, Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Mecânica - Energia Aplicada, Universidade da Beira Interior.
- [56] Luís Veiga Mendonça (2005). “TERMOGRAFIA POR INFRAVERMELHOS: INSPECÇÃO DE BETAO”, Revista Engenharia & Vida, Nº 16, Setembro 2005, pp. 53-57.

[57] Sandro Botas, Vasco Rato (2010). “INFLUÊNCIA DA INTRODUÇÃO DE AR NO COMPORTAMENTO DE ARGAMASSAS AOS CICLOS GELO/DEGELO”, 3º Congresso Português de argamassas de construção, Lisboa 2010.

[58] Botas, Sandro Miguel dos Santos (2009). “AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DE ARGAMASSAS EM CLIMAS FRIOS”, Tese de Mestre em Engenharia Civil na especialidade de Reabilitação de Edifícios pela Universidade Nova de Lisboa, Faculdade de Ciências e Tecnologia.

[59] Coutinho, A. S. (1997). “FABRICO E PROPRIEDADES DO BETÃO”. Volume I. 3ª edição. Lisboa: LNEC 1997. ISBN 972-49-0326-5.

[60] European Committee for Standardization (CEN) - Specification for mortar for masonry. Part 1: Rendering and plastering mortar. EN 998-1:2003.

[61] CENTRE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE DU BATIMENT (CSTB). Certification CSTB des enduits monocouches d. imperméabilisation – Classification MERUC. Livraison 341, cahier 2669–3, juillet –août 1993. Paris.

Anexos

Anexo A: Procedimentos de ensaios

A.1 Procedimento para o tratamento térmico	101
A.2 Procedimento de moagem	102
A.3 Procedimento do ensaio picnómetro	103
A.3 Procedimento do ensaio Blaine.....	105
A.4 Procedimento para análise granulométrica laser da lama residual.....	106
A.5 Procedimento para análise granulométrica areia	106
A.7 Procedimento para o ensaio da massa volúmica da areia	107
A.8 Procedimento para o ensaio térmico.....	108
A.9 Procedimento para o ensaio da porosidade e massas volúmica	109

A.1 - Procedimento para o tratamento térmico

Fez-se previamente a desagregação da lama residual proveniente das minas Panasqueira com o moinho de mandíbulas. Pesa-se aproximadamente 560g, colocar num recipiente de aço refractário, com aproximadamente 1 cm de altura. Aquecer o forno estático até a temperatura

de calcinação de 800°C e depois coloca-se a lama no forno estático previamente aquecido, deixando no forno durante 2h. O arrefecimento é feito a temperatura ambiente durante aproximadamente 16h.



A.2 - Procedimento de moagem

Para a moagem pesa-se aproximadamente 500g da lama residual calcinada, depois coloca-se no moinho de bolas a moer durante 6h.



Figura A.2: Moagem - a) Pesagem da lama calcinada; b) Moinho de bolas; c) Bolas de alumínio; d) Colocação da lama; e) Moagem; f) Lama moída; g) Aspecto final.

A.3 - Procedimento do ensaio picnómetro

A preparação da amostra é fundamental na obtenção de resultados precisos a partir do picnómetro. As amostras devem ser livres de humidade, a fim de obter o peso da amostra real e para evitar o efeito de distorção de água na medição do volume.

O ponto importante a ter em conta é que cada passo deve ser realizado de forma a evitar a exposição da amostra seca a humidade ambiente. Isto significa pesar o mais rapidamente possível e instalar no aparelho sem atrasos desnecessários.

Manter a tampa da câmara de celular, excepto quando, se inserir ou retirar uma amostra. Se a câmara continua a ser destapado, a instabilidade da temperatura irá ocorrer que poderá afectar os resultados da análise.

1. O peso do copo de amostra vazio.
2. Colocar uma quantidade de amostra no copo. Usar uma grande quantidade de uma amostra possível, recomenda-se que passa pelo menos dois terços do volume do copo.
3. Coloque o copo de amostra com a venda em um forno. A amostra deve ser aquecida dependendo do material a temperatura necessário, o que podem ser estabelecidos por outros exames (caso seja necessário).
4. Registrar o peso do copo e da amostra. Subtrair o peso do copo vazio para determinar o peso da amostra.
5. Retire a tampa da câmara de celular.
6. Insira o copo com a amostra dentro da câmara de célula.
7. Substituir o copo de câmara da célula

Nota: Quando remove a tampa da câmara, coloque-a sobre uma superfície limpa e seca com o lado untado para baixo de modo que as partículas não se acumulam na superfície untada. Se a tampa é colocada sobre uma superfície suja, pode resultar em erros de análise.



a)



b)



c)



d)

e)

f)

Figura A.3: Ensaio da densidade - a) Abrir e tirar a célula; b) Pesagem da célula; c) Pesagem da célula + amostra; d) Untar a tampa com vaselina; e) Colocação da mostra; f) Fechar.

A.4 - Procedimento do ensaio Blaine

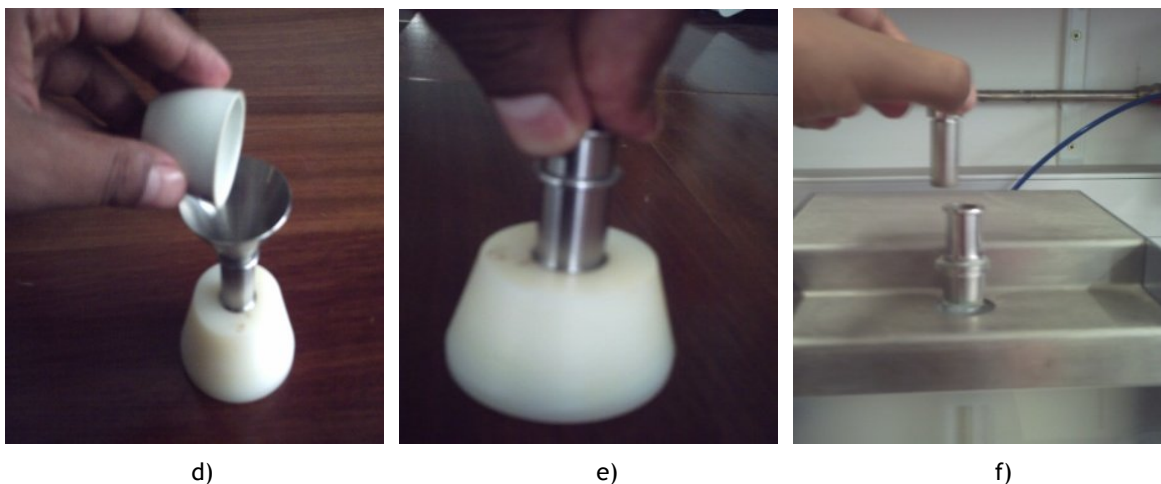
O ensaio foi efectuado de acordo com a norma NP EN 196-6, como foi referido. Primeiramente fez-se a introdução dos seguintes parâmetros: identificação (nome), porosidade e a densidade. Depois da introdução das características o permeabilímetro de Blaine calcula a massa a ser pesada para ser analisada.



a)

b)

c)



d) e) f)
Figura A.4: Ensaio de permeabilímetro de Blaine - a) Colocação do filtro; b) Pesagem da célula;
c) Pesagem da célula + amostra; d) Colocação da amostra; e) Compactação da amostra;
f) Colocar e retirar o êmbolo;

A.5 - Procedimento para análise granulométrica laser da lama residual

Para a análise granulométrica laser, determina-se primeiramente a densidade da amostra. As amostras a ensaiar devem ser em pequenas quantidades para poder diminuir os erros associados.

1. Ligação do aparelho (Coulter L200) e iniciar a calibração.
2. Colocar as amostras até o programa indicar ok (neste processo de colocação deve ter o cuidado de colar as amostras em pequeníssima quantidade para não exceder a percentagem necessária, caso ultrapassar tem de esvaziar o recipiente e encher, até este ficar limpa).
3. Começar o ensaio.
4. Gravar o resultado.
5. Esvaziar o recipiente com amostra e voltar a encher (esta etapa é feita até a água ficar limpa, caso contrário o resultado apresentado pode não corresponder a real).
6. Repetir da etapa 2 para frente.

A.6 - Procedimento para análise granulométrica areia

A análise granulométrica foi efectuada de acordo com a especificação do LNEC E245 - 1971 (inertes para argamassa e betões). Determina-se as percentagens de agregado, retidas e passadas, em cada peneiro, bem como a máxima dimensão e o módulo de finura do agregado. O processo empregue na análise granulométrica consistiu na peneiração a seco do agregado.

De início fez-se a secagem da areia na estufa a $105 \pm 5^\circ\text{C}$, durante 24h, para impedir as agregações de partículas finas e até a massa constante.

A peneiração foi efectuada através da série de peneiros ASTM, com 20 cm de diâmetro, previamente limpos, constituída pela série normal e pela série secundária. Para evitar o entupimento dos peneiros, cumpriu-se o estipulado na especificação no que diz respeito às quantidades máximas de material retido em cada peneiro. De seguida fez-se a pesagem dos peneiros normalizados e colocadas no agitador e por ultimo a pesagem do peneiro + areia.

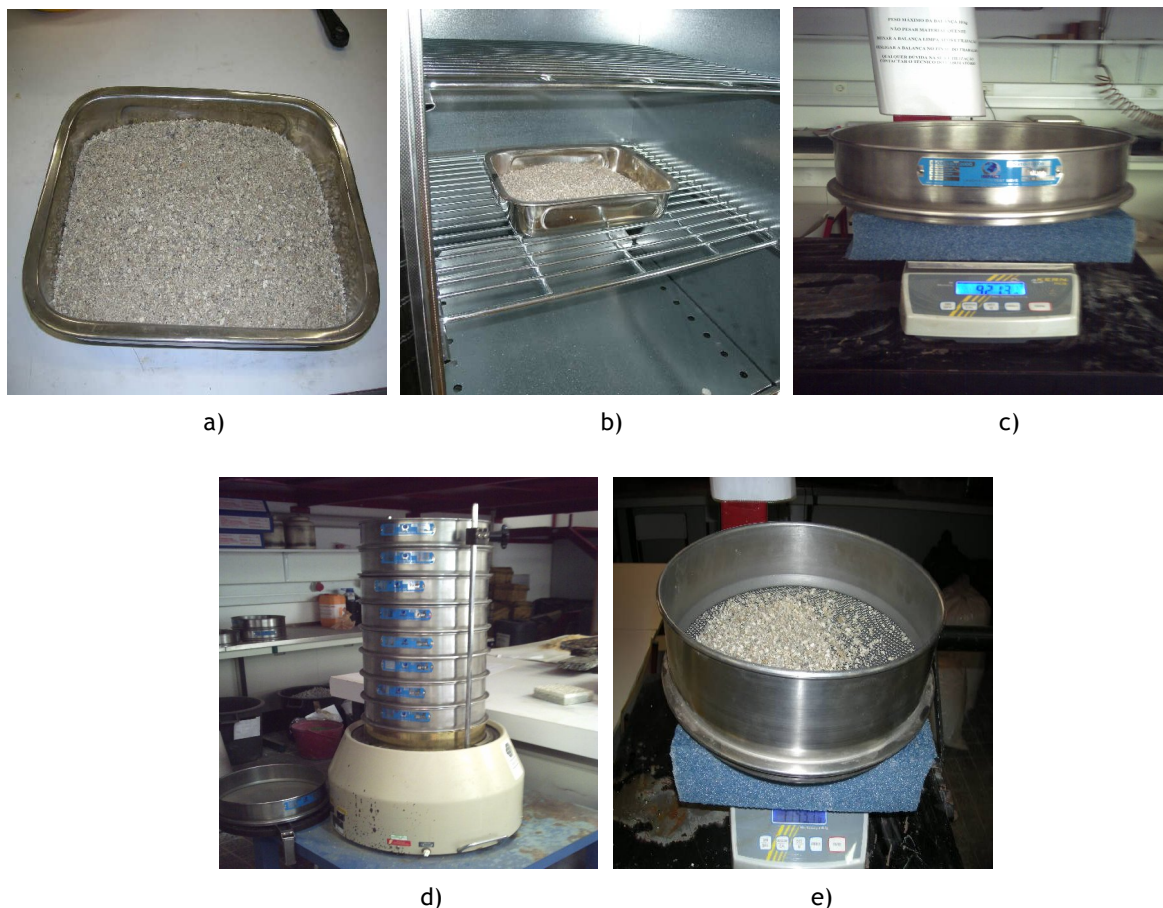


Figura A.5: Análise granulométrica - a) Areia; b) Secagem da areia; c) Pesagem dos peneiros; d) Preparação da vibração mecânica; e) Pesagem do peneiro + areia

A.7 - Procedimento para o ensaio da massa volúmica da areia

A massa volúmica foi determinada de acordo com a norma NP-954. A areia foi seca em estufa a 105°C, durante 24 horas, para obter a massa seca, depois de arrefecida foi emersa em água durante 24h. A água é retirada de forma a não arrastar partículas finas e espalha-se a areia em cima de um tabuleiro para fazer a secagem (forma lenta) até obter uma secagem uniforme. Pesa-se o balão com água até o traço e depois esvazia-se a água até metade e enche-se com 500g da amostra, e depois enche-se o balão com água até o traço e pesar.

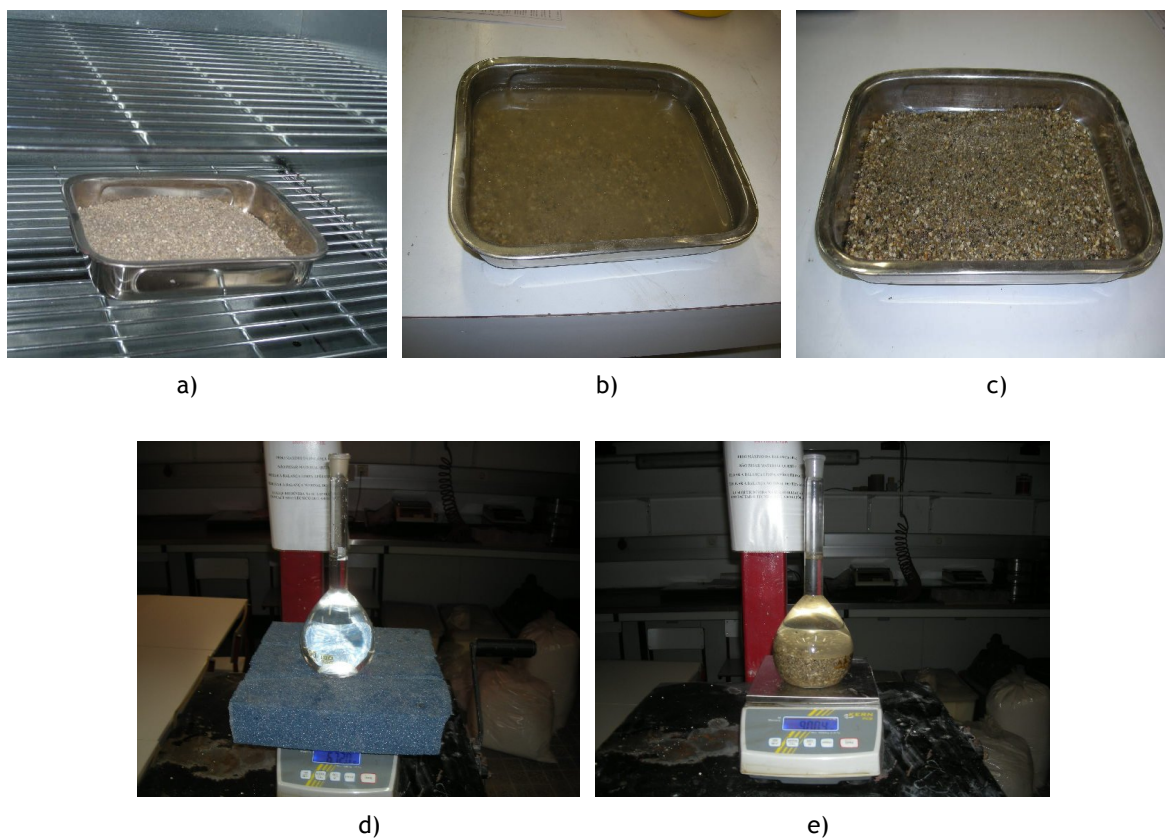
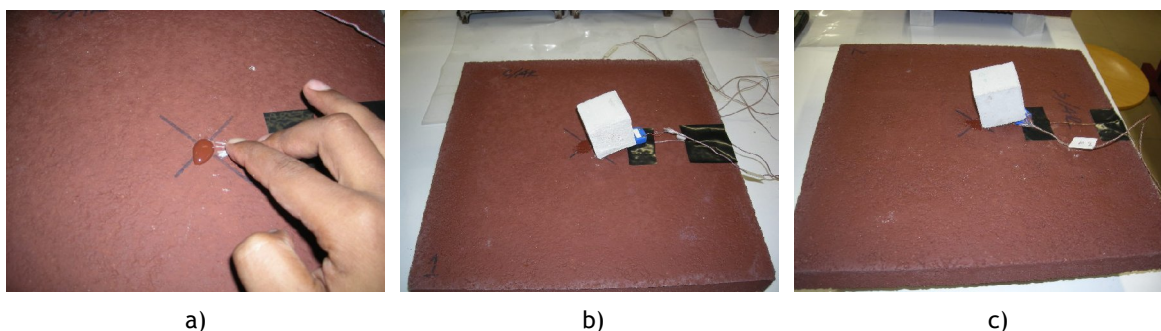


Figura A.6: Massa volúmica - a) Secagem de 750 g da areia; b) Emersão em água; c) Retirar água; d) Pesagem do balão com água; e) Pesagem do balão com amostra + água.

A.8 - Procedimento para o ensaio térmico

No ensaio térmico os corpos de prova foi preparado previamente, colocando os termopares à superfície de cada face (ver figura A.7). Na fonte quente também foi colocado um medidor de fluxo para poder controlar o fluxo de calor transmitido.

1. Colocar os corpos de prova
2. Ligar a fonte fria previamente programada para 10°C
3. Quando a fonte fria atingir os 15°C ligar os restantes equipamentos
4. Fazer registos dos valores da tensão medida, corrente, e a temperatura quando este estabilizar (a fim de aproximadamente 6h)



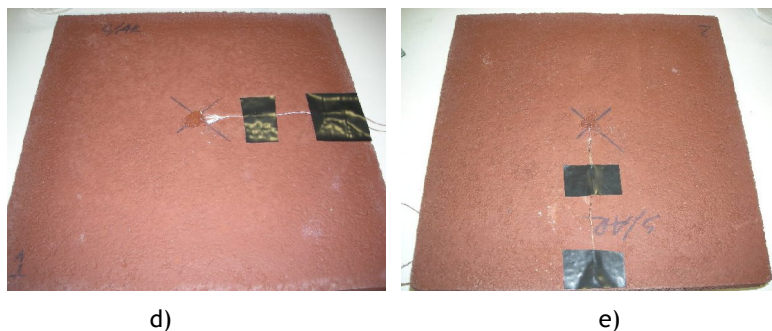


Figura A.7: Preparação dos corpos de prova - a) Colocação do termopar a superfície; b) e c) Colocação de cubos em cima para não deixar levantar; d) e e) Provetes finais.

