



ANA LUÍSA PINHEIRO ARGAMASSAS DE CAL COM POZOLANAS PARA
LOMELINO VELOSA REVESTIMENTO DE PAREDES ANTIGAS



ANA LUÍSA PINHEIRO ARGAMASSAS DE CAL COM POZOLANAS PARA
LOMELINO VELOSA REVESTIMENTO DE PAREDES ANTIGAS

Tese apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil, realizada sob a orientação científica da Doutora Maria do Rosário da Silva Veiga, Investigadora Principal do Laboratório Nacional de Engenharia Civil e do Professor Doutor Paulo Jorge Melo Matias Faria Vila-Real, Professor Catedrático da Secção Autónoma de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro

Ao Miguel, à Inês e à Maria

o júri

presidente

Professora Doutora Maria Paula Macedo Rocha Malonek
Professora Catedrática da Universidade de Aveiro

Professor Doutor Fernando Joaquim Fernandes Tavares Rocha
Professor Catedrático da Universidade de Aveiro

Professor Doutor Paulo Jorge de Melo Matias Faria de Vila Real
Professor Catedrático da Universidade de Aveiro

Professor Doutor Said Jalali
Professor Associado com Agregação da Escola de Engenharia da Universidade do Minho

Professor Doutor Paulo Barreto Cachim
Professor Associado da Universidade de Aveiro

Professor Doutor Victor Miguel Carneiro de Sousa Ferreira.
Professor Auxiliar da Universidade de Aveiro

Professor Doutor João Paulo Pereira de Freitas Coroado
Professor Coordenador do Instituto Politécnico de Tomar

Doutora Maria do Rosário da Silva Veiga
Investigadora Principal do Laboratório Nacional de Engenharia Civil

agradecimentos

Os meus sinceros agradecimentos a todos aqueles que directa ou indirectamente possibilitaram a realização deste trabalho.

À Investigadora Principal Rosário Veiga, pela sua orientação e partilha de conhecimento, pela sua disponibilidade, acompanhamento científico e por ter garantido as condições para o desenvolvimento do trabalho. Acima de tudo, agradeço a amizade, que constituiu um valioso estímulo e incentivo.

Ao Professor Paulo Vila-Real, pela sua co-orientação, disponibilidade e incentivo.

Ao Professor João Coroado, pela sua atitude construtiva, debate científico, disponibilidade, ajuda na interpretação de resultados de análises e por ter encetado novas perspectivas e dimensões na análise do trabalho.

Universidade de Aveiro

À Secção Autónoma de Engenharia Civil e colegas, representada pelo seu Presidente, Professor Claudino Cardoso, por terem garantido as condições profissionais necessárias para poder realizar o trabalho. Em especial agradeço ao Professor Victor Ferreira, pela disponibilidade e debate científico.

Ao Professor Fernando Rocha, pela ajuda na interpretação de DRX e partilha dos seus conhecimentos.

No Departamento de Geociências agradeço em especial, à Cristina Sequeira e à Denise Terroso, pelo auxílio prestado nos ensaios DRX e FRX.

No Departamento de Engenharia Cerâmica e do Vidro, agradeço em ao Dr. Augusto Lopes, à Marta Ferro e ao Daniel Oliveira, pelo auxílio prestado na visualização MEV.

Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC)

À presidência do LNEC, representada pelo Investigador Coordenador Carlos Ramos, por ter permitido estágio na instituição, disponibilizando meios, equipamentos e instalações para a realização deste trabalho.

Ao Investigador Principal Grandão Lopes, Chefe do Núcleo de Revestimentos e Isolamentos (NRI), por ter proporcionado os recursos e meios sob a sua responsabilidade, para a realização deste trabalho.

A todos os técnicos de experimentação do NRI, que estiveram envolvidos nas campanhas de ensaios, Bento Sabala, Dora Santos, Luís Carmo e um agradecimento muito especial à Ana Maria Francisco pela entrega demonstrada.

No Núcleo de Materiais Metálicos, ao Doutor Santos Silva pela execução de análises e auxílio e colaboração científicos prestados e à Ana Paula Meneses, pela ajuda prestada para a execução de lâminas delgadas.

No Núcleo de Betões, ao técnico de experimentação Balsinha, pela colaboração prestada na execução de vários ensaios.

No Núcleo de Cimentos e Materiais Cerâmicos, ao técnico de experimentação João Júnior, pelo auxílio prestado na execução de ensaios.

Ao Centro Tecnológico da Cerâmica e do Vidro, em particular ao seu Director Geral e Administrador Engenheiro Augusto Vaz Serra e Sousa por ter disponibilizado recursos, equipamento e instalações, e aos seus colaboradores Engenheira Regina Santos, Engenheira Maria Carlos Figueiredo, Rui Lucas, Elvira Mateus, Francisco Geraldo e especialmente ao Engenheiro Pedro Gago, pelo apoio prestado na campanha de ensaios.

Ao Museu Monográfico das Ruínas de Conímbriga, representado pelo Director Dr. Virgílio Correia, pela disponibilidade, colaboração no enquadramento histórico, informação transmitida e acompanhamento na recolha de amostras.

Ao Arqueólogo Cavaleiro Paixão, do IPPAR, pela disponibilidade demonstrada no enquadramento histórico e arqueológico e acompanhamento na amostragem das Ruínas Romanas de Tróia.

Ao Coronel José Salgado, responsável pelo Forte de São Brás e respectivo Museu em Ponta Delgada, pela atenção, informação transmitida e acompanhamento na recolha de amostras.

Na empresa CIMENTAÇOR ao Engenheiro Rigoberto Oliveira pela disponibilidade, informação e colaboração no fornecimento de materiais.

Às empresas Brital Britas, Tecnoconcrete e Secil Britas pela disponibilização de materiais.

À Dra. Maria Lourdes Reis pela colaboração e partilha de conhecimentos científicos e técnicos importantes para o desenvolvimento do trabalho.

Aos meus pais, aos meus irmãos e ao meu sogro por todo o auxílio que prestaram.

Um muito especial agradecimento à minha tia Maria Teresa Velosa pela disponibilidade e por ter cuidado com carinho das minhas filhas na minha ausência.

palavras-chave

Revestimentos de paredes, argamassas, cal, pozolanas, reactividade pozolânica, avaliação de desempenho e durabilidade, conservação de edifícios

resumo

O presente trabalho tem como base o estudo de argamassas a aplicar na conservação de edifícios antigos, incidindo sobre argamassas contendo pozolanas e com cal aérea como ligante. Foi feito um levantamento dos materiais pozolânicos existentes, assim como das suas características. A reacção pozolânica associada a este tipo de argamassas foi estudada e explicitada. O estudo de argamassas antigas com pozolanas englobou pesquisa bibliográfica, assim como a recolha, análise e ensaio de argamassas provenientes de várias épocas, locais e tipos de edifícios. Foram analisadas as características das argamassas antigas a partir dos resultados obtidos. A elaboração de argamassas de cal aérea e pozolana partiu de um estudo prévio, para aferir as melhores composições e avaliar a influência de diferentes condicionamentos. Foram escolhidos e analisados diversos materiais potencialmente pozolânicos e foram formuladas argamassas com esses materiais. Um conjunto de ensaios mecânicos e físicos foi aplicado às argamassas elaboradas, permitindo estabelecer a sua adequação para aplicação em edifícios antigos. Finalmente foram efectuadas aplicações em muretes exteriores, painéis e num edifício antigo.