A.9 - Procedimento para o ensaio da porosidade e massa volúmica

Os corpos de provas foram previamente seca na estufa a temperatura aproximada de 100°C durante 24h, depois pesa-se para determinar a massa seca. Coloca-se os corpos de provas emersos na água durante 24h até saturar e depois seca-se as superfície e pesa-se para determinar massa saturada com superfície seca e por último faz-se a pesagem hidrostática.

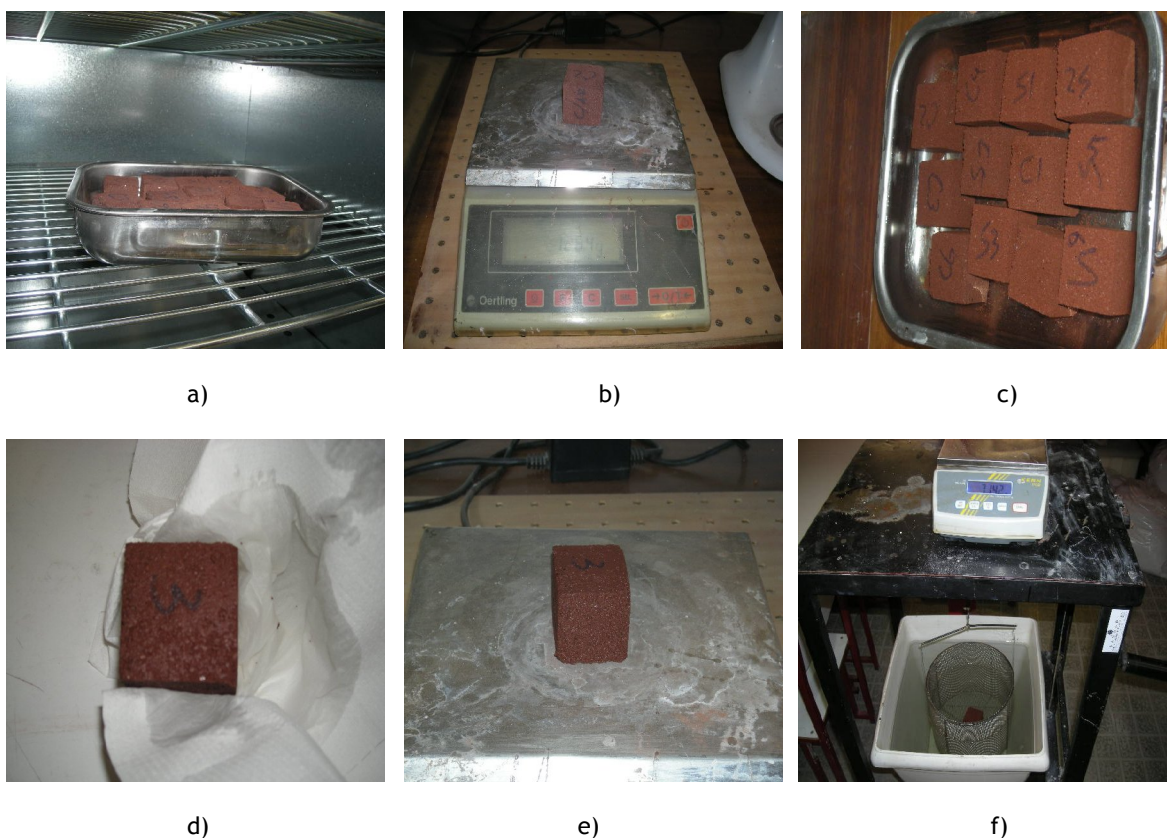


Figura A.8: Porosidade - a) Secagem dos provetes; b) Pesagem (massa seca); c) Provetes depois de emersas na água; d) Secagem da superfície; e) Pesagem (massa superfície seca); f) Pesagem hidrostática.

Anexo B: Resultados de ensaios

B.1 - Densidade da lama residual -----	111
B.2 - Superfície específica da lama residual -----	112
B.3 - Análise granulométrica da lama residual -----	114
B.4 - Análise granulométrica da areia-----	117
B.5 - Resistência à compressão das argamassas geopoliméricas -----	119
B.6 - Resistência à compressão das argamassas de cimento -----	121
B.7 - Resistência à flexão das argamassas de cimento-----	123
B.8 - Resistência à flexão das argamassas geopoliméricas -----	125
B.9 - Absorção de água por capilaridade das argamassas de cimento-----	127
B.10 - Absorção de água por capilaridade das argamassas geopoliméricas -----	131
B.11 - Porosidade e Massa volúmica das argamassas de cimento -----	135
B.12 - Porosidade e Massa volúmica das argamassas geopoliméricas -----	136
B.13 - Tempo de estabilização das temperaturas superficiais das A. Cimento -----	137
B.14 - Tempo de estabilização das temperaturas superficiais das A. geopoliméricas-----	139
B.15 - Resistência e condutibilidade térmica das argamassas de cimento -----	147
B.16 - Resistência e condutibilidade térmica das argamassas geopoliméricas -----	149

B.1 - Densidade da lama residual

Tabela B.1: Resultados de ensaio picnómetro

Determinação da densidade - ensaio picnómetro				
Identificação da amostra		Massa (g)	Densidade (g/cm ³)	Desvio padrão
DM	A1	14,3549	3,0470	0,0228
	A2	8,7636	3,0668	0,0320
	A3	16,5314	2,9555	0,0030
	A4	9,3941	2,9936	0,0229
		Média	3,016	0,0202
Identificação da amostra		Massa (g)	Densidade (g/cm ³)	Desvio padrão
DMC	A1	9,7514	2,8314	-0,0104
	A2	11,6336	2,8298	0,0030
	A3	5,9833	2,8810	0,0413
	A4	7,3763	2,8766	0,0085
		Média	2,855	0,0106
Identificação da amostra		Massa (g)	Densidade (g/cm ³)	Desvio padrão
D	A1	13,9203	3,0339	-0,0079
	A2	7,7821	3,1190	0,0186
	A3	16,8539	2,9838	0,0063
	A4	9,7797	3,1025	-0,0321
	A5	8,345	2,9162	-0,0171
		Média	3,031	-0,006
Identificação da amostra		Massa (g)	Densidade (g/cm ³)	Desvio padrão
PC	A1	12,4328	3,0054	0,0120
	A2	17,3665	3,0024	0,0091
	A3	14,7638	3,0009	0,0137
	A4	9,2526	3,0062	0,0129
	A5	10,2952	2,9828	0,0050
	A6	7,7311	2,9741	0,0050
		Média	2,995	0,0096

Identificação da amostra		Massa (g)	Densidade (g/cm ³)	Desvio padrão
P	A1	18,0196	3,1651	0,0044
	A2	15,0563	3,1638	0,0091
	A3	13,1819	3,2920	0,0164
	A4	11,5079	3,3179	0,0144
	A5	7,6163	3,3440	0,0220
Média			3,257	0,0133

Identificação da amostra		Massa (g)	Densidade (g/cm ³)	Desvio padrão
DC	A1	14,8344	2,9832	0,0215
	A2	15,7579	2,9854	0,0144
	A3	11,1124	2,9448	0,0246
	A4	9,2745	2,9383	0,0319
	A5	8,4276	2,8971	0,0242
Média			2,950	0,0233

Identificação da amostra		Massa (g)	Densidade (g/cm ³)	Desvio padrão
DCM	A1	10,8655	2,9618	-0,0092
	A2	15,1516	3,0402	0,0175
	A3	8,7934	3,0974	0,0368
	A4	12,7361	3,0813	0,0178
	A5	6,4274	3,0986	0,0596
Média			3,056	0,0245

B.2 - Superfície específica da lama residual

Tabela B.2: Resultados de ensaio de permeabilímetro Blaine

Determinação da superfície específica - Blaine						
Identificação da amostra	Porosidade (e)	Densidades (g/cm ³)	Massa (g)	S (20 °C) (cm ² /g)	Tempo (s)	
DM	A1	0,65	3,016	2,797	3298	45,750
	A2	0,65	3,016	2,797	3203	43,230
	A3	0,65	3,016	2,797	3264	51,305
	A4	0,65	3,016	2,797	3092	45,900
	A5	0,65	3,016	2,797	3082	45,650
	A6	0,65	3,016	2,797	3022	23,400
	A7	0,65	3,016	2,797	2930	41,295
Média				3127,29	42,361	

Identificação da amostra	Porosidade (e)	Densidades (g/cm ³)	Massa (g)	S (20 °C) (cm ² /g)	Tempo (s)	
DMC	A1	0,65	2,855	2,648	2598	29,035
	A2	0,65	2,855	2,648	2549	30,520
	A3	0,65	2,855	2,648	2466	28,978
	A4	0,65	2,855	2,648	2648	30,180
	A5	0,65	2,855	2,648	2532	27,535
	A6	0,65	2,855	2,648	2501	26,870
	A7	0,65	2,855	2,648	2665	30,490
			Média	2565,57	29,087	

Identificação da amostra	Porosidade (e)	Densidades (g/cm ³)	Massa (g)	S (20 °C) (cm ² /g)	Tempo (s)	
D	A1	0,65	3,031	2,811	2406	27,990
	A2	0,65	3,031	2,811	2413	28,155
	A3	0,65	3,031	2,811	2391	27,630
	A4	0,65	3,031	2,811	2415	28,185
	A5	0,65	3,031	2,811	2431	28,555
	A6	0,65	3,031	2,811	2427	28,460
	A7	0,65	3,031	2,811	2436	28,695
			Média	2417	28,239	

Identificação da amostra	Porosidade (e)	Densidades (g/cm ³)	Massa (g)	S (20 °C) (cm ² /g)	Tempo (s)	
PC	A1	0,65	2,995	2,741	1776	14,500
	A2	0,65	2,995	2,741	1781	14,580
	A3	0,65	2,995	2,741	1779	14,545
	A4	0,65	2,995	2,741	1778	14,520
	A5	0,65	2,995	2,741	1775	14,470
	A6	0,65	2,995	2,741	1772	14,430
	A7	0,65	2,995	2,741	1778	14,525
			Média	1777	14,510	

Identificação da amostra	Porosidade (e)	Densidades (g/cm ³)	Massa (g)	S (20 °C) (cm ² /g)	Tempo (s)	
P	A1	0,65	3,257	3,021	1745	17,010
	A2	0,65	3,257	3,021	1750	17,105
	A3	0,65	3,257	3,021	1746	17,030
	A4	0,65	3,257	3,021	1751	17,120
	A5	0,65	3,257	3,021	1754	17,170
	A6	0,65	3,257	3,021	1752	17,200
	A7	0,65	3,257	3,021	1751	17,105
			Média	1749,86	17,106	

Identificação da amostra	Porosidade (e)	Densidades (g/cm ³)	Massa (g)	S (20°C) (cm ² /g)	Tempo (s)	
DC	A1	0,65	2,950	2,736	2122	20,620
	A2	0,65	2,950	2,736	2118	20,545
	A3	0,65	2,950	2,736	2122	20,620
	A4	0,65	2,950	2,736	2110	20,395
	A5	0,65	2,950	2,736	2122	20,620
	A6	0,65	2,950	2,736	2097	20,140
	A7	0,65	2,950	2,736	2128	20,735
Média				2117,000	20,525	

Identificação da amostra	Porosidade (e)	Densidades (g/cm ³)	Massa (g)	S (20°C) (cm ² /g)	Tempo (s)	
DCM	A1	0,65	3,056	2,834	3299	53,765
	A2	0,65	3,056	2,834	2976	43,630
	A3	0,65	3,056	2,834	3216	50,880
	A4	0,65	3,056	2,834	3108	47,575
	A5	0,65	3,056	2,834	3159	49,130
	A6	0,65	3,056	2,834	2968	43,780
	A7	0,65	3,056	2,834	2859	40,175
Média				3083,57	46,991	