keywords

Renders, mortars, lime, pozzolans, pozzolanic reactivity, performance evaluation and durability, building conservation.

abstract

The current work is based on the study of mortars to be applied in the conservation of ancient buildings, focusing on mortars containing pozzolanas and aerial lime as a binder. A survey of the existing pozzolanic materials and their characteristics was undertaken. Pozzolanic reaction, associated with these mortars was studied and explained. The study of ancient mortars encompassed bibliographic research, withdrawal, analysis and testing of mortar samples from various periods, locations and types of buildings. The characteristics of ancient mortars were analysed based on the obtained results. A previous study was performed in which mortars with aerial lime and pozzolans were prepared, the best compositions were established and the influence of different curing conditions was evaluated. Several materials with a pozzolanic potential were chosen and analysed and mortars were formulated with these materials. A set of mechanical and physical tests was performed on the executed mortars, allowing for an assessment of their adequacy for application on old masonry. At last, applications on exterior walls, on panels and on an ancient building were carried out.

Argamassas de cal com pozolanas para revestimentos de paredes antigas

Índice Geral

1	Introdução	1
1.1	Justificação	1
1.2	Objectivos	2
1.3	Organização da dissertação	3
2	Materiais Pozolânicos	5
2.1	Definição	5
2.2	Classificação de Materiais Pozolânicos.....	5
2.2.1	Materiais Pozolânicos Naturais	6
2.2.1.1	Pozolanas Naturais de origem vulcânica	6
2.2.1.2	Pozolanas Naturais de origem sedimentar	12
2.2.2	Materiais Pozolânicos Artificiais	13
2.2.2.1	Argila cozida	14
2.2.2.2	Metacaulino	16
2.2.2.3	Cinzas Volantes.....	18
2.2.2.4	Sílica de fumo / microsílca.....	21
2.2.2.5	Vidro moído	21
2.2.2.6	Cinzas de casca de arroz.....	22
2.2.2.7	Cinzas de caule de trigo.....	24
2.2.2.8	Cinzas de madeira	25
2.2.2.9	Outros.....	27
3	Reacção Pozolânica	29
3.1	Reacções Hidráulicas e a Reacção de Carbonatação	29
3.1.1	Matérias-primas e ligantes aéreos e hidráulicos	29
3.1.2	Fabrico de ligantes/ Compostos formados durante o processo.....	30
3.1.3	O fenómeno da carbonatação	32
3.1.4	O fenómeno da hidratação	32
3.2	Descrição da Reacção Pozolânica	34
3.2.1	Silicatos de cálcio hidratados (C-S-H).....	36
3.2.2	Aluminatos e silicoaluminatos de cálcio hidratados	38
3.3	Medição da Reactividade Pozolânica.....	39

3.3.1	Ensaio mecânicos.....	41
3.3.2	Ensaio químicos.....	41
3.4	Factores que Afectam a Reacção Pozolânica.....	42
3.4.1	Tipo de pozolana (composição).....	42
3.4.2	Superfície Específica.....	43
3.4.3	Temperatura de cozedura/formação.....	43
3.4.4	Relação Cal/Pozolana.....	45
3.4.5	Quantidade de água.....	46
3.4.6	Condicionamento (temperatura/humidade).....	46
3.4.7	Compactação.....	47
3.5	Activação da reacção pozolânica.....	47
3.6	Evolução da Reacção Pozolânica.....	48
3.7	Vestígios da Reacção Pozolânica em Argamassas Antigas.....	50
4	Breve Historial da Composição de Argamassas.....	53
4.1	Materiais.....	54
4.1.1	Cal aérea.....	54
4.1.1.1	Matéria prima.....	55
4.1.1.2	Processo de cozedura.....	55
4.1.1.3	Processo de extinção.....	56
4.1.1.4	Classificação das cais.....	56
4.1.2	Areia/argila.....	57
4.1.2.1	Classificação.....	57
4.1.2.2	Utilização em argamassas.....	59
4.1.3	Pozolanas Naturais.....	59
4.1.3.1	Classificação.....	59
4.1.3.2	Utilização em argamassas.....	60
4.1.4	Pó de Tijolo/Cerâmica Moída.....	61
4.1.4.1	Produção.....	62
4.1.4.2	Utilização em argamassas.....	62
4.1.5	Outras pozolanas artificiais.....	63
4.2	Composições.....	64
4.3	Características químicas, físicas e mecânicas de argamassas antigas.....	66
5	Análise Experimental de Argamassas Antigas com Pozolanas.....	69
5.1	Amostragem.....	69
5.1.1	Técnica de amostragem.....	71
5.2	Metodologia de Análise.....	71
5.2.1	Determinação da fracção solúvel por dissolução ácida.....	73
5.2.2	Análise granulométrica do resíduo.....	73
5.2.3	Fluorescência de raios X (FRX).....	74

5.2.4	Difracção de Raios X (DRX).....	74
5.2.5	Análise termogravimétrica (ATG/DTG) e calorimétrica (DSC).....	74
5.2.6	Resistência mecânica (à compressão).....	75
5.2.7	Absorção de água por capilaridade.....	75
5.2.8	Visualização no microscópio electrónico de varrimento (MEV)	76
5.2.9	Análise da micro-morfologia	77
5.3	Análise de amostras	77
5.3.1	Identificação das amostras analisadas.....	77
5.3.2	Resultados.....	78
5.3.2.1	Contextualização e caracterização visual	78
5.3.2.2	Determinação da fracção solúvel por dissolução ácida.....	79
5.3.2.3	Análise granulométrica do resíduo.....	84
5.3.2.4	Fluorescência de Raios X (FRX).....	88
5.3.2.5	Difracção de Raios X (DRX).....	92
5.3.2.6	Análise termogravimétrica (ATG, DTG) e análise calorimétrica (DSC)	96
5.3.2.7	Resistência à compressão	108
5.3.2.8	Absorção de água por capilaridade	111
5.3.2.9	Visualização ao microscópio electrónico de varrimento (MEV/EDS).....	115
5.3.2.10	Análise da micro-morfologia.....	118
5.3.2.11	Produtos da reacção pozolânica nas argamassas	120
5.4	Análise de Resultados	124
6	Argamassas Novas de Cal com Adições Pozolânicas	127
6.1	Escolha e Análise de Materiais.....	127
6.1.1.1	Análise Prévia - Pozolana dos Açores (S. Miguel).....	128
6.1.1.2	Análise Prévia - Pó de Tijolo	130
6.1.1.3	Análise Prévia – Metacaulino de Alvarães	133
6.1.2	Caracterização dos materiais	133
6.1.2.1	Análise Visual.....	133
6.1.2.2	Massa Volúmica	135
6.1.2.3	Análise Granulométrica	135
6.1.2.4	Superfície Específica Blaine.....	139
6.1.2.5	Composição Química por Fluorescência de Raios X.....	139
6.1.2.6	Composição Mineral por Difracção de Raios X	140
6.1.2.7	Visualização ao MEV	145
6.1.3	Reactividade Pozolânica	149
6.1.3.1	Ensaio aplicados	149
6.1.3.2	Resultados.....	152
6.1.3.3	Visualização de produtos de reacção no MEV	155
6.1.3.4	Discussão de resultados	156

6.2	Análises Preliminares.....	159
6.2.1.1	Determinação da massa volúmica	160
6.2.1.2	Determinação da consistência por espalhamento	160
6.2.1.3	Resistência à tracção por flexão	161
6.2.1.4	Resistência à compressão	161
6.2.1.5	Módulo de elasticidade dinâmico	162
6.2.1.6	Capilaridade	162
6.2.1.7	Variações dimensionais.....	163
6.2.1.8	Susceptibilidade à fendilhação.....	163
6.2.1.9	Capacidade de impermeabilização (molhagem/secagem)	165
6.2.1.10	Envelhecimento artificial acelerado.....	166
6.2.1.11	Controle da carbonatação	167
6.2.1.12	Composição das argamassas	168
6.2.1.13	Condicionamento das argamassas	170
6.2.1.14	Determinação da resistência à flexão	172
6.2.1.15	Determinação da resistência à compressão	175
6.2.1.16	Determinação da absorção de água por capilaridade	179
6.2.1.17	Avaliação da capacidade de impermeabilização	181
6.2.1.18	Avaliação do grau de carbonatação.....	182
6.2.1.19	Medição das variações dimensionais.....	183
6.2.1.20	Avaliação da susceptibilidade à fissuração.....	184
6.2.1.21	Envelhecimento artificial acelerado.....	185
6.2.2	Avaliação inicial da influência produzida em argamassas pela adição de pozolanas 185	
6.2.3	Influência da composição no desempenho de argamassas de cal com Pozolana de Cabo Verde	186
6.2.4	Influência do condicionamento no desempenho de argamassas de cal com Pozolana de Cabo Verde	187
6.3	Campanha de Ensaios em Argamassas de Cal com Pozolanas	188
6.3.1	Ensaios Efectuados	188
6.3.1.1	Permeabilidade ao vapor de água	189
6.3.1.2	Envelhecimento artificial acelerado.....	190
6.3.1.3	Resistência aos sais.....	191
6.3.2	Composição das argamassas	192
6.3.3	Condicionamento das argamassas	193
6.3.4	Resultados	194
6.3.4.1	Determinação da resistência à flexão	194
6.3.4.2	Determinação da resistência à compressão	195
6.3.4.3	Determinação do módulo de elasticidade	197

6.3.4.4	Determinação da absorção de água por capilaridade	198
6.3.4.5	Determinação da permeabilidade ao vapor de água	202
6.3.4.6	Avaliação da capacidade de impermeabilização	203
6.3.4.7	Avaliação da fissuração	205
6.3.4.8	Envelhecimento artificial acelerado.....	206
6.3.4.9	Avaliação da resistência aos sais	207
6.3.5	Resultados de ensaios a longo prazo em argamassas com pozolanas naturais	209
6.3.5.1	Evolução da resistência à flexão.....	209
6.3.5.2	Evolução da resistência à compressão.....	210
6.3.6	Análise de resultados	211
6.4	Análise geral	214
6.5	Aplicação de Argamassas de Cal com Pozolanas	219
6.5.1	Aplicação em Muretes	219
6.5.2	Aplicação em obra.....	221
6.5.3	Considerações gerais	222
7	Conclusão	225
7.1	Cumprimento dos objectivos e síntese geral dos resultados obtidos	225
7.2	Desenvolvimentos futuros.....	231
8	Referências Bibliográficas.....	233

Índice de Figuras

Fig. 2.1	Principais produtores mundiais de terra diatomácea.....	13
Fig. 3. 1	Modificações químicas no processo de fabrico do cimento Portland, conforme [100]	31
Fig. 3. 2	Libertação de calor devido às acções de hidratação (conforme [93]).....	33
Fig. 3. 3	Análise térmica diferencial de minerais argilosos, conforme [42].....	44
Fig. 3. 4	Resistência à flexão Pozolana Cabo Verde [53]	49
Fig. 3. 5	Resistência à compressão Pozolana Cabo Verde [53]	49
Fig. 3. 6	Resistência à flexão de Pozolana Naturais (Italianas (PI) e Trass(T)) [53].....	49
Fig. 3. 7	Resistência à compressão Pozolanas Naturais (Italianas (PI) e Trass (T)) [53].....	49
Fig. 3. 8	Resistência à flexão de pozolanas artificiais (Argila Cozida (AC) e Cinzas Volantes (CV)) [53].....	50
Fig. 3. 9	Resistência à compressão de pozolanas artificiais (Argila Cozida (AC) e Cinzas Volantes (CV)) [53]	50
Fig. 5. 1	Casa Rua Eng.º José Cordeiro, 93 Ponta Delgada.....	70
Fig. 5. 2	Tanques de salga, Estação Arqueológica Tróia.....	70
Fig. 5. 3	Conímbriga	70
Fig. 5. 4	Convento de Santa Cruz, Século XVI.....	70
Fig. 5. 5	Furnas, Travessa entre os n.º 29 e 37 da Rua das Águas Quentes, n.º 31 –.....	71
Fig. 5. 6	Antiga Fundição de Ferro, séc. XIX, Ponta Delgada.....	71
Fig. 5. 7	Organigrama analítico utilizado no estudo das amostras seleccionadas.....	72
Fig. 5. 8	Amostra preparada para ensaio de resistência à compressão	75
Fig. 5. 9	Amostra preparada para ensaio de absorção de água por capilaridade	76
Fig. 5. 10	Resíduo da amostra TR 2.....	80
Fig. 5. 11	Resíduo da amostra TR 5 (fracção)	80
Fig. 5. 12	Resíduo da amostra SM 3	81
Fig. 5. 13	Resíduo da amostra SM 7	81
Fig. 5. 14	Resíduo da camada interior da amostra CON 6	82
Fig. 5. 15	Resíduo da amostra CON 10	82
Fig. 5. 16	Resíduo da amostra CSC 2.....	83
Fig. 5. 17	Resíduo da camada exterior da amostra FR 1.....	83
Fig. 5. 18	Análise granulométrica das amostras de Tróia	84
Fig. 5. 19	Análise granulométrica das amostras de S. Miguel	85
Fig. 5. 20	Análise granulométrica das amostras de Conímbriga.....	85
Fig. 5. 21	Granulometria média do agregado cerâmico utilizado em Conímbriga	86
Fig. 5. 22	Análise granulométrica das amostras do Convento de Santa Cruz.....	87
Fig. 5. 23	Análise granulométrica das amostras de Frielas.....	87
Fig. 5. 24	Análise granulométrica das amostras BR e BA.....	88