B.3 - Análise granulométrica da lama residual

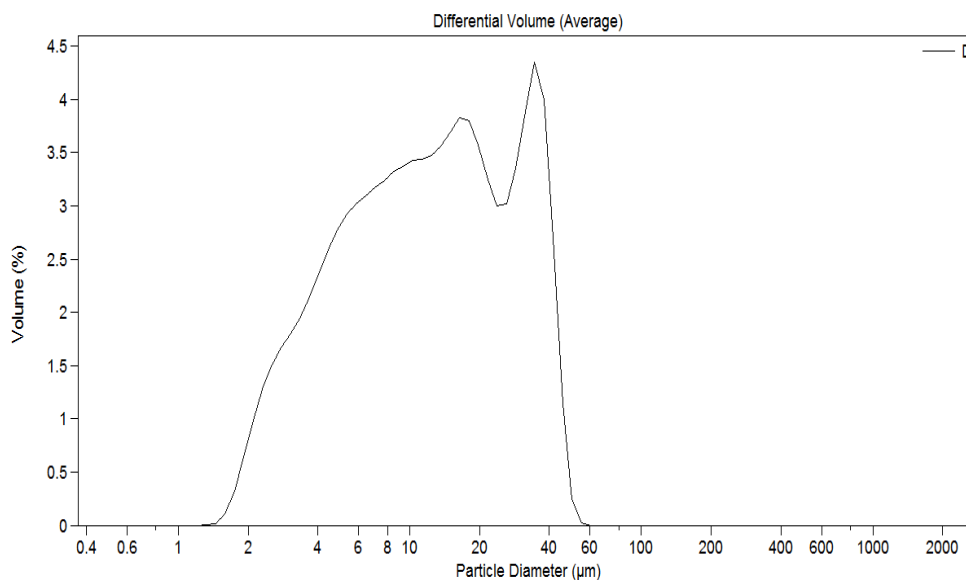


Figura B.1: Análise granulométrica laser D

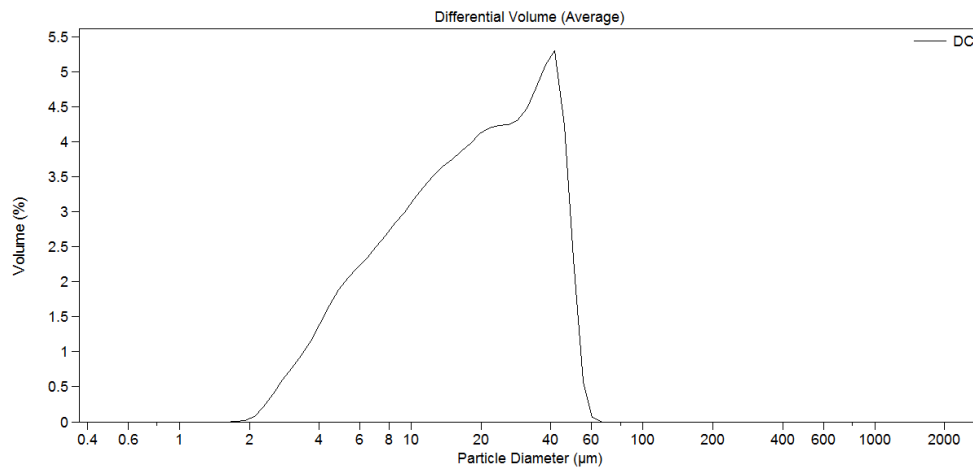


Figura B.2: Análise granulométrica laser DC

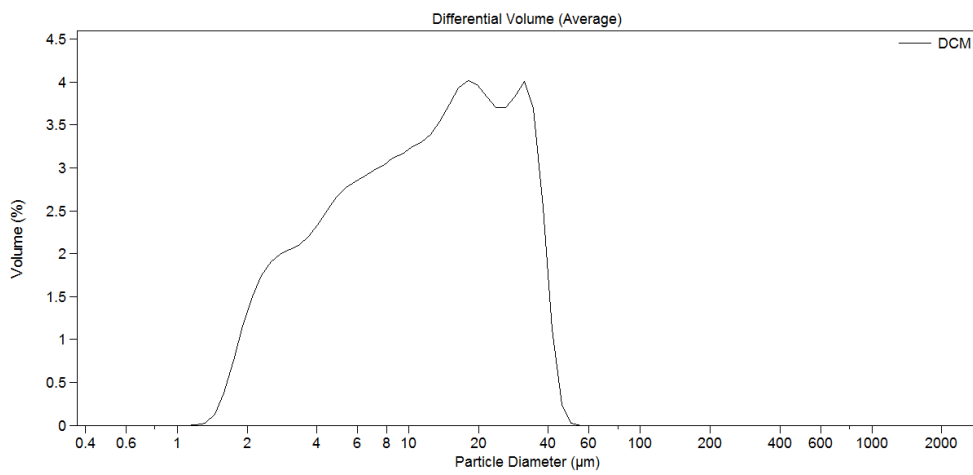


Figura B.3: Análise granulométrica laser DCM

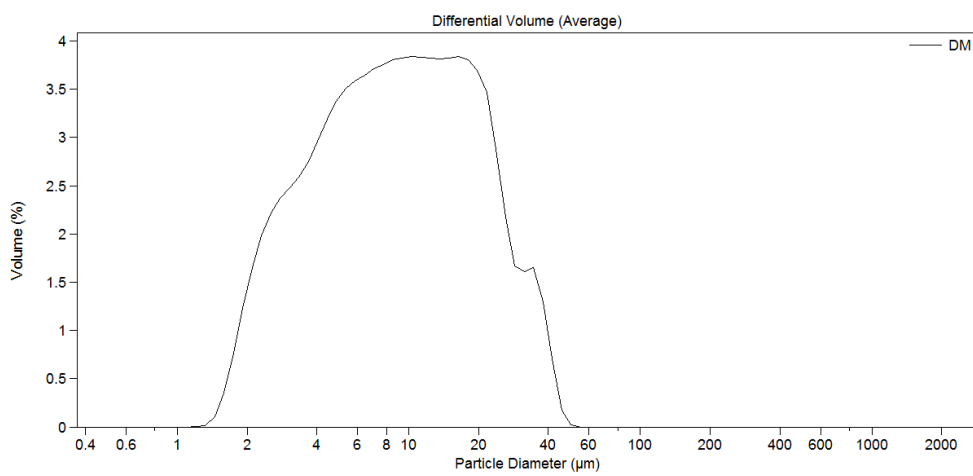


Figura B.4: Análise granulométrica laser DM

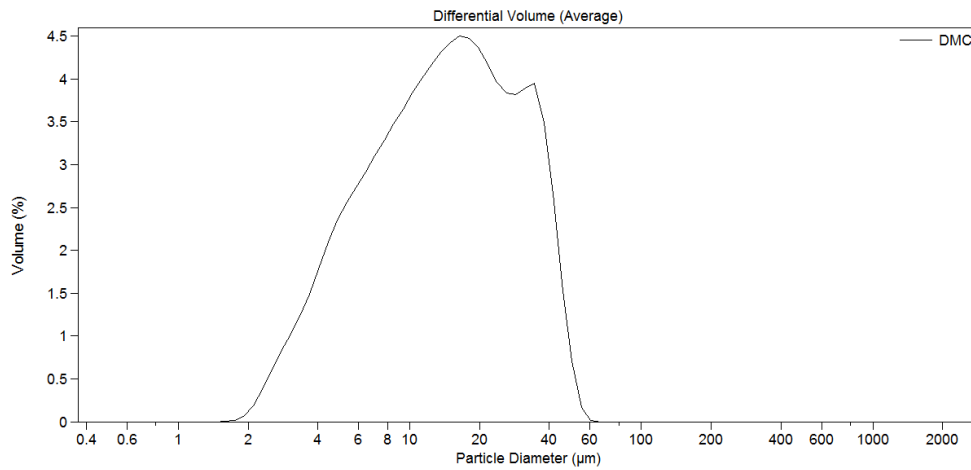


Figura B.5: Análise granulométrica laser DMC

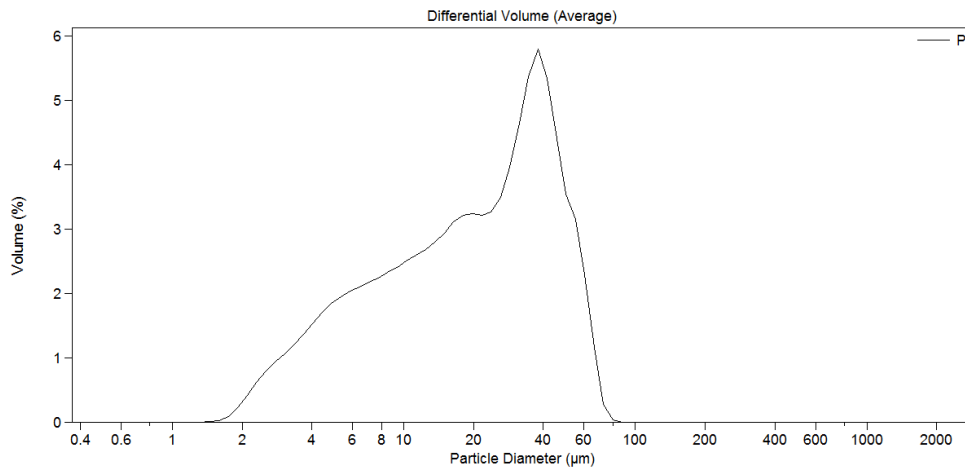


Figura B.6: Análise granulométrica laser P

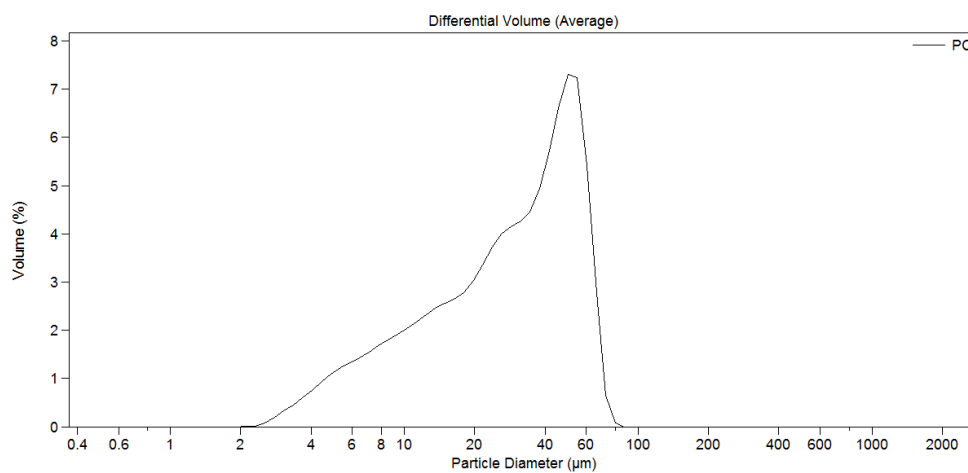


Figura B.7: Análise granulométrica laser PC

B.4 - Análise granulométrica da areia

Tabela B.3 Resultado de ensaio granulométrica da areia 0/4

Amostra inicial (gramas): 1288,7			Nº de fracções: 3		Observações:			
Peneiro	Malha (mm)	Massa do Peneiro (g)	Fracção 1 Peneiro + Inerte (g)	Fracção 2 Peneiro + Inerte (g)	Fracção 3 Peneiro + Inerte (g)	Fracção 4 Peneiro + Inerte (g)	Fracção 5 Peneiro + Inerte (g)	Total das Fracções Massa do Inerte (g)
3"	76.20							0,0
(*) 2"	(*)50.00							0,0
1" 1/2	38.10							0,0
(*) 1"	(*)25.40							0,0
3/4"	19,10							0,0
(*) 1/2"	(*)12.70							0,0
3/8"	9,52							0,0
nº 4	4,76	510,2	515,4	519,1	515,7			1550,2
nº 8	2,38	482,4	501,8	501,9	498,5			1502,2
nº 16	1,190	434,8	507,3	507,7	493,8			1508,8
nº 30	0,590	405,8	597,6	570,7	539,6			1707,9
nº 50	0,297	370,0	529,3	551,1	475,6			1556,0
nº 100	0,149	347,5	375,0	370,1	368,0			1113,1
nº 200	0,074	333,4	334,8	334,1	335,1			1004,0
Resíduo		376,4	377,1	376,9	377,1			1131,1
							Massa total da amostra (g)	11073,3

(*) Série secundária

Método de Ensaio de acordo com a especificação do LNEC E245 -1971.

Tabela B.4: Análise granulométrica da areia

Peneiro	Malha (mm)	Resíduo no peneiro		Percentagens acumuladas	
		(g)	%	Passados (%)	Retidos (%)
3"	76,20	0,00	0,00	100,00	0,00
(*) 2"	(*)50,80	0,00	0,00	100,00	0,00
1" 1/2	38,10	0,00	0,00	100,00	0,00
(*) 1"	(*)25,40	0,00	0,00	100,00	0,00
3/4"	19,10	0,00	0,00	100,00	0,00
(*) 1/2"	(*)12,70	0,00	0,00	100,00	0,00
3/8"	9,52	0,00	0,00	100,00	0,00
n° 4	4,76	19,60	1,52	98,48	1,52
n° 8	2,38	55,00	4,26	94,23	5,77
n° 16	1,190	204,40	15,82	78,40	21,60
n° 30	0,590	490,50	37,97	40,43	59,57
n° 50	0,297	446,00	34,53	5,91	94,09
n° 100	0,149	70,60	5,47	0,44	99,56
n° 200	0,074	3,80	0,29	0,15	99,85
Resíduo		1,90	0,15	0,00	100,00
Totais		1291,80	100,00		

(*) Série secundária

Peneiros para o cálculo do módulo de finura

Módulo de finura do inerte: 2,821

B.5 - Resistência à compressão das argamassas geopoliméricas

Tabela B.5: Resultados de ensaio à compressão da A. Geop. com ar

Resistência à compressão da argamassa geopolimérica com ar incorporado				
Tempo (dias)	Provete	Área (cm ²)	Carga (KN)	Tensão (MPa)
7	A. G. 7.1	16	14,70	9,19
	A. G. 7.2	16	13,20	8,25
	A. G. 7.3	16	14,50	9,06
	Média		14,13	8,83
14	A. G. 14.1	16	20,80	13,00
	A. G. 14.2	16	19,60	12,25
	A. G. 14.3	16	21,10	13,19
	Média		20,50	12,81
21	A. G. 21.1	16	19,90	12,44
	A. G. 21.2	16	20,40	12,75
	A. G. 21.3	16	21,70	13,56
	Média		20,67	12,92
28	A. G. 28.1	16	25,50	15,94
	A. G. 28.2	16	26,50	16,56
	A. G. 28.3	16	22,90	14,31
	Média		24,97	15,60
42	A. G. 42.1	16	24,90	15,56
	A. G. 42.2	16	25,40	15,88
	A. G. 42.3	16	22,80	14,25
	Média		24,37	15,23
60	A. G. 60.1	16	24,10	15,06
	A. G. 60.2	16	28,10	17,56
	A. G. 60.3	16	25,10	15,69
	Média		25,77	16,10

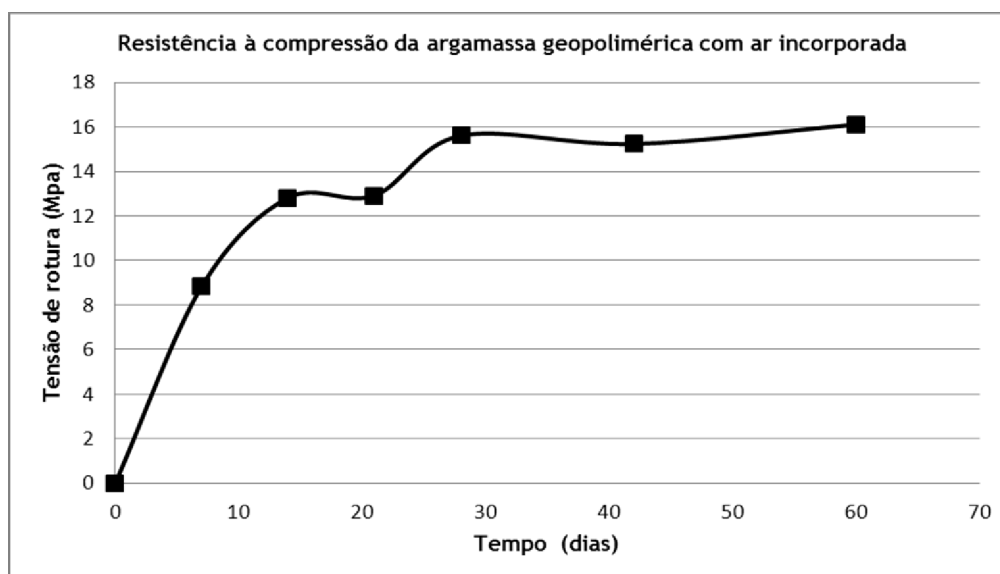


Figura B.8: Resistência à compressão da A. Geop. com ar

Tabela B.6: Resultados de ensaio à compressão da A. Geop. sem ar

Resistência à compressão da argamassa geopolimérica sem ar incorporado				
Tempo (dias)	Provete	Área (cm ²)	Carga (KN)	Tensão (MPa)
7	A. G. 7.1	16	9,40	5,88
	A. G. 7.2	16	8,70	5,44
	A. G. 7.3	16	12,20	7,63
	Média		10,10	6,31
14	A. G. 14.1	16	12,20	7,63
	A. G. 14.2	16	13,60	8,50
	A. G. 14.3	16	13,30	8,31
	Média		13,03	8,15
21	A. G. 21.1	16	16,60	10,38
	A. G. 21.2	16	12,10	7,59
	A. G. 21.3	16	14,50	9,09
	Média		14,40	9,02
28	A. G. 28.1	16	18,40	11,50
	A. G. 28.2	16	21,40	13,38
	A. G. 28.3	16	13,70	8,56
	Média		17,83	11,15
42	A. G. 42.1	16	17,20	10,75
	A. G. 42.2	16	18,40	11,50
	A. G. 42.3	16	21,20	13,25
	Média		18,93	11,83
60	A. G. 60.1	16	22,10	13,81
	A. G. 60.2	16	18,30	11,44
	A. G. 60.3	16	20,60	12,88
	Média		20,33	12,71



Figura B.9: Resistência à compressão da A. Geop. sem ar

B.6 - Resistência à compressão das argamassas de cimento

Tabela B.7: Resultados de ensaio à compressão da A. cimento com ar

Resistência à compressão da argamassa de cimento com ar incorporado				
Tempo (dias)	Provete	Área (cm ²)	Carga (KN)	Tensão (MPa)
7	A. C. 7.1	16	6,30	3,94
	A. C. 7.2	16	5,80	3,63
	A. C. 7.3	16	6,10	3,81
	Média			6,07
14	A. C. 14.1	16	12,80	8,00
	A. C. 14.2	16	12,80	8,00
	A. C. 14.3	16	13,10	8,19
	Média			12,90
21	A. C. 21.1	16	16,30	10,19
	A. C. 21.2	16	19,00	11,88
	A. C. 21.3	16	17,60	11,00
	Média			17,63
28	A. C. 28.1	16	19,70	12,31
	A. C. 28.2	16	20,30	12,69
	A. C. 28.3	16	22,00	13,75
	Média			20,67
42	A. C. 42.1	16	24,80	15,50
	A. C. 42.2	16	24,30	15,19
	A. C. 42.3	16	25,60	16,00
	Média			24,90

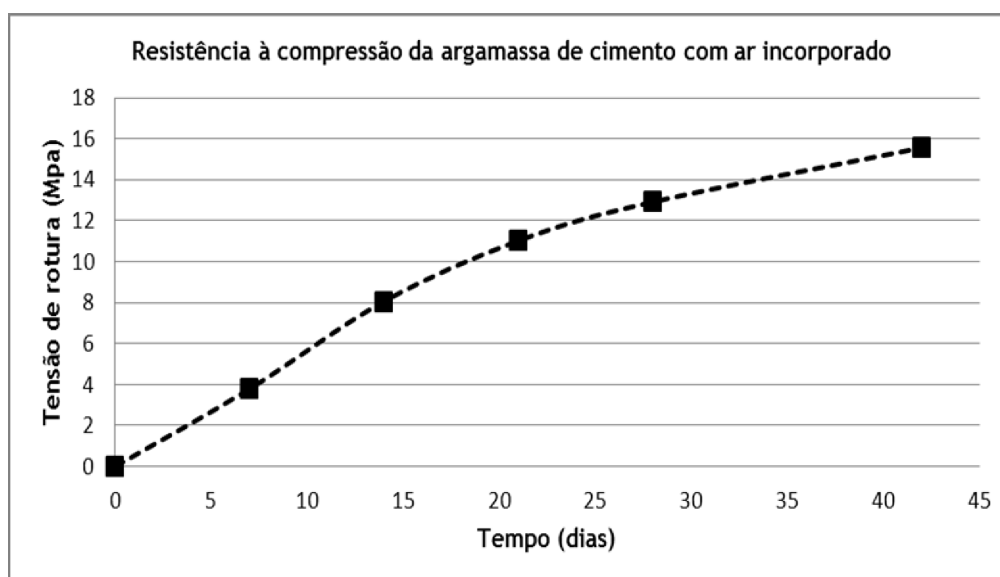


Figura B.10: Resistência à compressão da A. cimento com ar

Tabela B.8: Resultados de ensaio à compressão da A. cimento sem ar

Resistência à compressão da argamassa de cimento sem ar incorporado				
Tempo (dias)	Provete	Área (cm ²)	Carga (KN)	Tensão (MPa)
7	A. C. 7.1	16	9,20	5,75
	A. C. 7.2	16	8,70	5,44
	A. C. 7.3	16	10,20	6,38
	Média		9,37	5,85
14	A. C. 14.1	16	22,50	14,06
	A. C. 14.2	16	22,50	14,06
	A. C. 14.3	16	21,50	13,44
	Média		22,17	13,85
21	A. C. 21.1	16	30,00	18,75
	A. C. 21.2	16	29,70	18,56
	A. C. 21.3	16	28,00	17,50
	Média		29,23	18,27
28	A. C. 28.1	16	34,50	21,56
	A. C. 28.2	16	33,80	21,13
	A. C. 28.3	16	34,90	21,81
	Média		34,40	21,50
42	A. C. 42.1	16	38,50	24,06
	A. C. 42.2	16	36,60	22,88
	A. C. 42.3	16	35,20	22,00
	Média		36,77	22,98

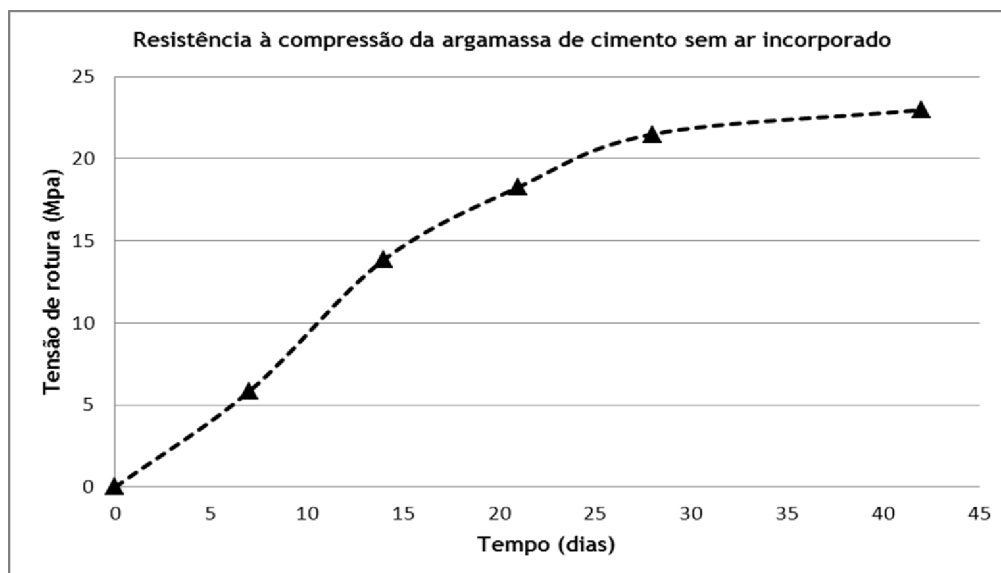


Figura B.11: Resistência à compressão da A. cimento sem ar

B.7 - Resistência à flexão das argamassas de cimento

Tabela B.9: Resultados de ensaio à flexão da A. cimento com ar

Resistência à flexão da argamassa de cimento com ar incorporado					
Tempo (dias)	Provete	Inércia (m ⁴)	Carga (KN)	Momento flector (KNm)	Tensão (MPa)
7	A. C. 7.1	2,1333E-07	1,00	0,0400	3,75
	A. C. 7.2	2,1333E-07	0,80	0,0320	3,00
	A. C. 7.3	2,1333E-07	0,80	0,0320	3,00
	Média			0,87	0,0347
14	A. C. 14.1	2,1333E-07	1,10	0,0440	4,13
	A. C. 14.2	2,1333E-07	1,00	0,0400	3,75
	A. C. 14.3	2,1333E-07	1,10	0,0440	4,13
	Média			1,07	0,0427
21	A. C. 21.1	2,1333E-07	1,40	0,0560	5,25
	A. C. 21.2	2,1333E-07	1,20	0,0480	4,50
	A. C. 21.3	2,1333E-07	1,20	0,0480	4,50
	Média			1,27	0,0507
28	A. C. 28.1	2,1333E-07	1,20	0,0480	4,50
	A. C. 28.2	2,1333E-07	2,00	0,0800	7,50
	A. C. 28.3	2,1333E-07	1,20	0,0480	4,50
	Média			1,47	0,0587