Fig. 5. 25 Análise termogravimétrica da amostra TR 2	98
Fig. 5. 26 Análises térmicas da amostra TR 5	99
Fig. 5. 27 Análise termogravimétrica da amostra SM 1	100
Fig. 5. 28 Análises térmicas da amostra SM 2	101
Fig. 5. 29 Análise termogravimétrica da amostra SM 8	102
Fig. 5. 30 Análise termogravimétrica da amostra SM 12	102
Fig. 5. 31 Análise termogravimétrica da amostra SM 15	103
Fig. 5. 32 Análise termogravimétrica da amostra CON 3	104
Fig. 5. 33 Análise termogravimétrica CON 6, camada interior	104
Fig. 5. 34 Análise termogravimétrica da amostra CSC 1	105
Fig. 5. 35 Análise termogravimétrica da amostra CSC 2	106
Fig. 5. 36 Análise termogravimétrica da amostra FR 1	106
Fig. 5. 37 Análise termogravimétrica da amostra MC 3	107
Fig. 5. 38 Resistência à compressão das argamassas de Tróia	108
Fig. 5. 39 Resistência à compressão das argamassas de S. Miguel	108
Fig. 5. 40 Resistência à compressão das argamassas de Conímbriga	109
Fig. 5. 41 Resistência à compressão de várias argamassas (Convento de Santa Cruz, Betão Romano, Frielas e Machado de Castro)	110
Fig. 5. 42 Coeficiente de capilaridade das argamassas de Tróia	111
Fig. 5. 43 Absorção máxima das argamassas de Tróia	111
Fig. 5. 44 Coeficiente de capilaridade das argamassas de S. Miguel	112
Fig. 5. 45 Absorção máxima das argamassas de S. Miguel	112
Fig. 5. 46 Coeficiente de capilaridade das argamassas de Conímbriga	113
Fig. 5. 47 Absorção máxima das argamassas de Conimbriga	113
Fig. 5. 48 Absorção capilar da amostra CON 15	114
Fig. 5. 49 Coeficiente de capilaridade de várias argamassas (Convento de Santa Cruz, Frielas, Museu Machado de Castro)	114
Fig. 5. 50 Absorção máxima de várias argamassas (Convento de Santa Cruz, Frielas, Museu Machado de Castro)	115
Fig. 5. 51 Micro-estrutura da argamassa CON 5	116
Fig. 5. 52 Micro-esrutura da argamassa SM 12	116
Fig. 5. 53 Agregado da argamassa SM 1	116
Fig. 5. 54 Agregado na argamassa SM 5	116
Fig. 5. 55 Interface cerâmico moído/ligante (CON 6)	117
Fig. 5. 56 Fissuração argamassa CON 10	117
Fig. 5. 57 Presença de halite na amostra SM 2	117
Fig. 5. 58 Preenchimento fissuras com calcite (CON 9)	117
Fig. 5. 59 Aluminosilcatos de cálcio (FR 2)	118
Fig. 5. 60 Presença de gel (CSC 1)	118

Fig. 5. 61	Quartzo, microcline (felds. potássico), nódulo de óxido de ferro (CON 3)	118
Fig. 5. 62	Quartzo e minerais micáceos em matriz calcítica (CSC 2)	118
Fig. 5. 63	Cerâmico com grãos de quartzo fissurados (CON 9).....	119
Fig. 5. 64	Cerâmico com grãos de quartzo e mica (FR 3).....	119
Fig. 5. 65	Fissuração preenchida com calcite espática (CON 3)	120
Fig. 5. 66	Interface entre cerâmico e matriz preenchida com calcite (CON 1).....	120
Fig. 5. 67	Poros preenchido com calcite (CON 9)	120
Fig. 5. 68	Precipitação de calcite microcristalina à volta de grão de quartzo (CON 9)	120
Fig. 5. 69	Corte de amostra de argamassa de Conímbriga, com visualização de bandas de reacção do tijolo	121
Fig. 5. 70	DRX amostra SM 9	122
Fig. 5. 71	DRX amostra SM 13	122
Fig. 5. 72	Hidraulicidade das amostras	123
Fig. 6.1	Escavação em Água de Pisão com visualização dos vários níveis.....	129
Fig. 6.2	Local de escavação englobando os vários níveis.....	129
Fig. 6.3	Análise Termodilatométrica da argila de Conímbriga	131
Fig. 6.4	Reactividade pozolânica de Pó de Tijolo cozido a várias temperaturas – resistência à flexão (CEFRP/RBLH).....	132
Fig. 6.5	Reactividade pozolânica de Pó de Tijolo cozido a várias temperaturas – resistência à compressão (CEFRP/RBLH).....	132
Fig. 6.6	Pozolana de Cabo Verde (PCV)	133
Fig. 6.7	Pozolana de S. Miguel, Açores (PA).....	133
Fig. 6.8	Metacaulino de Alvarães (MCA)	133
Fig. 6.9	Metacaulino Industrial (MCI)	133
Fig. 6.10	Pó de Tijolo (PT).....	134
Fig. 6.11	Cinzas Volantes (CV)	134
Fig. 6.12	Resíduo de Argila Expandida (RAE)	134
Fig. 6.13	Cinzas de Papel (CP)	134
Fig. 6.14	Análise Granulométrica da Areia de Rio	136
Fig. 6.15	Análise Granulométrica da Pozolana de Cabo Verde (PCV)	136
Fig. 6.16	Análise Granulométrica da Pozolana dos Açores (PA).....	136
Fig. 6.17	Análise Granulométrica do Metacaulino de Alvarães (MCA)	137
Fig. 6.18	Análise Granulométrica do Pó de Tijolo (PT)	137
Fig. 6.19	Análise Granulométrica do Metacaulino Industrial (MCI).....	137
Fig. 6.20	Análise Granulométrica das Cinzas Volantes (CV).....	138
Fig. 6.21	Análise Granulométrica do Resíduo de Argila Expandida	138
Fig. 6.22	Análise Granulométrica das Cinzas de Papel	138
Fig. 6.23	DRX da cal aérea	140
Fig. 6.24	DRX da areia	141

Fig. 6.25	DRX da Pozolana de Cabo Verde (PCV)	141
Fig. 6.26	DRX da Pozolana dos Açores (PA)	142
Fig. 6.27	DRX do Metacaulino de Alvarães	142
Fig. 6.28	DRX do Metacaulino Industrial	143
Fig. 6.29	DRX do Pó de Tijolo	143
Fig. 6.30	DRX das Cinzas Volantes	144
Fig. 6.31	DRX do Resíduo de Argila Expandida	144
Fig. 6.32	DRX das Cinzas de Papel	145
Fig. 6.33	Pozolana de Cabo Verde, ampliada 500x; visualização geral	145
Fig. 6.34	Presença de filipsite na Pozolana de Cabo Verde	145
Fig. 6.35	Pozolana dos Açores, ampliada 500x; visualização geral	146
Fig. 6.36	Pozolana dos Açores, ampliada 2000x	146
Fig. 6.37	Metacaulino de Alvarães, ampliado 500x; visualização geral	146
Fig. 6.38	Metacaulino de Alvarães, ampliada 10 000x	146
Fig. 6.39	Metacaulino Industrial, ampliado 500x; visualização geral	147
Fig. 6.40	Metacaulino Industrial, ampliação 5000x	147
Fig. 6.41	Pó de Tijolo, ampliado 500x; visualização geral	147
Fig. 6.42	Cinzas Volantes, ampliadas 3500x; visualização geral	147
Fig. 6.43	Resíduo de Argila Expandida, ampliado 500x; visualização geral	148
Fig. 6.44	Resíduo de Argila Expandida, ampliada 5000x	148
Fig. 6.45	Resíduo de Cinzas de Papel, ampliado 500x; visualização geral	148
Fig. 6.46	Resíduo de Cinzas de Papel, ampliadas 10 000x	148
Fig. 6.47	a) e b) Preparação e condicionamento de provetes	150
Fig. 6.48	Provetes preparados segundo a norma ASTM 593-95 após ensaio à compressão	151
Fig. 6.49	Variação da condutividade [125]	153
Fig. 6.51	Cinzas volantes e cal aérea com 1 mês	155
Fig. 6.52	Pó de tijolo e cal aérea com 1 mês	155
Fig. 6.53	Argamassa de cal aérea e pozolana de Cabo Verde com 1 semana	156
Fig. 6.54	Argamassa de cal aérea e metacaulino industrial com 1 mês	156
Fig. 6.55	Ensaio de susceptibilidade à fendilhação	164
Fig. 6.56	Execução de provetes para ensaio de impermeabilização	165
Fig. 6.57	Colocação de provetes na câmara de envelhecimento artificial acelerado	167
Fig. 6.58	Preparação de provetes segundo EN 1015-11. Colocação de gaze	170
Fig. 6.59	Preparação de provetes segundo EN 1015-11. Colocação de papel de filtro	170
Fig. 6.60	Resistência à flexão de argamassas – ensaios preliminares – primeira fase	172
Fig. 6.61	Resistência à flexão de argamassas – ensaios preliminares – diferentes composições	173
Fig. 6.62	Resistência à flexão de argamassas – ensaios preliminares – diferentes condicionamentos	174

Fig. 6.63	Resistência à compressão de argamassas – ensaios preliminares – primeira fase	176
Fig. 6.64	Resistência à compressão de argamassas – ensaios preliminares – diferentes composições	177
Fig. 6.65	Resistência à compressão de argamassas – ensaios preliminares – diferentes condicionamentos	178
Fig. 6.66	Coeficiente de capilaridade – ensaios preliminares – primeira fase	180
Fig. 6.67	Coeficiente de capilaridade – ensaios preliminares – diferentes composições e condicionamentos	181
Fig. 6.68	Avaliação da capacidade de impermeabilização – ensaios preliminares	181
Fig. 6.69	Percentagem carbonatada – ensaios preliminares – primeira fase	182
Fig. 6.70	Percentagem carbonatada – ensaios preliminares – diferentes composições e condicionamentos	183
Fig. 6.71	Variações dimensionais de argamassas – ensaios preliminares.....	184
Fig. 6.72	Ensaio de resistência aos sais em curso	191
Fig. 6.73	Ajuste da curva do cerâmico moído à granulometria de Conímbriga	193
Fig. 6.74	Resistência à flexão.....	194
Fig. 6.75	Resistência à compressão	196
Fig. 6.76	Módulo de elasticidade dinâmico	197
Fig. 6.77	Coeficiente de capilaridade ($\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}^{1/2}$).....	199
Fig. 6.78	Absorção de água às 24h (kg/m^2)	200
Fig. 6.79	Absorção capilar de argamassa de cal (C) com 6 meses.....	201
Fig. 6.80	Absorção capilar de argamassa com Pozolana de Cabo Verde (GPCV) com 6 meses	201
Fig. 6.81	Absorção capilar de argamassa com Resíduo de Argila Expandida (CRAE) com 6 meses	202
Fig. 6.82	Avaliação da capacidade de impermeabilização	203
Fig. 6.83	Avaliação da capacidade de impermeabilização – molhagem e início de secagem	204
Fig. 6.84	Material perdido (% em massa) após cada ciclo de envelhecimento	206
Fig. 6.85	Provetes após ensaio de envelhecimento artificial acelerado	207
Fig. 6.86	Variação de massa, em g, dos provetes durante o ensaio de resistência aos sais	207
Fig. 6.87	Provetes após ensaio de resistência aos sais	208
Fig. 6.88	Resistência à flexão - evolução.....	209
Fig. 6.89	Resistência à compressão - evolução.....	210
Fig. 6.90	Resistência à compressão versus coeficiente de capilaridade	213
Fig. 6.91	Aplicação de argamassas de reboco com Pozolana de Cabo Verde e Pozolana dos Açores	220
Fig. 6.92	Aplicação de argamassa de junta em parede de granito	220
Fig. 6.93	Painel 1 e Painel 2.....	221
Fig. 6.94	Painel 3 e Painel 4.....	221

Fig. 6.95	Parede com painéis 3 e 4 e salpico para execução do painel 5	222
Fig. 6.96	Parede rebocada com argamassa de cal aérea e metacaulino	223

Índice de Tabelas

Tab. 2.1	Pozolanas Naturais de Origem Vulcânica (%) [52, 53, 88, 115, 147, 249].....	7
Tab. 2.2	Composição química de produtos pozolânicos dos Açores (%) [35].....	8
Tab. 2.3	Composição química de algumas pozolanas da ilha de Porto Santo (%) [53].....	8
Tab. 2.4	Composição química das pozolanas da ilha de Santo Antão (%) [53].....	9
Tab. 2.5	Composição química de algumas pozolanas Italianas (%) [115].....	9
Tab. 2.6	Composição química de Santorini (%) [115].....	10
Tab. 2.7	Caracterização química de trass (%) [53], [115].....	10
Tab. 2.8	Caracterização química de Pozolana Vólvia (%) (França) [115].....	11
Tab. 2.9	Caracterização química de pozolana proveniente dos E.U.A (%) [115].....	11
Tab. 2.10	Caracterização química de pozolana proveniente do Japão (%) [115].....	11
Tab. 2.11	Pozolanas naturais de origem sedimentar [115].....	12
Tab. 2.12	Composição química de diatomitos comerciais (%) [53].....	13
Tab. 2.13	Pozolanas Artificiais [52, 53, 88, 115, 147, 192, 216, 249, 257].....	14
Tab. 2.14	Composição química de argilas para tijolo (%) [71].....	15
Tab. 2.15	Índice Hinckley de cristalinidade [72].....	18
Tab. 2.16	Composição química de cinzas volantes de baixo teor em cálcio em diversos países (%) [115, citando vários].....	20
Tab. 2.17	Composição química de cinzas volantes portuguesas (%) [34].....	20
Tab. 2.18	Composição de sílica de fumo proveniente da produção de silício e ligas de ferro-silício (%) [115].....	21
Tab. 2.19	Caracterização de resíduos de vidro (%) [192].....	22
Tab. 2.20	Composição química de cinzas de casca de arroz, cinzas de palha de arroz e cinzas de bagaço (%) [115].....	23
Tab. 2.21	- Composição química de cinzas de trigo produzidas à temperatura de 570°C e 670°C (%) [22].....	24
Tab. 2.22	- Composição elementar de cinzas de dois tipos de madeira sujeitas a cozedura a 600°C (%) [135].....	26
Tab. 2.23	Caracterização química de cinzas de madeira da Nigéria (%) [60].....	26
Tab. 3. 1	Silicatos de cálcio hidratados formados a partir da reacção de pozolanas com hidróxido de cálcio.....	37
Tab. 3. 2	Aluminatos e silico-aluminatos de cálcio hidratados formados a partir da reacção de pozolanas com hidróxido de cálcio.....	39
Tab. 4.1.	Traços de argamassas com componentes pozolânicos.....	65
Tab. 4.2.	Classificação química de argamassas antigas, conforme [137, 141].....	66
Tab. 4.3.	Algumas propriedades físicas e mecânicas de argamassas antigas, conforme [137, 141].....	67