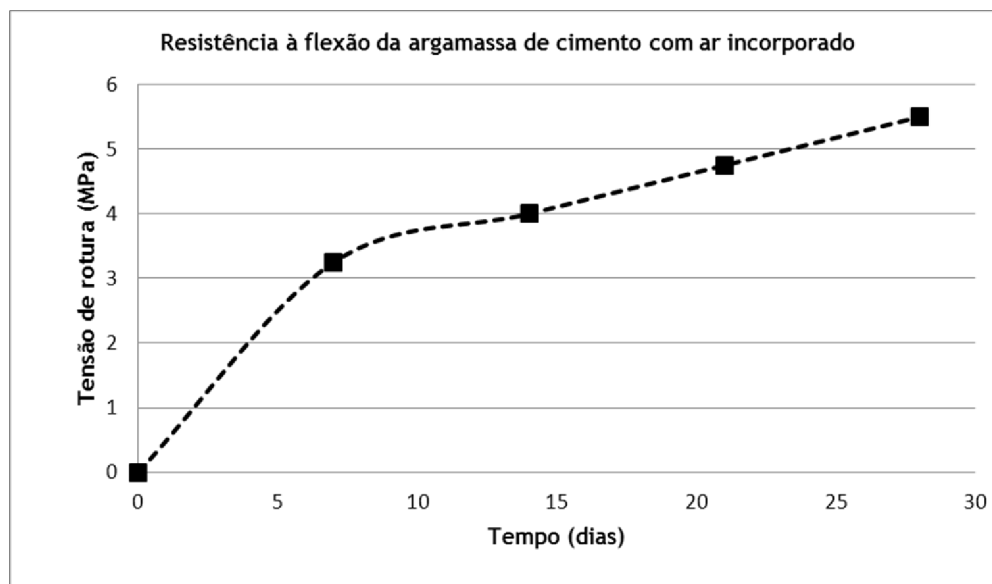


Figura B.12: Resistência à flexão da A. cimento com ar

Tabela B.10: Resultados de ensaio à flexão da A. cimento sem ar

Resistência à flexão da argamassa de cimento sem ar incorporado					
Tempo (dias)	Proвете	Inércia (m ⁴)	Carga (KN)	Momento flector (KNm)	Tensão (MPa)
7	A. C. 7.1	2,1333E-07	1,20	0,0480	4,50
	A. C. 7.2	2,1333E-07	1,50	0,0600	5,63
	A. C. 7.3	2,1333E-07	1,40	0,0560	5,25
	Média		1,37	0,0547	5,13
14	A. C. 14.1	2,1333E-07	1,90	0,0760	7,13
	A. C. 14.2	2,1333E-07	1,90	0,0760	7,13
	A. C. 14.3	2,1333E-07	1,90	0,0760	7,13
	Média		1,90	0,0760	7,13
21	A. C. 21.1	2,1333E-07	1,50	0,0600	5,63
	A. C. 21.2	2,1333E-07	1,90	0,0760	7,13
	A. C. 21.3	2,1333E-07	2,20	0,0880	8,25
	Média		1,87	0,0747	7,00
28	A. C. 28.1	2,1333E-07	2,10	0,0840	7,88
	A. C. 28.2	2,1333E-07	2,00	0,0800	7,50
	A. C. 28.3	2,1333E-07	2,10	0,0840	7,88
	Média		2,07	0,0827	7,75

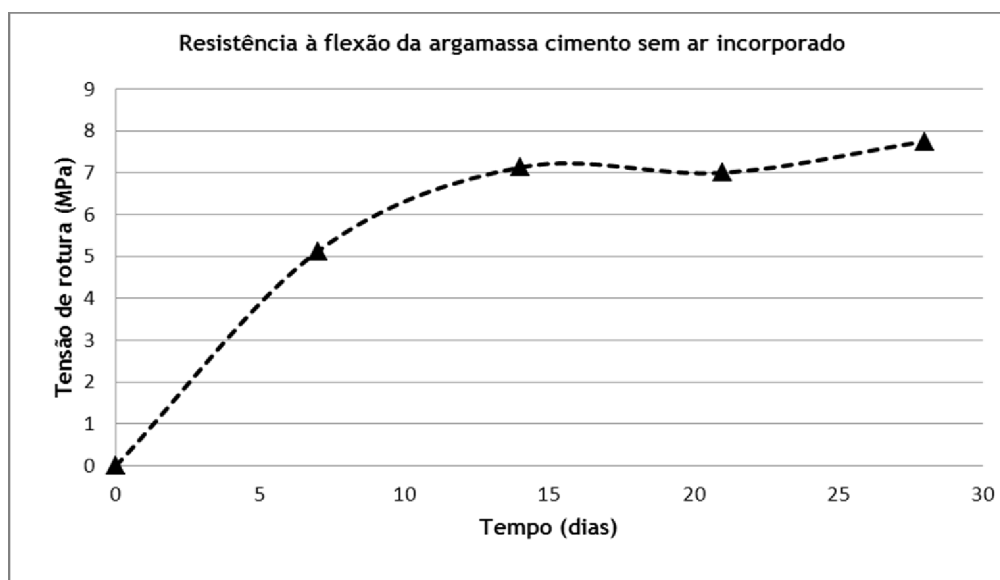


Figura B.13: Resistência à flexão da A. cimento sem ar

B.8 - Resistência à flexão das argamassas geopoliméricas

Tabela B.11: Resultados de ensaio à flexão da argamassa geopolimérica com ar

Resistência à Flexão da argamassa geopolimérica com ar incorporado					
Tempo (dias)	Provete	Inércia (m ⁴)	Carga (KN)	Momento flector (KNm)	Tensão (MPa)
7	A. G. 7.1	2,13333E-07	0,80	0,032	3,00
	A. G. 7.2	2,13333E-07	0,90	0,036	3,38
	A. G. 7.3	2,13333E-07	0,80	0,032	3,00
	Média			0,83	0,033
14	A. G. 14.1	2,13333E-07	1,60	0,064	6,00
	A. G. 14.2	2,13333E-07	1,50	0,060	5,63
	A. G. 14.3	2,13333E-07	1,60	0,064	6,00
	Média			1,57	0,063
21	A. G. 21.1	2,13333E-07	1,90	0,076	7,13
	A. G. 21.2	2,13333E-07	1,80	0,072	6,75
	A. G. 21.3	2,13333E-07	1,90	0,076	7,13
	Média			1,87	0,075
28	A. G. 28.1	2,13333E-07	2,40	0,096	9,00
	A. G. 28.2	2,13333E-07	2,50	0,100	9,38
	A. G. 28.3	2,13333E-07	2,50	0,100	9,38
	Média			2,47	0,099

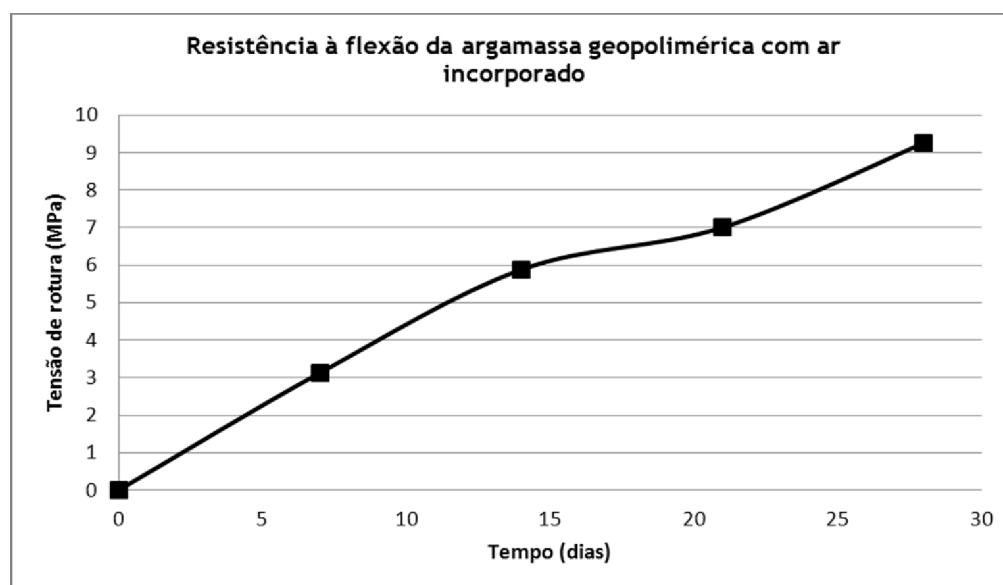


Figura B.14: Resistência à flexão da argamassa geopolimérica com ar

Tabela B.12: Resultados de ensaio à flexão da argamassa geopolimérica sem ar

Resistência à flexão da argamassa geopolimérica sem ar incorporado					
Tempo (dias)	Provete	Inércia (m ⁴)	Carga (KN)	Momento flector (KNm)	Tensão (MPa)
7	A. G. 7.1	2,13333E-07	0,80	0,032	3,00
	A. G. 7.2	2,13333E-07	0,70	0,028	2,63
	A. G. 7.3	2,13333E-07	0,70	0,028	2,63
	Média			0,73	0,029
14	A. G. 14.1	2,13333E-07	0,90	0,036	3,38
	A. G. 14.2	2,13333E-07	1,00	0,040	3,75
	A. G. 14.3	2,13333E-07	1,00	0,040	3,75
	Média			0,97	0,039
21	A. G. 21.1	2,13333E-07	1,80	0,072	6,75
	A. G. 21.2	2,13333E-07	1,50	0,060	5,63
	A. G. 21.3	2,13333E-07	1,60	0,064	6,00
	Média			1,63	0,065
28	A. G. 28.1	2,13333E-07	1,90	0,076	7,13
	A. G. 28.2	2,13333E-07	2,00	0,080	7,50
	A. G. 28.3	2,13333E-07	2,00	0,080	7,50
	Média			1,97	0,079

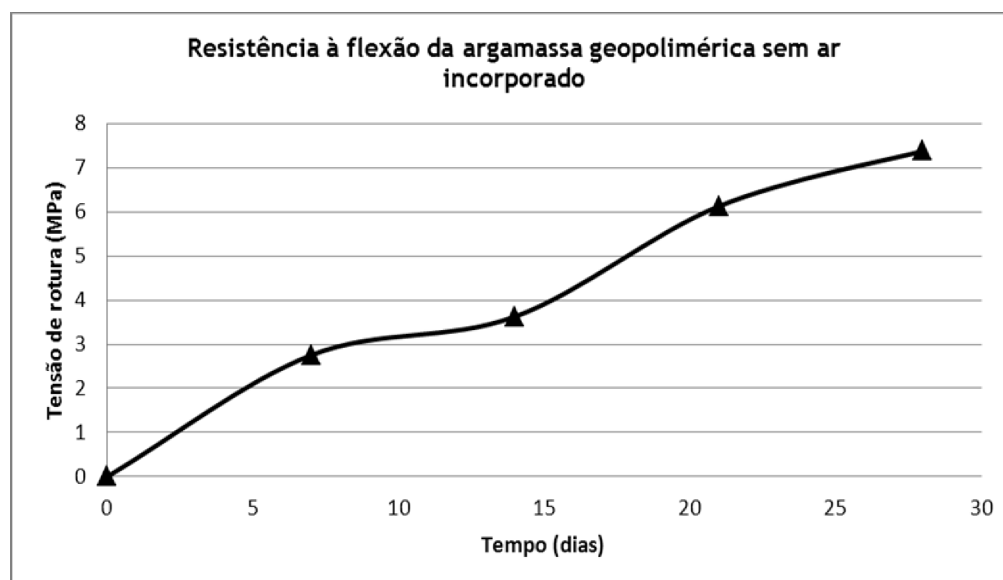


Figura B.15: Resistência à flexão da argamassa geopolimérica sem ar

B.9 - Absorção de água por capilaridade das argamassas de cimento

Tabela B.13: Absorção capilar das argamassas de cimento

Absorção de água por capilaridade					
Tempo	Provetes	Massa (g)	$M_i - M_0$ (g)	$(M_i - M_0)/A$ (g/mm ²)	Média
10 min	A. C. c/ar 1	478,67	2,77	0,00173	0,0023
	A. C. c/ar 2	488,87	2,97	0,00185	
	A. C. c/ar 3	480,40	5,20	0,00325	
	A. C. s/ar 1	570,83	2,93	0,00183	0,0017
	A. C. s/ar 2	569,57	2,67	0,00167	
	A. C. s/ar 3	569,97	2,37	0,00148	
30 min	A. C. c/ar 1	484,20	8,30	0,00519	0,0068
	A. C. c/ar 2	494,80	8,90	0,00556	
	A. C. c/ar 3	490,80	15,60	0,00975	
	A. C. s/ar 1	576,70	8,80	0,00550	0,0050
	A. C. s/ar 2	574,90	8,00	0,00500	
	A. C. s/ar 3	574,70	7,10	0,00444	
60 min	A. C. c/ar 1	485,90	10,00	0,00625	0,0078
	A. C. c/ar 2	496,30	10,40	0,00650	
	A. C. c/ar 3	492,10	16,90	0,01056	
	A. C. s/ar 1	578,80	10,90	0,00681	0,0062
	A. C. s/ar 2	576,70	9,80	0,00613	
	A. C. s/ar 3	576,60	9,00	0,00563	
90 min	A. C. c/ar 1	486,15	10,25	0,00641	0,0079
	A. C. c/ar 2	496,55	10,65	0,00666	
	A. C. c/ar 3	492,40	17,20	0,01075	
	A. C. s/ar 1	579,33	11,43	0,00714	0,0065
	A. C. s/ar 2	577,28	10,38	0,00648	
	A. C. s/ar 3	577,20	9,60	0,00600	
3 h	A. C. c/ar 1	486,90	11,00	0,00688	0,0084
	A. C. c/ar 2	497,30	11,40	0,00713	
	A. C. c/ar 3	493,30	18,10	0,01131	
	A. C. s/ar 1	580,90	13,00	0,00813	0,0076
	A. C. s/ar 2	579,00	12,10	0,00756	
	A. C. s/ar 3	579,00	11,40	0,00712	
6 h	A. C. c/ar 1	490,80	14,90	0,00931	0,0106
	A. C. c/ar 2	500,90	15,00	0,00938	
	A. C. c/ar 3	496,00	20,80	0,01300	
	A. C. s/ar 1	585,60	17,70	0,01106	0,0102
	A. C. s/ar 2	582,70	15,80	0,00988	
	A. C. s/ar 3	583,20	15,60	0,00975	

Tabela B.14: Massas iniciais

M_0 [g]	
A. C. c/ar 1	475,90
A. C. c/ar 2	485,90
A. C. c/ar 3	475,20
A. C. s/ar 1	567,90
A. C. s/ar 2	566,90
A. C. s/ar 3	567,60

$A = 1600 \text{ mm}^2$

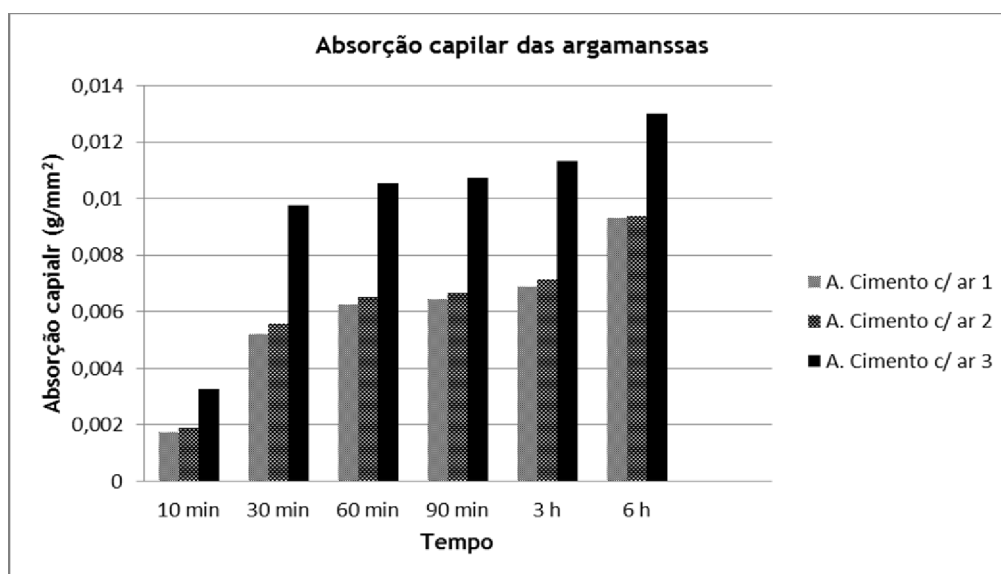


Figura B.16: Absorção capilar das argamassas de cimento com ar

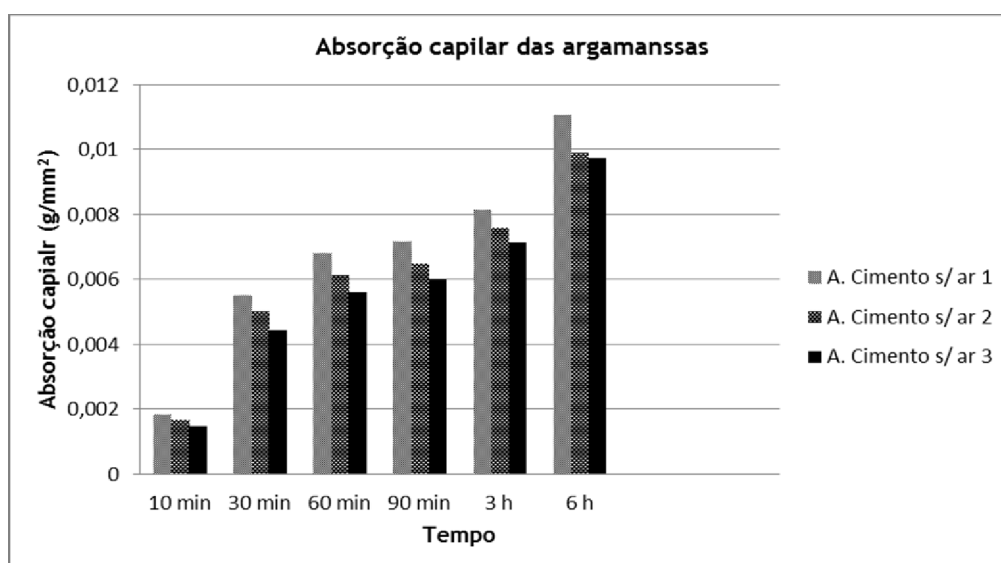


Figura B.17: Absorção capilar das argamassas de cimento sem ar

Tabela B.15: Altura da ascensão capilar das argamassas de cimento

Altura da ascensão capilar						
Tempo	Provetes	Altura de água (mm)				
		h_1	h_2	h_3	h_4	Media aritmética
10 min	A. C. c/ar 1	11	12	13	10	11,50
	A. C. c/ar 2	11	10	9	10	10,00
	A. C. c/ar 3	12	12	11	12	11,75
	A. C. s/ar 1	13	11	12	13	12,25
	A. C. s/ar 2	12	14	12	13	12,75
	A. C. s/ar 3	13	13	14	12	13,00
30 min	A. C. c/ar 1	33	22	22	20	24,25
	A. C. c/ar 2	31	22	20	24	24,25
	A. C. c/ar 3	18	22	15	15	17,50
	A. C. s/ar 1	32	26	18	30	26,50
	A. C. s/ar 2	22	22	23	12	19,75
	A. C. s/ar 3	29	32	28	12	25,25
60 min	A. C. c/ar 1	40	30	27	32	32,25
	A. C. c/ar 2	35	38	30	26	32,25
	A. C. c/ar 3	21	25	28	26	25,00
	A. C. s/ar 1	40	30	22	32	31,00
	A. C. s/ar 2	30	22	18	28	24,50
	A. C. s/ar 3	36	34	17	24	27,75
90 min	A. C. c/ar 1	45	40	34	35	38,50
	A. C. c/ar 2	41	42	36	31	37,50
	A. C. c/ar 3	31	33	32	33	32,25
	A. C. s/ar 1	45	34	33	38	37,50
	A. C. s/ar 2	35	30	28	34	31,75
	A. C. s/ar 3	42	37	26	33	34,50
3 h	A. C. c/ar 1	60	60	50	40	52,50
	A. C. c/ar 2	57	50	48	40	48,75
	A. C. c/ar 3	45	38	38	48	42,25
	A. C. s/ar 1	53	40	57	50	50,00
	A. C. s/ar 2	40	47	50	43	45,00
	A. C. s/ar 3	55	45	34	50	46,00
6 h	A. C. c/ar 1	79	68	59	68	68,50
	A. C. c/ar 2	65	70	65	55	63,75
	A. C. c/ar 3	57	50	62	58	56,75
	A. C. s/ar 1	69	72	65	56	65,50
	A. C. s/ar 2	57	62	58	47	56,00
	A. C. s/ar 3	54	60	66	58	59,50

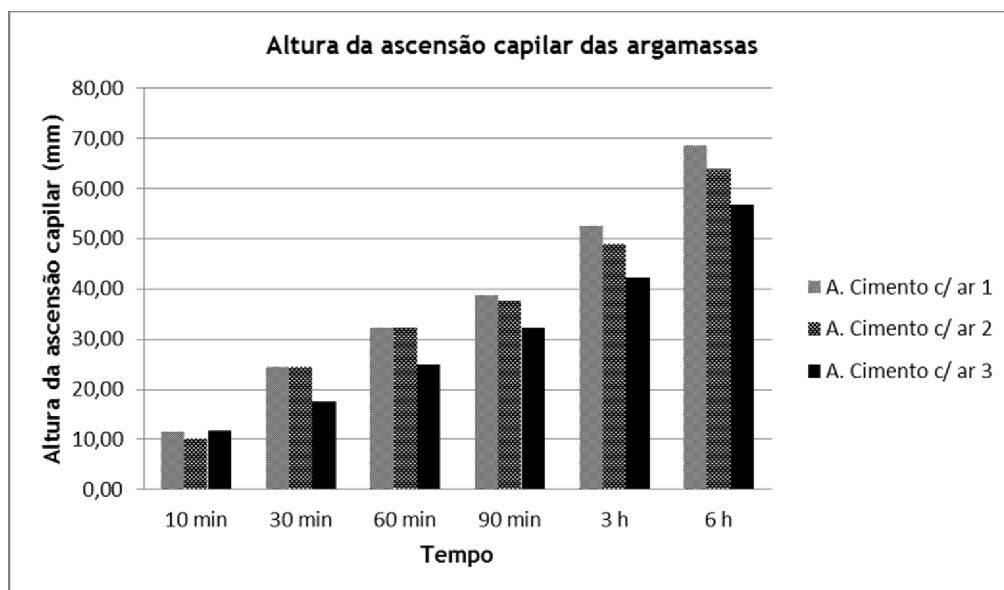


Figura B.18: Altura da ascensão capilar das argamassas de cimento com ar

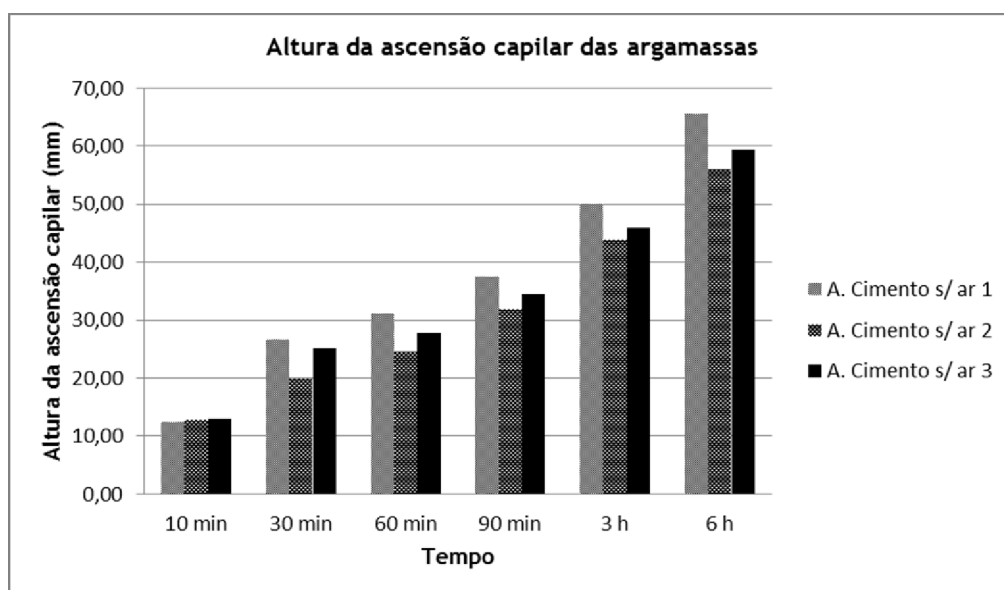


Figura B.19: Altura da ascensão capilar das argamassas de cimento sem ar

B.10 - Absorção de água por capilaridade das argamassas geopoliméricas

Tabela B.16: Absorção capilar das argamassas geopoliméricas

Absorção de água por capilaridade					
Tempo	Provetes	Massa (g)	$M_i - M_0$ (g)	$M_i - M_0/A$ (g/mm ²)	Média
10 min	A. G. c/ ar 1	581,97	0,97	0,00060	0,00046
	A. G. c/ ar 2	588,93	0,73	0,00046	
	A. G. c/ ar 3	587,63	0,73	0,00046	
	A. G. s/ ar 1	510,87	0,87	0,00054	0,00054
	A. G. s/ ar 2	560,33	1,73	0,00108	
	A. G. s/ ar 3	561,50	0,40	0,00025	
30 min	A. G. c/ ar 1	583,90	2,90	0,00181	0,00152
	A. G. c/ ar 2	590,40	2,20	0,00137	
	A. G. c/ ar 3	589,10	2,20	0,00138	
	A. G. s/ ar 1	512,60	2,60	0,00163	0,00187
	A. G. s/ ar 2	563,80	5,20	0,00325	
	A. G. s/ ar 3	562,30	1,20	0,00075	
60 min	A. G. c/ ar 1	584,20	3,20	0,00200	0,00177
	A. G. c/ ar 2	590,90	2,70	0,00169	
	A. G. c/ ar 3	589,50	2,60	0,00163	
	A. G. s/ ar 1	512,70	2,70	0,00169	0,00194
	A. G. s/ ar 2	563,90	5,30	0,00331	
	A. G. s/ ar 3	562,40	1,30	0,00081	
90 min	A. G. c/ ar 1	584,48	3,48	0,00217	0,00195
	A. G. c/ ar 2	591,20	3,00	0,00188	
	A. G. c/ ar 3	589,80	2,90	0,00181	
	A. G. s/ ar 1	512,83	2,83	0,00177	0,00202
	A. G. s/ ar 2	564,03	5,42	0,00339	
	A. G. s/ ar 3	562,55	1,45	0,00091	
3h	A. G. c/ ar 1	585,30	4,30	0,00269	0,00250
	A. G. c/ ar 2	592,10	3,90	0,00244	
	A. G. c/ ar 3	590,70	3,80	0,00238	
	A. G. s/ ar 1	513,20	3,20	0,00200	0,00227
	A. G. s/ ar 2	564,40	5,80	0,00362	
	A. G. s/ ar 3	563,00	1,90	0,00119	
6h	A. G. c/ ar 1	586,30	5,30	0,00331	0,00298
	A. G. c/ ar 2	592,90	4,70	0,00294	
	A. G. c/ ar 3	591,20	4,30	0,00269	
	A. G. s/ ar 1	513,50	3,50	0,00219	0,00258
	A. G. s/ ar 2	564,90	6,30	0,00394	
	A. G. s/ ar 3	563,70	2,60	0,00163	

Tabela B.17: Massas iniciais

M ₀ [g]	
A. G. c/ ar 1	581,00
A. G. c/ ar 2	588,20
A. G. c/ ar 3	586,90
A. G. s/ ar 1	510,00
A. G. s/ ar 2	558,60
A. G. s/ ar 3	561,10

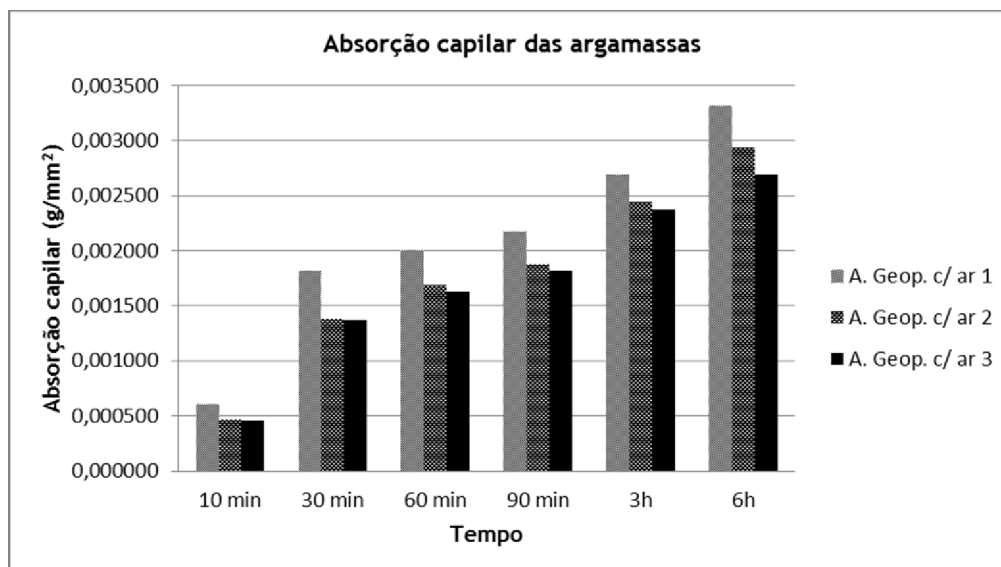


Figura B.20: Absorção capilar das argamassas geopoliméricas com ar

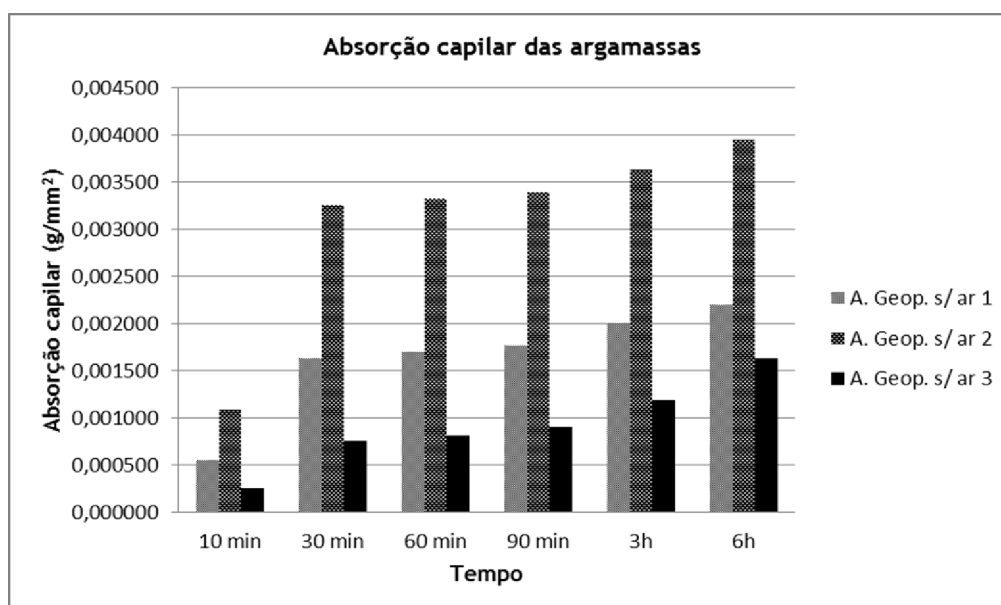


Figura B.21: Absorção capilar das argamassas geopoliméricas sem ar

Tabela B.18: Altura da ascensão capilar

Altura da ascensão capilar						
Tempo	Provetes	Altura de água (mm)				
		h_1	h_2	h_3	h_4	Media aritmética
10 min	A. G. c/ ar 1	15	13	15	14	14,25
	A. G. c/ ar 2	13	13	12	13	12,75
	A. G. c/ ar 3	14	15	13	12	13,50
	A. G. s/ ar 1	13	12	11	13	12,25
	A. G. s/ ar 2	12	14	12	13	12,75
	A. G. s/ ar 3	13	14	12	15	13,50
30 min	A. G. c/ ar 1	38	33	35	30	34,00
	A. G. c/ ar 2	43	33	28	36	35,00
	A. G. c/ ar 3	44	38	30	29	35,25
	A. G. s/ ar 1	20	25	27	35	26,75
	A. G. s/ ar 2	35	32	30	38	33,75
	A. G. s/ ar 3	42	35	32	37	36,50
60 min	A. G. c/ ar 1	40	46	36	33	38,75
	A. G. c/ ar 2	42	42	35	40	39,75
	A. G. c/ ar 3	42	49	39	40	42,50
	A. G. s/ ar 1	30	25	37	34	31,50
	A. G. s/ ar 2	40	34	37	40	37,75
	A. G. s/ ar 3	47	35	40	39	40,25
90 min	A. G. c/ ar 1	44	47	39	36	41,50
	A. G. c/ ar 2	46	44	42	45	44,25
	A. G. c/ ar 3	46	51	43	44	46,00
	A. G. s/ ar 1	43	36	44	43	41,50
	A. G. s/ ar 2	44	40	46	47	44,25
	A. G. s/ ar 3	50	43	43	43	44,75
3h	A. G. c/ ar 1	50	48	45	45	47,00
	A. G. c/ ar 2	50	45	55	55	51,25
	A. G. c/ ar 3	52	55	48	48	50,75
	A. G. s/ ar 1	65	53	60	60	59,50
	A. G. s/ ar 2	49	50	65	65	57,25
	A. G. s/ ar 3	55	60	50	50	53,75
6h	A. G. c/ ar 1	60	70	65	60	63,75
	A. G. c/ ar 2	55	85	55	50	61,25
	A. G. c/ ar 3	75	60	65	70	67,50
	A. G. s/ ar 1	70	75	72	76	73,25
	A. G. s/ ar 2	82	90	85	95	88,00
	A. G. s/ ar 3	110	90	95	100	98,75

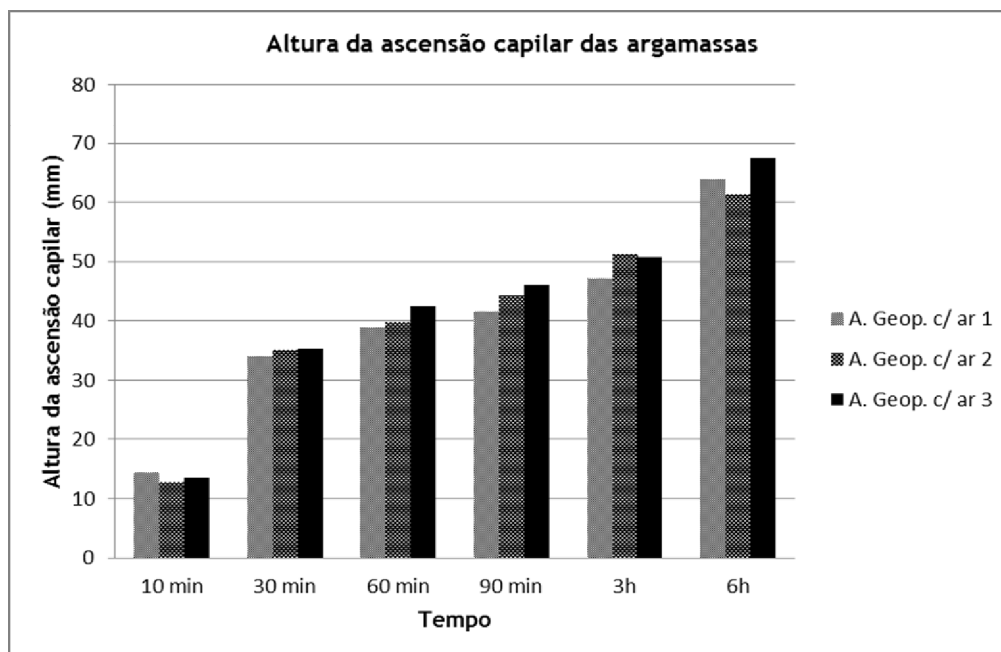


Figura B.22: Altura da ascensão capilar das argamassas geopoliméricas com ar

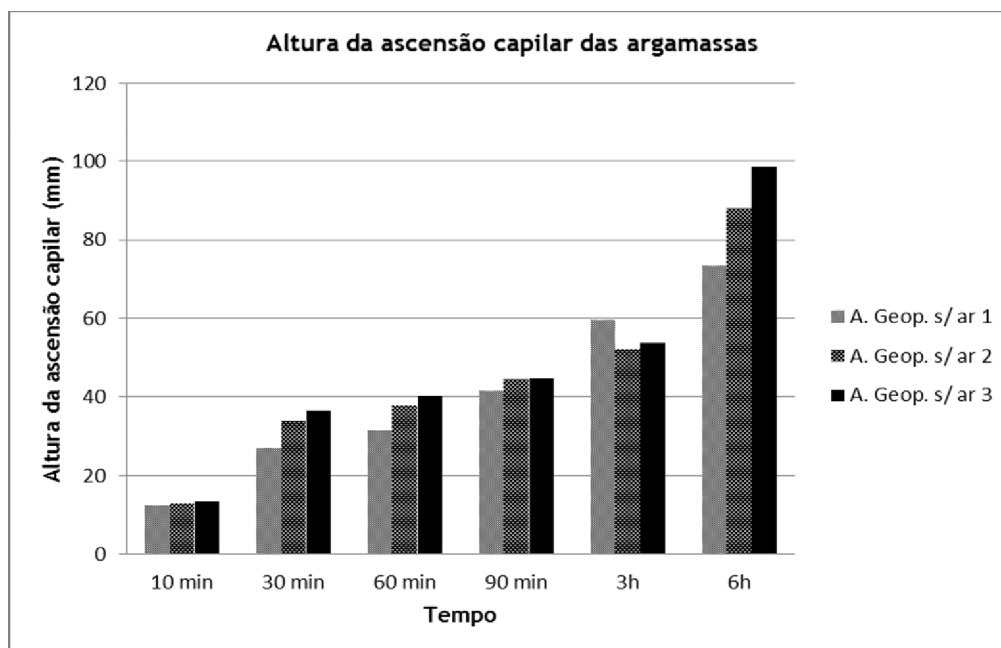


Figura B.23: Altura da ascensão capilar das argamassas geopoliméricas sem ar

B.11 - Porosidade e Massa volúmica das argamassas de cimento

Tabela B.19: Massa seca das argamassas de cimento.