Tab.5.1	Fracção solúvel e resíduo após ataque ácido (Amostras Tróia).....	80
Tab.5.2	Fracção solúvel e resíduo após ataque ácido (Amostras S.Miguel).....	80
Tab.5.3	Fracção solúvel e resíduo após ataque ácido (Amostras Conímbriga)	81
Tab.5.4	Fracção solúvel e resíduo após ataque ácido (Amostras Convento de Santa Cruz, Frielas, Museu Machado de Castro, Betão Romano e Barragem do Álamo).....	83
Tab.5.5	Composição química determinada por FRX às amostras provenientes de Tróia (%)...	88
Tab.5.6	Composição química determinada por FRX às amostras provenientes de S. Miguel (%)	89
Tab.5.7	Composição química determinada por FRX às amostras provenientes de Conímbriga (%)	90
Tab.5.8	Composição química determinada por FRX às amostras provenientes do Convento de Santa Cruz (%)	91
Tab.5.9	Composição química determinada por FRX às amostras provenientes de Frielas (%)	91
Tab.5.10	Composição química determinada por FRX às amostras provenientes do Museu Machado de Castro (%).....	92
Tab.5.11	Análise por DRX às amostras de Tróia	92
Tab.5.12	Análise por DRX às amostras de S.Miguel	93
Tab.5.13	Análise por DRX às amostras de Conímbriga.....	94
Tab.5.14	Análise por DRX a amostras do Convento de Santa Cruz, Frielas, Museu Machado de Castro e Barragem de Álamo	95
Tab.5.15	Resistência mecânica de argamassas (Média e Desvio Padrão), MPa	124
Tab.5.16	Valores médio do coeficiente de capilaridade (g/dm ² .min ^{1/2}) e da absorção máxima (g/dm ²)	125
Tab.6.1	Análise química por FRX de diferentes estratos de pozolana dos Açores	129
Tab.6.2	Resultados do ensaio de Reactividade Pozolânica às amostras de Pozolana dos Açores (CEFRP/RBLH)	130
Tab.6.3	Densidade e massa volúmica aparente dos materiais utilizados	135
Tab.6.5	Composição Química dos Materiais por FRX (%)	139
Tab.6.6	Classificação de pozolanas segundo o Caderno de Encargos para o Fornecimento e Recepção de Pozolanas [166]	149
Tab.6.7	Requisitos para pozolanas segundo a ASTM C593-95 [13]	150
Tab.6.8	Avaliação da actividade pozolânica por medição de condutividade [125].....	151
Tab.6.9	Resistência à flexão e à compressão (RBLH) [166]	152
Tab.6.10	Resistência à compressão (ASTM C593-95 [13])	153
Tab.6.11	Variação de condutividade [125]	154
Tab.6.12	Concentração de iões OH ⁻ e CaO (NP EN 165-5) [97].....	154
Tab.6.13	Comparação CEFRP/RBLH [166] e ASTM C593-95 [13]	157
Tab.6.14	Ensaio efectuados a argamassas na análise preliminar	159
Tab.6.15	Composições utilizadas nos ensaios preliminares – primeira fase	169

Tab.6.16	Composições utilizadas nos ensaios preliminares – segunda fase	169
Tab.6.17	Condições de cura experimentadas	171
Tab.6.18	Temperaturas mínimas, médias e máximas, em °C, durante o tempo de exposição exterior	172
Tab.6.19	Resistência à flexão – ensaios preliminares - primeira fase - Média e Desvio Padrão	172
Tab.6.20	Resistência à flexão – ensaios preliminares – diferentes composições - Média e Desvio Padrão	173
Tab.6.21	Resistência à flexão de argamassas – ensaios preliminares – diferentes condicionamentos – Média e Desvio Padrão	174
Tab.6.22	Resistência à compressão de argamassas – ensaios preliminares – primeira fase – Média e Desvio Padrão	176
Tab.6.23	Resistência à compressão de argamassas – ensaios preliminares – diferentes composições – Média e Desvio Padrão	177
Tab.6.24	Resistência à compressão de argamassas – ensaios preliminares – diferentes condicionamentos – Média e Desvio Padrão	178
Tab.6.25	Coeficiente de capilaridade – Ensaios preliminares – Primeira Fase	179
Tab.6.26	Coeficiente de capilaridade – ensaios preliminares – diferentes composições e condicionamentos	180
Tab.6.27	Profundidade de carbonatação – Ensaios preliminares – Primeira fase	182
Tab.6.28	Profundidade de carbonatação - ensaios preliminares – diferentes composições e condicionamentos	183
Tab.6.29	Susceptibilidade à fendilhação – ensaios preliminares – primeira fase.....	185
Tab.6.30	Envelhecimento Artificial Acelerado – ensaios preliminares	185
Tab.6.31	Ensaio efectuado em argamassas.....	189
Tab.6.32	Composição das argamassas	192
Tab.6.33	Resistência à flexão – Média e (MPa) Desvio Padrão	194
Tab.6.34	Resistência à compressão – Média (MPa) e Desvio Padrão	195
Tab.6.35	Módulo de Elasticidade Dinâmico (MPa).....	197
Tab.6.36	Coeficiente de capilaridade ($\text{kg/m}^2 \cdot \text{h}^{1/2}$)	198
Tab.6.37	Absorção às 24h (Kg/m^2).....	198
Tab.6.38	Permeância e Camada de ar de difusão equivalente	202
Tab.6.39	Avaliação do comportamento de molhagem/secagem	203
Tab.6.40	Susceptibilidade à fendilhação	205
Tab.6.41	Resistência à flexão de argamassas - evolução	209
Tab.6.42	Resistência à compressão - evolução.....	210
Tab.6.47	Composição em volume de argamassas aplicadas em painéis experimentais	221

1 Introdução

1.1 Justificação

Sendo as argamassas componentes importantes da construção desde há longo tempo, ora como aglutinante de outros materiais, ora como revestimento superficial tanto interior como exterior, é importante melhorar o conhecimento sobre estas.

Os revestimentos têm grande repercussão na durabilidade de uma construção devido ao papel protector das alvenarias. A compatibilidade entre os materiais em que são executadas as alvenarias, as argamassas de assentamento e de reboco fomenta o adequado funcionamento da parede e um conseqüente aumento de durabilidade.

Todas as argamassas têm como base uma mistura de materiais, antigamente ligada à disponibilidade local e actualmente dependente do mercado de produtos de construção. Por outro lado, a execução de argamassas e sua colocação passou de um processo moroso e cuidado que permitia passagens de testemunho e melhorias com base na experiência, para um processo rápido, baseado em mão-de-obra não especializada e inserido no objectivo final de minorar o custo e o prazo das obras. Embora este fenómeno não se verifique com tanta acuidade em obras em monumentos, sujeitas a maiores cuidados, é contudo generalizado nas restantes obras em edifícios antigos. Paralelamente, apesar de se denotar uma melhoria gradual nesta questão, ainda é prática comum os técnicos responsáveis por projectos e cadernos de encargos determinarem a retirada total dos revestimentos antigos, independentemente do seu estado de conservação e a sua substituição por revestimentos aplicados em edifícios novos.

Dada a situação vigente, é importante fomentar a aplicação em obras de conservação e restauro e sempre que seja necessária a aplicação de nova argamassa, de argamassas que sejam compatíveis com as paredes existentes, utilizando produtos disponíveis no mercado, e ao mesmo tempo adequadas à prática construtiva actual. Para o caso específico de obras mais exigentes, como por exemplo monumentos, é possível o recurso a materiais com menor disponibilidade comercial e a mão-de-obra especializada, que começa a aparecer em Portugal.