Massa seca (100 °C) [g]			
A. Cimento com ar		A. Cimento sem ar	
A. C. 1	109,20	A. C. 1	110,70
A. C. 2	109,40	A. C. 2	128,70
A. C. 3	126,70	A. C. 3	110,90
A. C. 4	108,90	A. C. 4	110,90
A. C. 5	109,20	A. C. 5	109,90
A. C. 6	108,90	A. C. 6	109,90

Tabela B.20: Massa saturada com superfície seca das argamassas de cimento.

Massa saturada com superfície seca [g]			
A. Cimento com ar		A. Cimento sem ar	
A. C. 1	119,50	A. C. 1	121,30
A. C. 2	119,50	A. C. 2	141,90
A. C. 3	139,40	A. C. 3	120,90
A. C. 4	118,80	A. C. 4	120,80
A. C. 5	117,90	A. C. 5	120,00
A. C. 6	119,80	A. C. 6	119,90

Tabela B.21: Massa saturada imersa das argamassas de cimento.

Massa saturada imersa [g]			
A. Cimento com ar		A. Cimento sem ar	
A. C. 1	54,20	A. C. 1	55,60
A. C. 2	53,50	A. C. 2	75,00
A. C. 3	73,00	A. C. 3	56,00
A. C. 4	53,80	A. C. 4	56,40
A. C. 5	53,90	A. C. 5	56,90
A. C. 6	54,00	A. C. 6	55,90

Tabela B.22: Volume das amostras

Volume da amostra (m ³)

A. Cimento com ar		A. Cimento sem ar	
A. C. 1	0,0653	A. C. 1	0,0657
A. C. 2	0,0660	A. C. 2	0,0669
A. C. 3	0,0664	A. C. 3	0,0649
A. C. 4	0,0650	A. C. 4	0,0644
A. C. 5	0,0640	A. C. 5	0,0631
A. C. 6	0,0658	A. C. 6	0,0640
Média	0,0654	Média	0,0648

B.12 - Porosidade e Massa volúmica das argamassas geopoliméricas

Tabela B.23: Massa seca das argamassas geopoliméricas.

Massa seca (100 °C) [g]			
A. Geop. com ar		A. Geop. sem ar	
A. G. 1	124,20	A. G. 1	128,40
A. G. 2	128,80	A. G. 2	127,70
A. G. 3	118,80	A. G. 3	128,50
A. G. 4	126,90	A. G. 4	109,50
A. G. 5	116,60	A. G. 5	128,10
A. G. 6	118,60	A. G. 6	126,60

Tabela B.24: Massa saturada com superfície seca das argamassas geopoliméricas.

Massa saturada com superfície seca [g]			
A. Geop. com ar		A. Geop. sem ar	
A. G. 1	136,70	A. G. 1	140,50
A. G. 2	140,90	A. G. 2	141,00
A. G. 3	135,60	A. G. 3	140,70
A. G. 4	139,40	A. G. 4	128,00
A. G. 5	133,60	A. G. 5	141,60
A. G. 6	134,80	A. G. 6	138,40

Tabela B.25: Massa saturada imersa das argamassas geopoliméricas.

Massa saturada imersa [g]			
A. Geop. com ar		A. Geop. sem ar	
A. G. 1	73,10	A. G. 1	76,00
A. G. 2	75,80	A. G. 2	75,90
A. G. 3	70,00	A. G. 3	75,70
A. G. 4	74,70	A. G. 4	65,30
A. G. 5	68,90	A. G. 5	74,60
A. G. 6	70,00	A. G. 6	74,00

Tabela B.26: Volume das amostras

Volume da amostra (m ³)			
A. Geop. com ar		A. Geop. sem ar	
A. G. 1	0,0636	A. G. 1	0,0607
A. G. 2	0,0651	A. G. 2	0,065
A. G. 3	0,0656	A. G. 3	0,0599
A. G. 4	0,0647	A. G. 4	0,0741
A. G. 5	0,0647	A. G. 5	0,059
A. G. 6	0,0648	A. G. 6	0,0608

B.13 - Tempo de estabilização das temperaturas superficiais das A. Cimento

Tabela B.27: Tempo da estabilização das temperaturas superficiais das A. Cimento

Tempo de estabilização das temperaturas superficiais das argamassas de cimento								
Hora	Δt (min)	Tensão imposta (w)	Tensão medida (V)	Corrente (A)	T1 Sup. (° C)	T1 Inf. (° C)	T2 Sup. (° C)	T2 Inf. (° C)
11:21	0	50	2,544	48,411	28,75	21,45	29,95	22,25
11:42	21	50	2,514	48,357	32,65	24,45	33,35	25,15
12:02	41	50	2,514	48,367	34,75	26,45	35,95	27,35
12:22	61	50	2,512	48,376	36,45	27,85	36,95	28,55
12:42	81	50	2,513	48,441	37,45	28,65	38,25	29,55
13:00	99	50	2,515	48,445	38,25	29,45	38,95	30,35
13:22	121	50	2,514	48,467	38,95	30,05	39,95	31,25
13:42	141	50	2,511	48,451	39,25	30,35	40,35	31,65
14:00	159	50	2,513	48,473	39,65	30,65	40,55	31,95
14:22	181	50	2,514	48,492	39,95	30,95	41,15	32,45
14:46	205	50	2,515	48,531	40,15	31,25	41,35	32,75
15:00	219	50	2,514	48,522	40,25	31,25	41,45	32,85
15:20	239	50	2,518	48,564	40,55	31,55	41,65	33,05
15:40	259	50	2,516	48,546	40,55	31,55	41,85	33,05
16:00	279	50	2,518	48,569	40,65	31,75	42,05	33,25
16:20	299	50	2,517	48,576	40,75	31,65	42,15	33,25
16:40	319	50	2,519	48,618	40,85	31,65	42,15	33,40
17:00	339	50	2,516	48,605	40,85	31,70	42,25	33,45

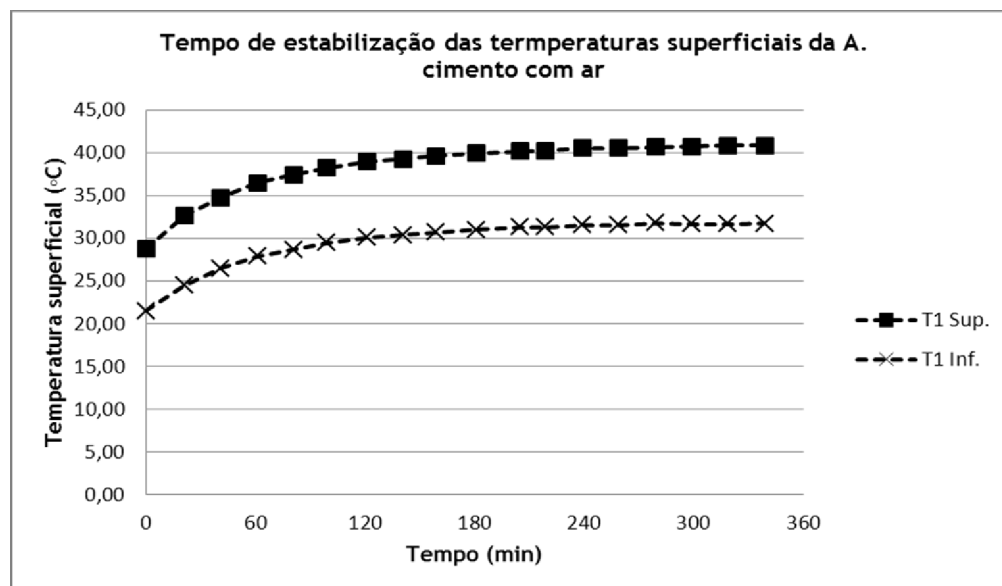


Figura B.25: Evolução da estabilização da temperatura superficial da argamassa cimento com ar (P = 50 W)

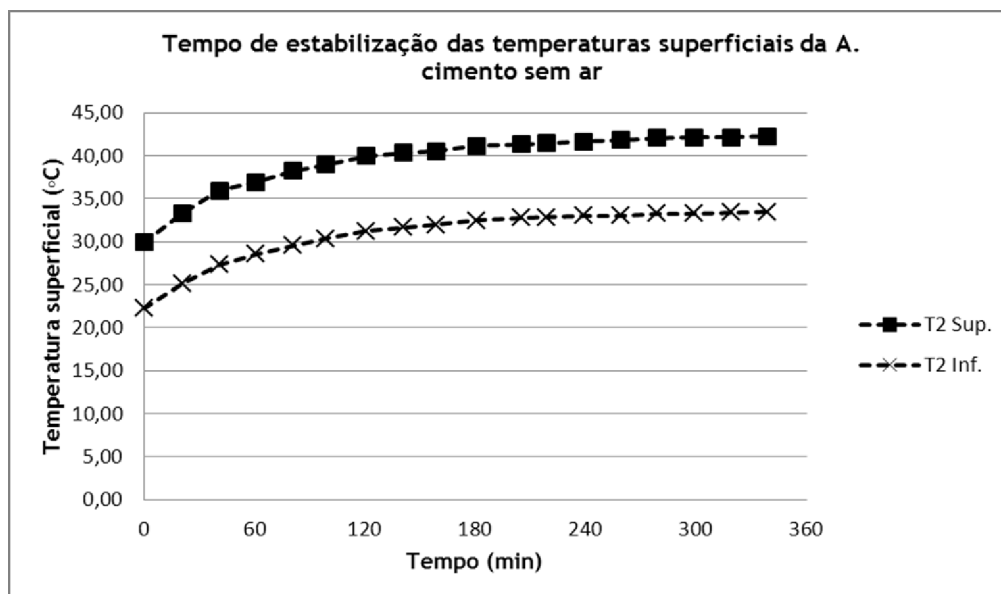


Figura B.26: Evolução da estabilização da temperatura superficial da argamassa cimento com ar (P = 50 W)

B.14 - Tempo de estabilização das temperaturas superficiais das argamassas geopoliméricas

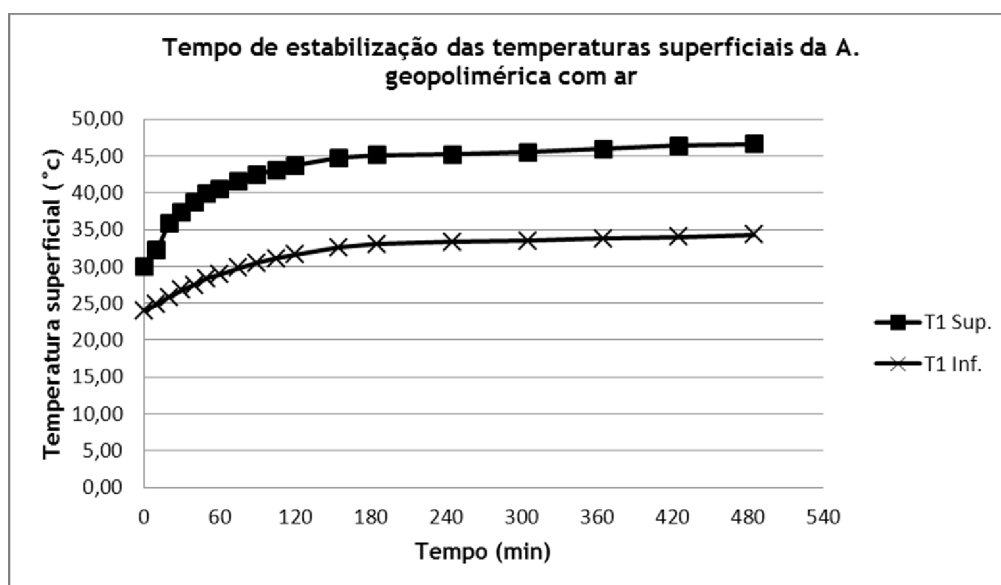


Figura B.27: Evolução da estabilização da temperatura superficial da argamassa Geopolimérica com ar (P = 50 W)

Tabela B.28: Tempo da estabilização das temperaturas superficiais (P = 50 W)

Tempo de estabilização das temperaturas superficiais das argamassas geopoliméricas								
Hora	Δt (min)	Tensão imposta (w)	Tensão medida (V)	Corrente (A)	T1 Sup. (° C)	T1 Inf. (° C)	T2 Sup. (° C)	T2 Inf. (° C)
10:55	0	50	51,071	2,649	30,00	24,00	30,60	24,40
11:05	10	50	50,950	2,643	32,20	24,80	33,90	25,30
11:15	20	50	50,827	2,636	35,90	25,80	35,60	26,20
11:25	30	50	50,717	2,631	37,30	26,80	37,00	27,20
11:35	40	50	50,633	2,626	38,70	27,50	38,00	27,90
11:45	50	50	50,750	2,642	39,90	28,40	39,00	28,60
11:55	60	50	50,725	2,636	40,50	28,90	39,60	29,30
12:10	75	50	50,922	2,649	41,50	29,80	40,50	30,00
12:25	90	50	50,872	2,643	42,50	30,50	41,30	30,80
12:40	105	50	51,062	2,646	43,05	31,10	41,90	31,30
12:55	120	50	51,059	2,649	43,70	31,60	42,50	31,90
13:30	155	50	50,996	2,644	44,70	32,60	43,20	32,70
14:00	185	50	50,476	2,624	45,10	33,00	43,60	33,30
15:00	245	50	50,527	2,622	45,20	33,30	43,80	33,40
16:00	305	50	50,931	2,644	45,50	33,45	44,00	33,50
17:00	365	50	51,476	2,655	45,90	33,75	44,40	33,70
18:00	425	50	51,883	2,689	46,40	34,00	44,90	34,05
19:00	485	50	51,687	2,683	46,60	34,30	45,20	34,20

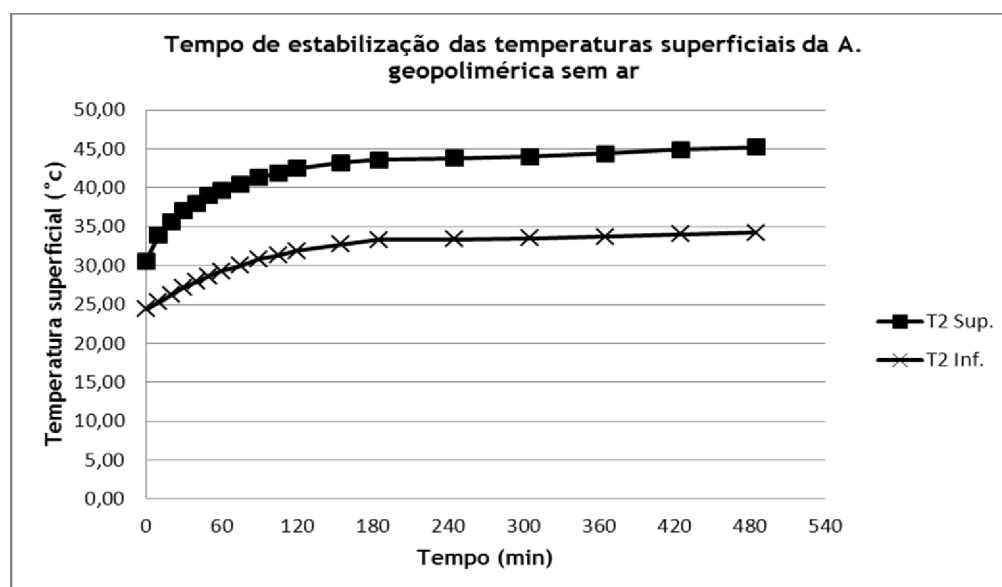


Figura B.27: Evolução da estabilização da temperatura superficial da argamassa Geopolimérica sem ar (P = 50 W)

Tabela B.29: Tempo da estabilização das temperaturas superficiais (P = 55 W)

Tempo de estabilização das temperaturas superficiais das argamassas geopoliméricas								
Hora	Δt (min)	Tensão imposta (W)	Tensão medida (V)	Corrente (A)	T1 Sup. (° C)	T1 Inf. (° C)	T2 Sup. (° C)	T2 Inf. (° C)
10:15	0	55	55,451	2,886	28,40	23,20	28,40	23,50
10:45	30	55	55,151	2,866	37,70	26,20	37,70	26,80
11:15	60	55	55,240	2,863	42,20	29,30	41,40	29,90
11:45	90	55	55,317	2,866	45,20	31,90	44,20	32,20
12:45	150	55	55,852	2,892	48,40	34,70	46,80	34,90
13:45	210	55	56,250	2,913	50,10	36,20	48,30	36,30
14:45	270	55	56,231	2,913	50,90	36,90	49,10	36,90
15:45	330	55	56,157	2,910	51,30	37,30	50,30	37,20
16:45	390	55	56,267	2,913	51,60	37,50	50,50	37,40
17:45	450	55	56,730	2,936	51,80	37,60	50,60	37,60

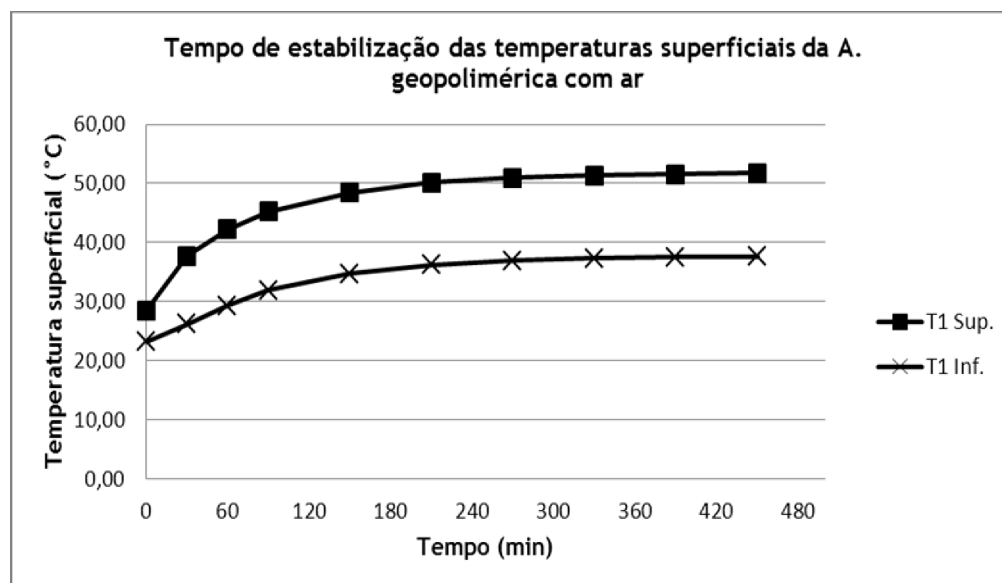


Figura B.28: Evolução da estabilização da temperatura superficial da argamassa Geopolimérica com ar (P = 55 W)

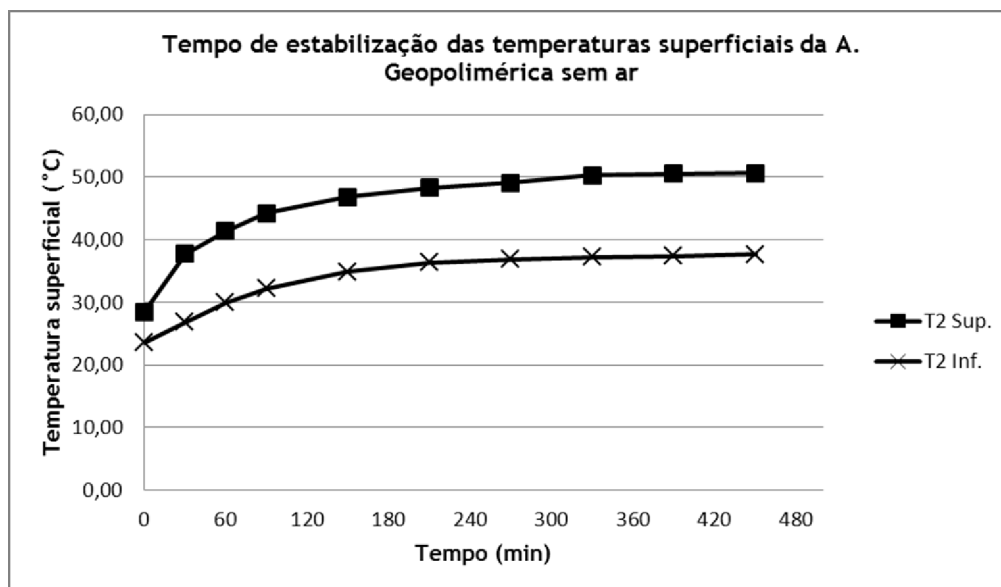


Figura B.29: Evolução da estabilização da temperatura superficial da argamassa Geopolimérica sem ar (P = 55 W)

Tabela B.30: Tempo da estabilização das temperaturas superficiais (P = 60 W)

Tempo de estabilização das temperaturas superficiais das argamassas geopoliméricas								
Hora	Δt (min)	Tensão imposta (W)	Tensão medida (V)	Corrente (A)	T1 Sup. (° C)	T1 Inf. (° C)	T2 Sup. (° C)	T2 Inf. (° C)
09:40	0	60	61,662	3,199	33,20	24,40	32,90	24,80
10:00	20	60	61,619	3,196	40,50	27,40	41,35	28,95
10:30	50	60	61,183	3,167	47,60	32,30	47,00	33,40
11:00	80	60	60,807	3,144	51,00	35,50	50,20	36,00
11:30	110	60	60,632	3,141	53,00	37,45	51,20	37,70
12:00	140	60	60,832	3,145	54,10	38,50	52,85	38,60
13:00	200	60	61,791	3,186	55,95	40,00	53,80	40,00
14:00	260	60	60,928	3,152	56,50	40,60	54,80	40,90
15:00	320	60	60,903	3,146	56,55	40,85	54,90	41,45
16:00	380	60	60,810	3,136	56,90	41,10	55,15	41,65
17:00	440	60	61,225	3,160	57,30	41,10	55,55	41,45
18:00	500	60	61,206	3,155	57,00	41,20	55,50	41,35

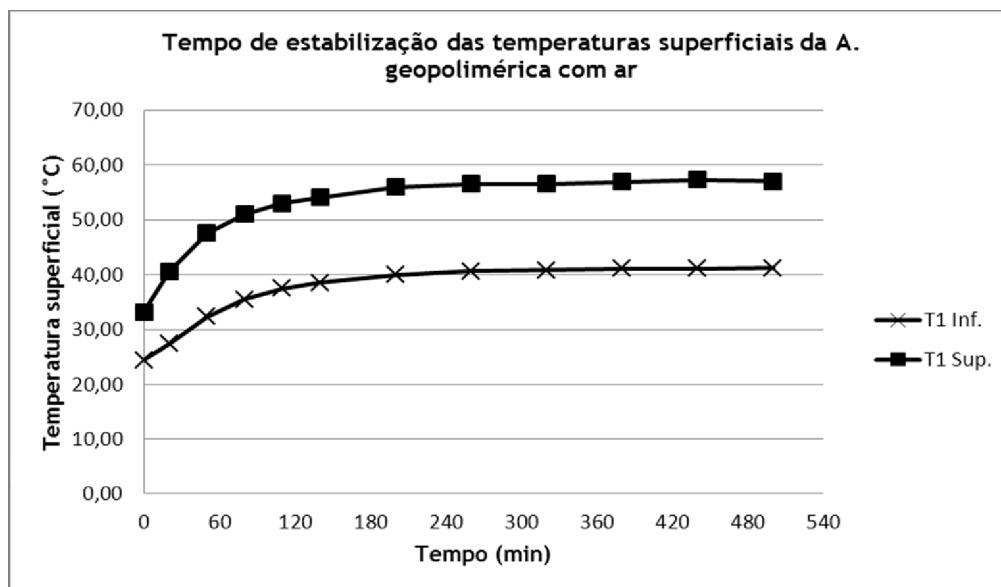


Figura B.30: Evolução da estabilização da temperatura superficial da argamassa Geopolimérica com ar (P = 60 W)

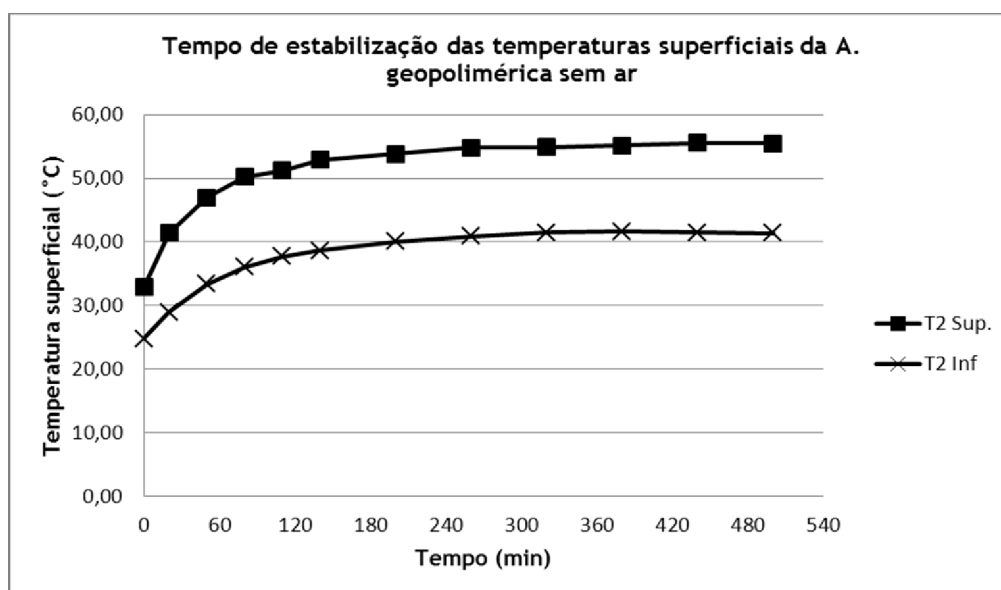


Figura B.31: Evolução da estabilização da temperatura superficial da argamassa Geopolimérica sem ar (P = 60 W)

Tabela B.31: Tempo da estabilização das temperaturas superficiais (P = 65 W)

Tempo de estabilização das temperaturas superficiais das argamassas geopoliméricas								
Hora	Δt (min)	Tensão imposta (W)	Tensão medida (V)	Corrente (A)	T1 Sup. (° C)	T1 Inf. (° C)	T2 Sup. (° C)	T2 Inf. (° C)
09:50	0	65	65,252	3,388	29,15	26,50	29,90	27,25
10:00	10	65	65,281	3,383	34,95	26,70	35,95	27,65
10:15	25	65	65,128	3,367	42,95	29,55	43,45	30,95
10:30	40	65	65,005	3,360	47,20	31,70	47,25	33,45
10:45	55	65	65,003	3,357	50,75	34,40	50,10	35,60
11:00	70	65	64,744	3,344	53,30	36,40	52,60	37,60
11:45	115	65	65,201	3,362	57,10	39,90	56,05	40,20
12:00	130	65	65,201	3,362	57,90	40,45	56,40	41,80
12:30	160	65	65,198	3,386	59,30	41,90	57,60	41,90
13:00	190	65	65,749	3,402	60,30	42,75	58,85	43,45
13:30	220	65	65,942	3,403	61,30	43,60	59,80	44,20
14:50	300	65	66,183	3,404	62,30	44,60	59,90	45,55
16:50	420	65	66,939	3,410	62,80	45,00	60,70	45,55
17:50	480	65	66,046	3,429	63,10	45,20	60,65	45,55

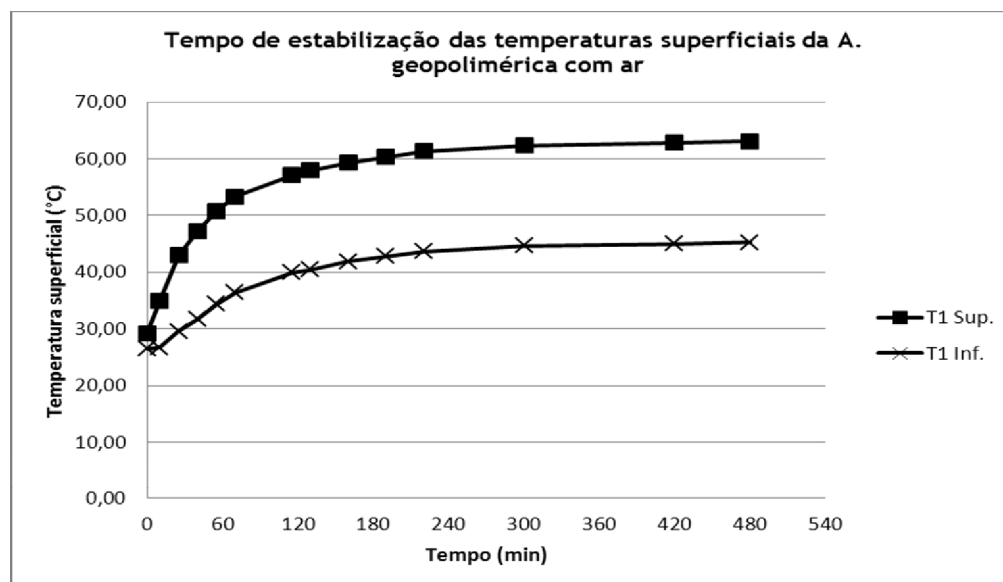


Figura B.32: Evolução da estabilização da temperatura superficial da argamassa Geopolimérica com ar (P = 65 W)

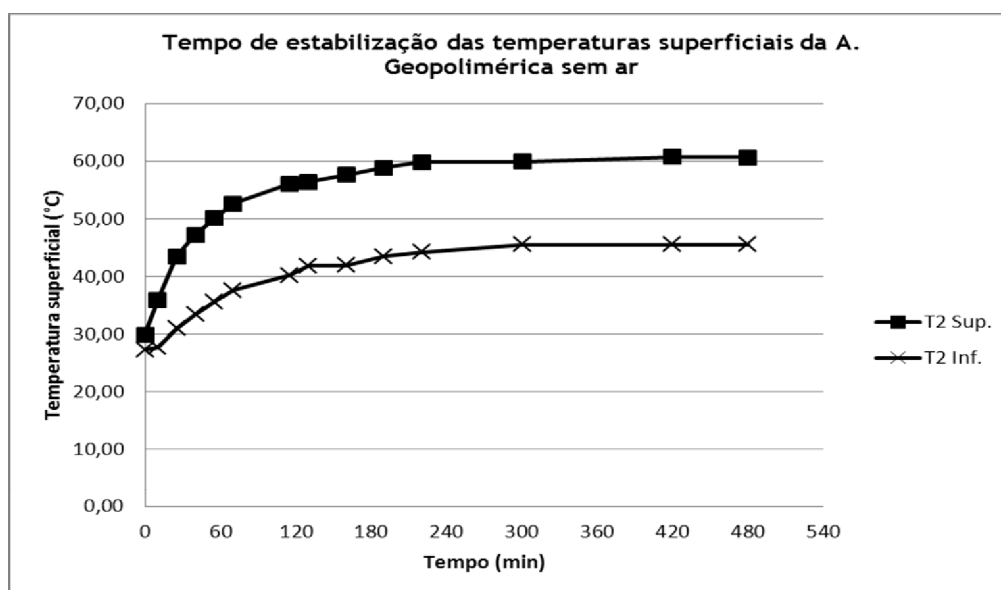


Figura B.33: Evolução da estabilização da temperatura superficial da argamassa Geopolimérica sem ar (P = 65 W)

Tabela B.32: Tempo da estabilização das temperaturas superficiais (P = 70 W)

Tempo de estabilização das temperaturas superficiais das argamassas geopoliméricas								
Hora	Δt (min)	Tensão imposta (W)	Tensão medida (V)	Corrente (A)	T1 Sup. (° C)	T1 Inf. (° C)	T2 Sup. (° C)	T2 Inf. (° C)
10:25	0	70	71,267	3,693	28,60	25,50	29,60	26,50
10:45	20	70	70,910	3,668	42,20	28,00	43,20	29,80
11:00	35	70	70,043	3,668	49,90	32,20	50,60	34,80
11:30	65	70	70,796	3,643	55,60	36,50	55,20	38,10
12:00	125	70	71,118	3,663	60,90	41,40	59,60	42,90
12:30	155	70	71,282	3,680	64,30	44,50	62,40	44,60
15:20	315	70	69,629	3,583	67,00	47,80	65,30	48,05
16:20	375	70	70,397	3,625	67,40	48,00	65,30	48,30

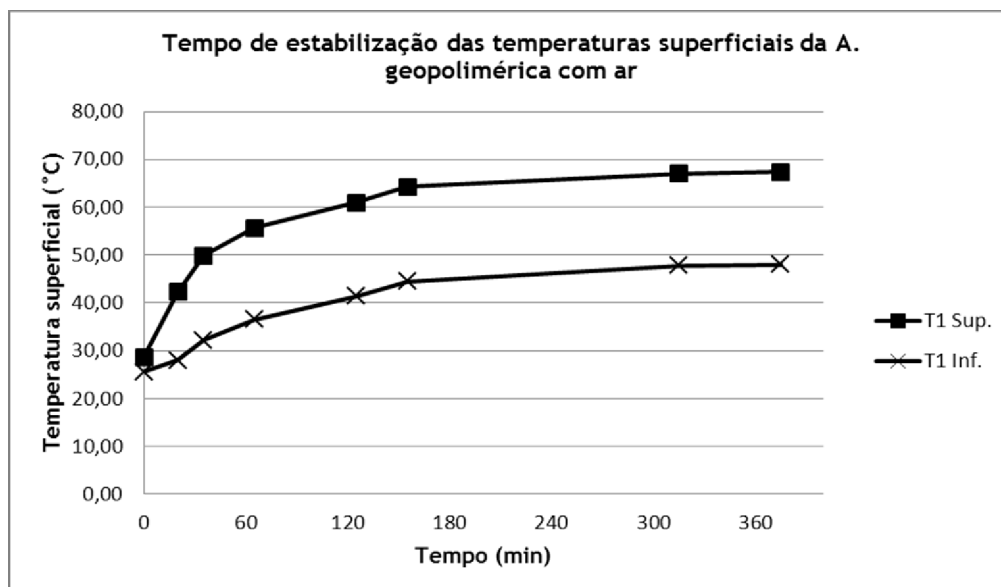


Figura B.34: Evolução da estabilização da temperatura superficial da argamassa Geopolimérica com ar (P = 70 W)