Neste contexto, as argamassas de cal com adições pozolânicas constituem uma interessante possibilidade de aplicação. O facto da reacção pozolânica se dar na presença de água permite a sua aplicação como argamassas de junta e como argamassas de revestimento numa única camada, mais espessa e ainda em condições climáticas mais diversificadas que as argamassas só de cal aérea. Tendo como ligante a cal e sendo a proporção de pozolana variável conforme a aplicação, será possível criar argamassas com diferentes propriedades, ajustáveis à finalidade em

questão e, principalmente, com resistências mecânicas moderadas. Argamassas com incorporação de elementos pozolânicos parecem ter uma elevada durabilidade, comprovada pelo estado de conservação verificado neste tipo de argamassas em antigas conurbações Romanas [232] e outras [143], sendo inclusive mais resistentes ao ataque de sulfatos do que as argamassas cuja base é o cimento Portland [143]. A questão da durabilidade apregoada (e verificada) destas argamassas também é favorável ao seu uso pois, embora a manutenção de todos os componentes de um edifício seja um processo fundamental, é também importante que os rebocos tenham uma durabilidade razoável de forma a espaçar intervenções e a minorar custos.

Existindo variadas possibilidades de materiais a incorporar como adições pozolânicas, será importante estudar materiais com disponibilidade comercial e outros, menos disponíveis, mas que poderão ter interesse regional.

Como base da implementação deste tipo de argamassas é fundamental melhorar o conhecimento sobre argamassas antigas executadas com recurso ao uso de pozolanas, tanto ao nível da composição e forma como foram executadas como ao nível da sua aplicação e desempenho. Neste processo, um estudo mais aprofundado dos mecanismos complexos da reacção pozolânica e do seu comportamento no tempo pode fornecer um auxílio para a compreensão do funcionamento deste tipo de argamassas.

1.2 Objectivos

Com este trabalho pretende-se, em primeiro lugar, sistematizar conhecimentos sobre argamassas antigas com pozolanas através do estudo de argamassas de épocas diferentes, aplicadas em diferentes tipos de edifícios. É âmbito deste trabalho a identificação dos materiais que entram na sua composição, assim como as proporções utilizadas e a repercussão que as diversas combinações executadas tiveram sobre as propriedades das argamassas. Esta análise será feita com recurso a um conjunto de análises e ensaios a realizar sobre amostras de edifícios antigos: análise química, análise granulométrica, difractometria de raios X, análise termogravimétrica, observação ao microscópio electrónico de varrimento, ensaio de resistência à compressão e ensaio de absorção de água por capilaridade. Para além de proporcionar informações sobre a composição das argamassas antigas, espera-se que este conjunto de análises contribua para o estudo da reacção pozolânica e da sua evolução no tempo. Paralelamente, este estudo implicará a adequação das metodologias de estudo de argamassas antigas aos casos de argamassas pozolânicas, dado que as técnicas correntemente empregues não identificam claramente a presença de materiais pozolânicos ou não são unânimes quanto aos procedimentos a adoptar.

Será também efectuado um levantamento dos materiais pozolânicos existentes e serão analisadas as características dos materiais empregues na formulação das argamassas para este estudo.

Em seguida é ambição criar, a partir dessa base de estudo, argamassas compatíveis com edifícios antigos incorporando elementos pozolânicos, a serem estudadas em laboratório, em estação de ensaios natural e em aplicações em edifícios antigos, de forma a verificar quais as suas características e aplicabilidade. Para tal serão efectuados ensaios mecânicos e físicos, assim como ensaios de reactividade pozolânica. Neste processo, será aprofundado o estudo sobre envelhecimento de argamassas, com a aplicação de um ensaio de envelhecimento artificial acelerado adaptado a argamassas de reboco e à situação climatológica portuguesa. Espera-se obter argamassas que proporcionem compatibilidade funcional e visual com suportes tradicionais e que sejam, portanto, aplicáveis em obras de conservação, restauro e reabilitação de edifícios.

1.3 Organização da dissertação

A presente dissertação encontra-se organizada em 7 capítulos. Após a introdução, o Capítulo 2 é dedicado aos materiais pozolânicos, cabendo ao Capítulo 3 uma abordagem histórica à composição de argamassas antigas, complementada no Capítulo 4 com uma análise de argamassas antigas com pozolanas; enquanto o Capítulo 5 se reporta ao estudo de argamassas novas de cal com adições pozolânicas, o Capítulo 6 dedica-se à aplicação de argamassas de cal com pozolanas e o Capítulo 7 sistematiza as conclusões.

No Capítulo 2 irá ser abordada a definição de materiais pozolânicos, sendo compilada informação sobre vários tipos de materiais pozolânicos naturais e artificiais, sua origem e características principais. Será também dado enfoque à reacção pozolânica, descrevendo-se os mecanismos de reacção e reunindo os resultados do estudo de diversos autores sobre este fenómeno e os seus vestígios em argamassas antigas.

No Capítulo 3 será apresentada uma abordagem sobre a história das argamassas, no que respeita à sua composição, com particular incidência sobre as argamassas contendo pozolanas. Neste capítulo será também dada relevância a argamassas pozolânicas existentes em Portugal.

O Capítulo 4 será dedicado à análise experimental de argamassas antigas, descrevendo as amostras a analisar, assim como a metodologia de análise adoptada e as técnicas específicas utilizadas para a detecção e identificação de reacções pozolânicas. Neste capítulo figurarão igualmente os resultados destas análises.

No Capítulo 5 será efectuada uma abordagem à reacção pozolânica. Serão descritas as reacções de carbonatação, hidráulica e pozolânica, assim como os produtos formados a partir da reacção

pozolânica de diferentes materiais. A influência de factores ambientais e outros nesta reacção será abordada e serão descritos os vestígios desta reacção em argamassas antigas.

No Capítulo 6 serão estudadas novas formulações de argamassas incluindo pozolanas, com base no estudo e análise de materiais previamente efectuado. Este capítulo abará também a selecção das argamassas que seguirá primeiro um processo de análises preliminares, que possibilitam algumas decisões, seguida por uma campanha de ensaios alargada. Os resultados obtidos serão registados e analisados. Descrever-se-á também a aplicação de argamassas em muretes na Estação de Ensaio Natural do LNEC/LERevPa e também em obras de conservação e restauro de edifícios.

Finalmente, o Capítulo 7 concluirá sobre o trabalho desenvolvido, os resultados obtidos e o cumprimento dos objectivos traçados e delineará algumas vias de desenvolvimento futuro.

Os anexos no final dividem-se no Anexo 1, com os resultados das análises às argamassas antigas divididos em fichas por cada argamassa estudada, e no Anexo 2, contendo os gráficos respeitantes a ensaios efectuados a argamassas novas.

2 Materiais Pozolânicos

2.1 Definição

Pela ASTM C593-95 [13], as pozolanas são definidas como materiais siliciosos ou silico-aluminosos que possuem poucas ou nenhuma propriedade cimentícia mas que, finamente divididos e na presença de humidade reagirão quimicamente com álcalis e hidróxidos alcalino-terrosos a temperaturas vulgares formando ou ajudando à formação de compostos com propriedades cimentícias.

2.2 Classificação de Materiais Pozolânicos

É possível dividir as pozolanas em duas categorias: pozolanas naturais e pozolanas artificiais. As primeiras são de origem vulcânica, sendo encontradas em zonas onde ocorrem ou ocorreram fenómenos vulcânicos.