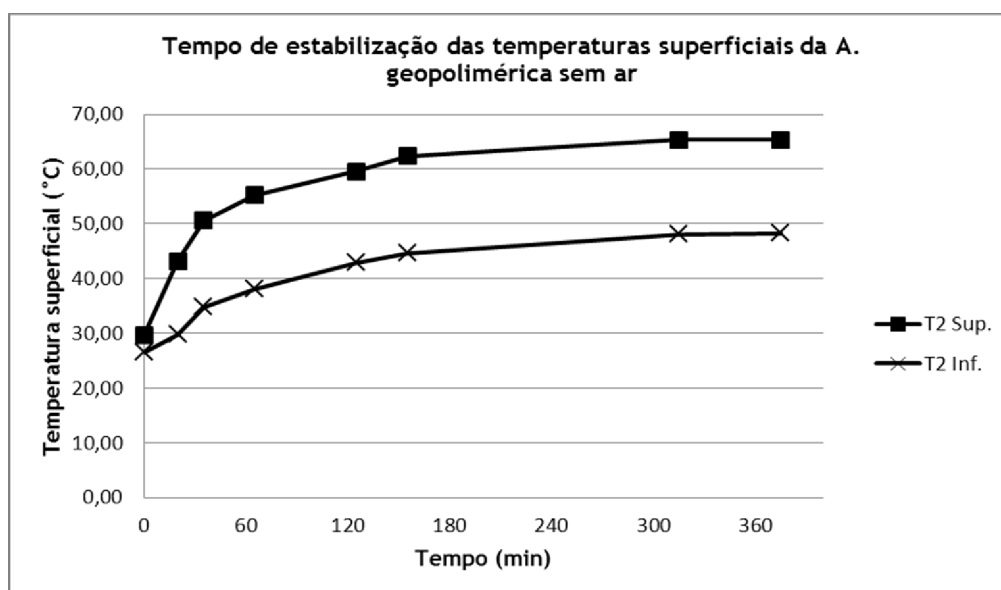


Figura B.35: Evolução da estabilização da temperatura superficial da argamassa Geopolimérica sem ar (P = 70 W)

B.15 - Resistência e condutibilidade térmica das argamassas de cimento

Tabela B.33: Resistência e condutibilidade térmica das argamassas de cimento

Elemento	Potência dissipada (w)	Fluxo de calor (q'')	Resistência térmica (R _t)	Condutibilidade térmica (λ)
A. Cimento c/ ar (1)	122,2902	291,1671	0,0314	0,9546
	148,7548	354,1781	0,0299	1,0024
	178,0655	423,9654	0,0292	1,0257
	206,2391	491,0455	0,0287	1,0448
	235,4514	560,5986	0,0273	1,0992
A. Cimento s/ ar (2)	122,2902	291,1671	0,0302	0,9926
	148,7548	354,1781	0,0291	1,0316
	178,0655	423,9654	0,0281	1,0688
	206,2391	491,0455	0,0275	1,0912
	235,4514	560,5986	0,0260	1,1539

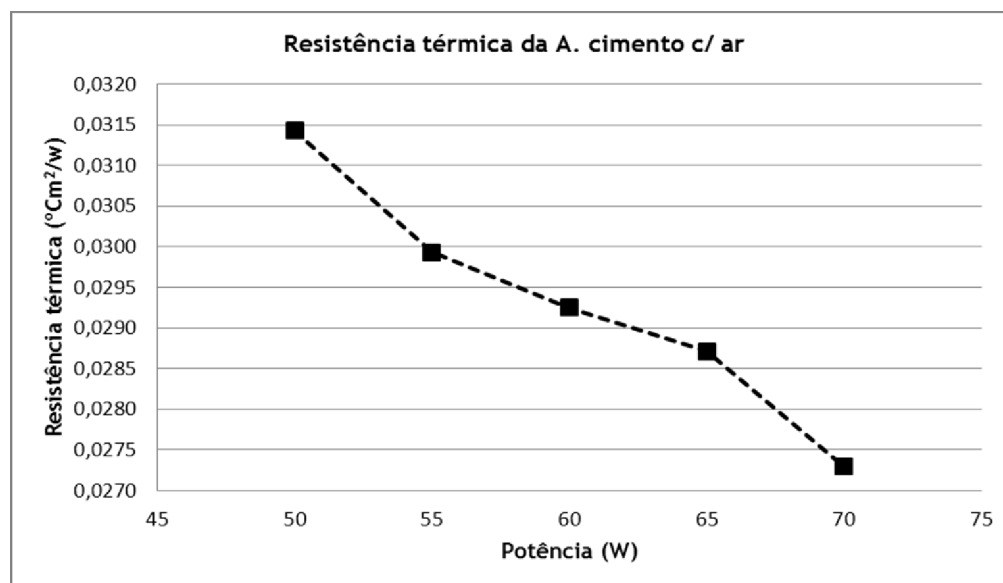


Figura B.36: Resistência térmica da argamassa de cimento com ar

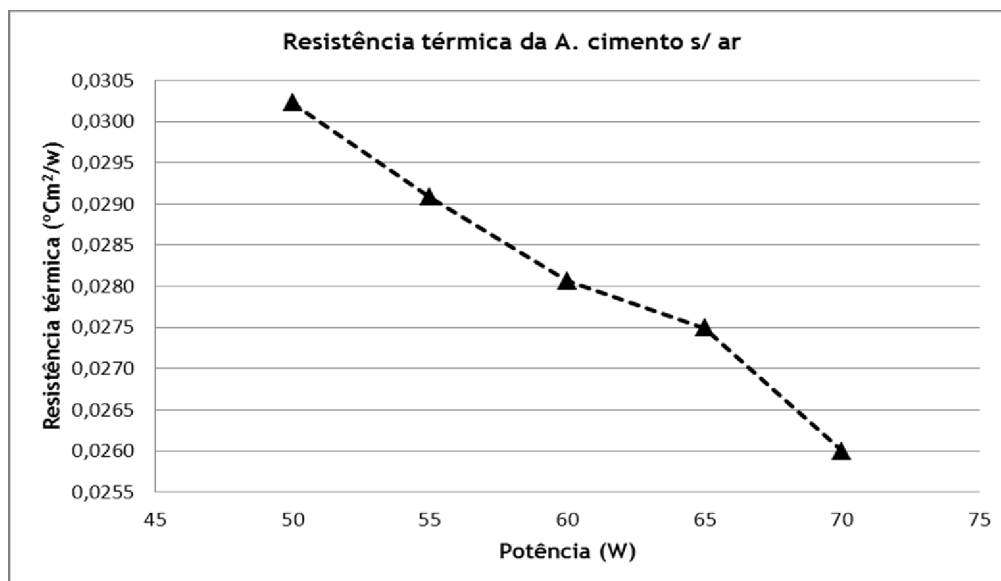


Figura B.37: Resistência térmica da argamassa de cimento com ar

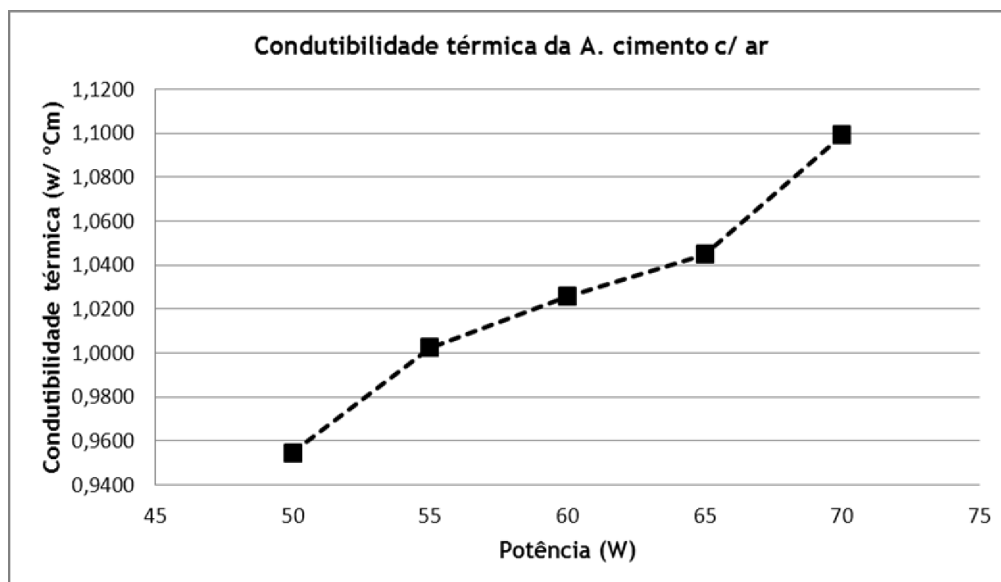


Figura B.38: Condutibilidade térmica da argamassa de cimento com ar

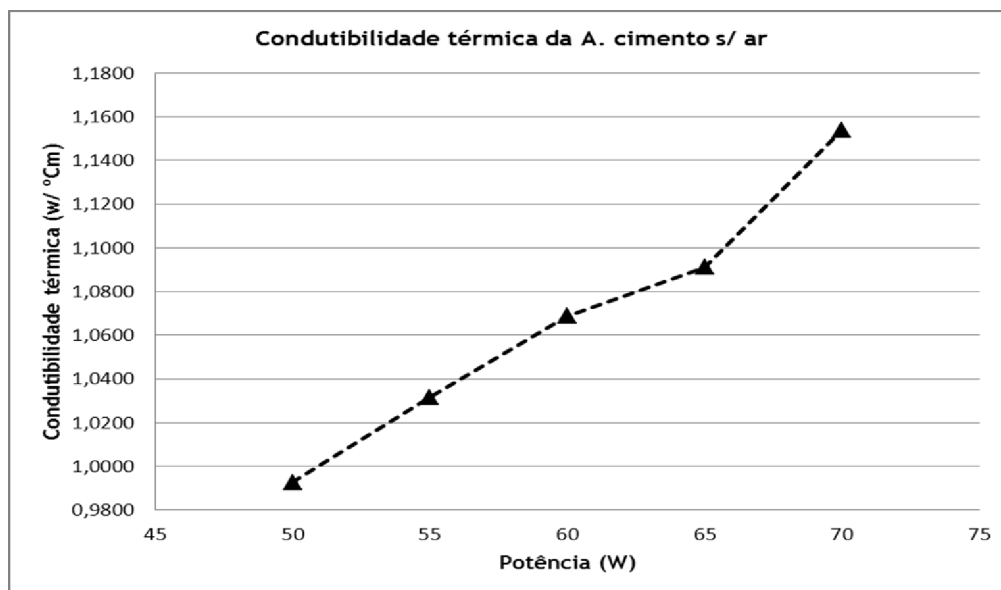


Figura B.39: Condutibilidade térmica da argamassa de cimento sem ar

B.16 - Resistência e condutibilidade térmica das argamassas geopoliméricas

Tabela B.34: Resistência e condutibilidade térmica das argamassas geopoliméricas

Elemento	Potência dissipada (w)	Fluxo de calor (q'')	Resistência térmica (R _t)	Condutibilidade térmica (λ)
A. Geopolimérica com ar	138,6762	330,1815	0,0373	0,8053
	166,5593	396,5697	0,0358	0,8378
	193,1049	459,7736	0,0344	0,8730
	226,4717	539,2184	0,0332	0,9037
	255,1891	607,5932	0,0319	0,9396
A. Geopolimérica sem ar	138,6762	330,1815	0,0333	0,9005
	166,5593	396,5697	0,0328	0,9152
	193,1049	459,7736	0,0308	0,9748
	226,4717	539,2184	0,0280	1,0713
	255,1891	607,5932	0,0280	1,0722

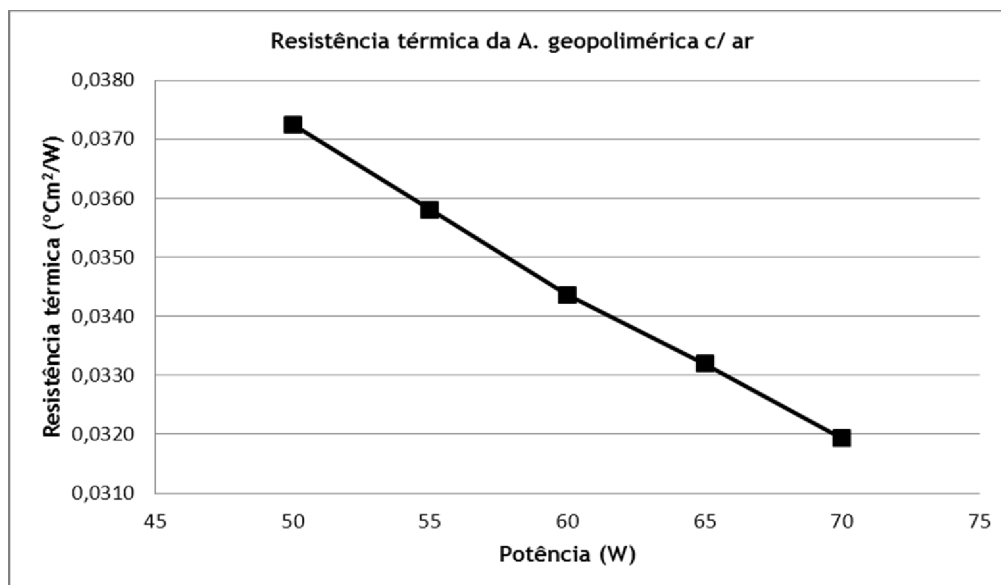


Figura B.40: Resistência térmica da argamassa geopolimérica com ar

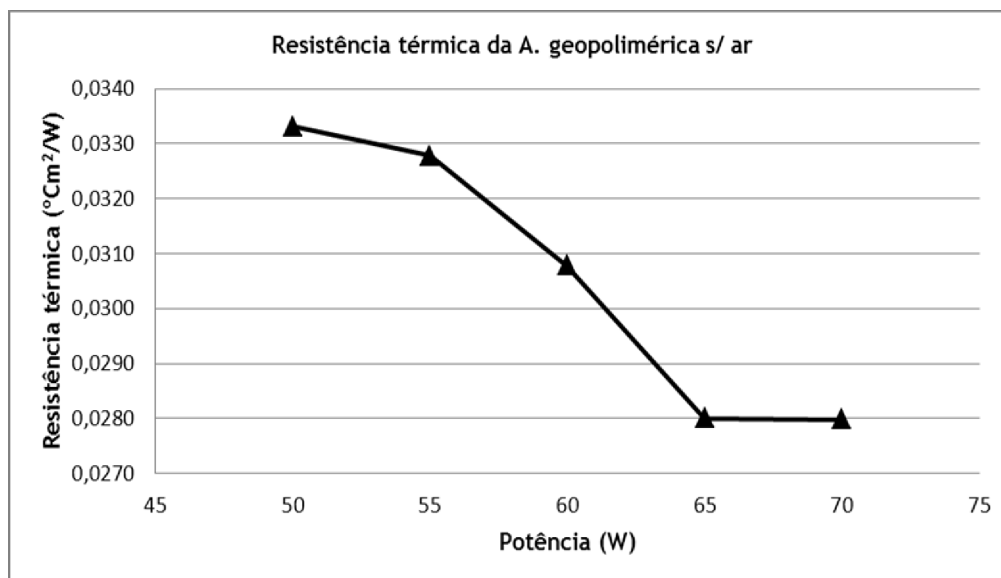


Figura B.41: Resistência térmica da argamassa geopolimérica sem ar

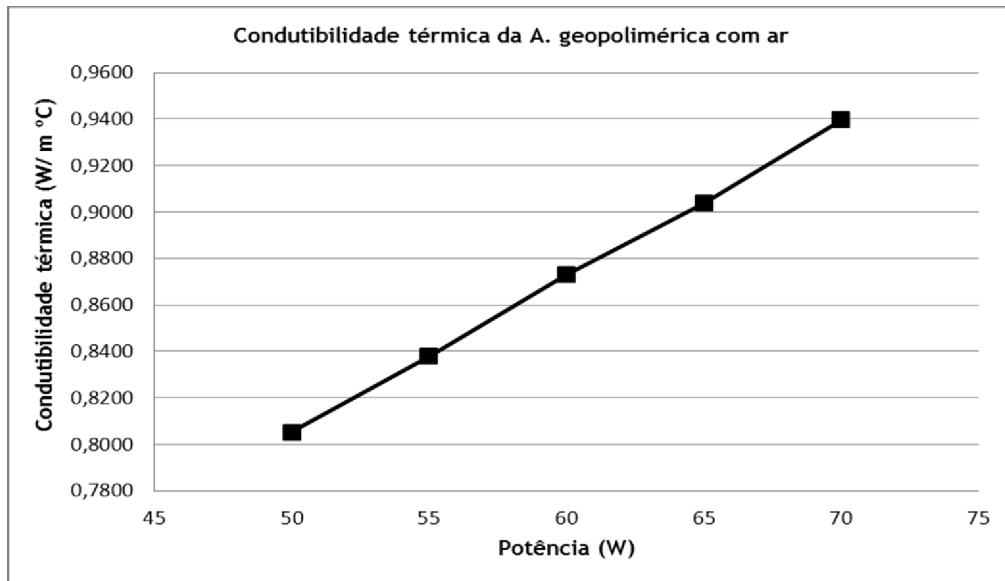


Figura B.42: Condutibilidade térmica da argamassa geopolimérica com ar

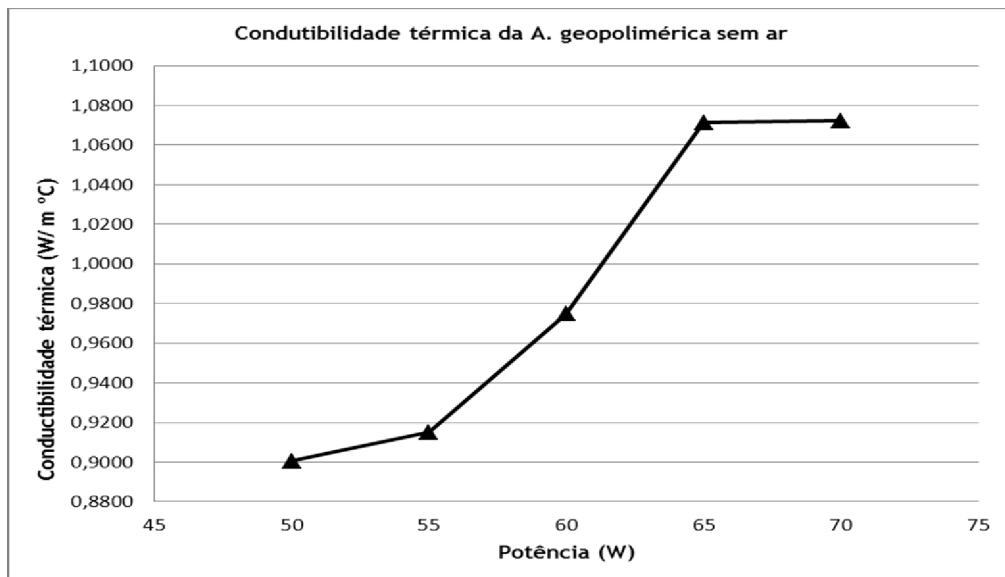


Figura B.43: Condutibilidade térmica da argamassa geopolimérica sem ar