As pozolanas artificiais são obtidas através do tratamento de materiais com base siliciosa a temperaturas de cozedura específicas para cada material, induzindo a formação de sílica amorfa; estas temperaturas não devem ser demasiado elevadas de forma a não potenciarem a nucleação e crescimento cristalino. Contudo, a sujeição de materiais siliciosos a temperaturas elevadas, seguidas de arrefecimento brusco (à semelhança dos materiais pozolânicos naturais) promove a formação de matéria amorfa ou com baixo grau de cristalinidade e portanto, mais reactiva.

A norma ASTM C 618-01 [14] divide as pozolanas em três classes diferentes: Classe N, Classe F e Classe C. A Classe N engloba pozolanas naturais (calcinadas ou não) tais como algumas terras diatomáceas, opala e sílex, tufo e cinzas vulcânicas ou pumitos (calcinados ou não) e vários materiais que necessitam de calcinação de forma a induzir propriedades satisfatórias, assim como algumas argilas e xistos. As Classes F e C são ambas relativas a cinzas volantes, englobando a Classe F cinzas produzidas a partir de antracite queimada ou carvão e a Classe C cinzas produzidas a partir de lignite ou carvão sub-betuminoso. Os materiais da Classe C têm algumas propriedades hidráulicas. Para se inserirem em cada uma das referidas classes os materiais devem adicionalmente cumprir os demais requisitos definidos na norma quanto às suas características.

2.2.1 Materiais Pozolânicos Naturais

Tendo como base um elevado conteúdo em sílica amorfa, é possível dividir os materiais pozolânicos naturais em duas proveniências distintas: materiais de origem vulcânica ou sedimentar [115, 208].

2.2.1.1 Pozolanas Naturais de origem vulcânica

Os materiais de origem piroclástica podem ser subdivididos, tendo em conta o seu processo de formação: os tufos e o trass pertencem ao grupo das rochas coesivas resultantes de processos de alteração (zeolitizadas); as pozolanas italianas, a terra de Santorini e os riolitos, entre outros, pertencem ao grupo das rochas não coesivas, resultantes de explosões vulcânicas seguidas de rápido arrefecimento e designadas também por vidro vulcânico [115, 208].

Dada a natureza vulcânica destes materiais, a sua existência dissemina-se por locais onde existe ou existiu actividade eruptiva, sendo portanto um material abundante, presente em todos os continentes e que, actualmente, é preferencialmente utilizado no fabrico de cimento pozolânico. A sua comercialização reveste-se também de um carácter internacional, sendo possível obter este produto em zonas tão díspares como a Birmânia, México, Chile, Japão, Índia e Canadá. Na Europa, os principais fornecedores são a Itália e a Grécia, embora seja possível encontrar pozolanas também na França, Alemanha, Turquia, Rússia, Espanha (Canárias) e Portugal (Açores). Contudo, sendo materiais naturais, formados sob diferentes condições e com diferentes composições, as pozolanas possuem características diversas e são conhecidas por diferentes designações. Estas particularidades apresentam-se em um quadro-resumo (Tab. 2.1) baseado na classificação de um conjunto de pozolanas naturais de origem vulcânica efectuada por alguns autores.

Cada um destes materiais tem características específicas, tanto ao nível de coloração como de composição. A nível exemplificativo, é possível encontrar pozolanas provenientes de Itália com tonalidades que variam entre o vermelho, o cinzento e o verde/amarelado. Por outro lado a sua composição mineralógica é também díspar, embora os minerais presentes sejam sobretudo silicatos ou silico-aluminatos de cálcio, magnésio e potássio e também óxidos de ferro.

Tab. 2.1 Pozolanas Naturais de Origem Vulcânica (%) [52, 53, 88, 115, 147, 249]

Designação	Origem	Composição/origem
Pozolanas dos Açores	Açores, Portugal	Composição variada dependendo da proveniência; traquitos a limburguitos
Pozolana de Porto Santo	Porto Santo, Madeira, Portugal	Rochas de tipo basáltico, muito alteradas
Pozolana de Santo Antão	Ilha de Santo Antão, Cabo Verde	Tufo vulcânico, provavelmente andesítico
Pozolanas Italianas	Itália (Vesúvio, Roma, Nápoles)	Composição variada, dependendo da proveniência
Terra de Santorini	Santorini, Grécia	Obsidianas (riolitos) e tufos provenientes das obsidianas
Pozolanas dos E.U.A.	E.U.A.	Tufos riolíticos
Trass	Alemanha (Reno)	Tufos traquíticos
Pozolanas das Canárias/Tosca	Ilhas Canárias, Espanha / Tenerife	Existem pozolanas muito variadas desde obsidianas a limburguitos. Tosca proveniente de Tenerife é a mais conhecida
Pozolana vólvia	França (sudeste)	Tufos traquíticos
Furue shirasu	Japão	Pozolanas vítreas de origem vulcânica, contendo minerais argilosos e zeólitos
Higashi Masuyama	Japão	
Areia vulcânica	Várias	Formadas a partir de rochas vulcânicas, tais como xisto ou basalto

2.2.1.1.1 Pozolanas dos Açores

No final do Século XIX, princípio do Século XX, existem estudos [35, 150], relativos à composição de pozolanas Açorianas, então comercializadas e utilizadas como material de construção em várias obras. Castanheira das Neves [35] elaborou uma publicação editada pelo LNEC, contendo uma caracterização extensiva de pozolanas recolhidas de diversos locais dos Açores. Mais tarde, Sousa Coutinho [53] estudou algumas pozolanas Açorianas, tendo em vista a determinação da

sua reactividade e da sua aplicabilidade como componente do betão. Actualmente estas pozolanas são utilizadas para fabrico de cimento com pozolanas nos Açores.

Tab. 2.2 Composição química de produtos pozolânicos dos Açores (%) [35]

Material	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Perda ao fogo	Indeterm.
Terra Amarela (Canada de Belém)	50.36	10.87	18.69	2.14	1.16	9.20	12.58
Cascalinho (Canada de Belém)	45.76	29.00	9.24	8.71	0.19	2.35	4.75
Massapez (Canada de Belém)	59.46	9.83	18.14	2.14	6.67	7.72	2.53
Jôro ou jorna (Canada de Belém)	58.84	23.37		3.59	0.62	12.92	0.66
Tetim ou relva (Canada de Belém)	63.77	28.55	0.85	1.63	0.94	4.25	0.01
Cascalho preto (Canada de Belém)	46.28	33.24	0.82	7.13	0.57	0.10	0.86
Cascalho vermelho (Canada de Belém)	57.15	15.93	12.93	9.08	0.54	0.47	3.90
Pozolana (Canada de Belém)	58.88	31.95		4.70	0.25	4.25	-
Pozolana (Papa Terra)	59.19	23.82	5.51	3.15	2.30	-	6.03
Pozolana (Foral de Carvão)	52.69	24.19	5.19	1.93	1.50	-	14.40
Pozolana (Canada dos Ingleses)	50.24	15.74	10.18	0.94	2.21	-	20.69
Pozolana (Canada do Paim)	51.14	25.49	7.63	1.30	1.51	-	12.93
Pozolana (Calheta)	50.09	22.81	5.20	0.84	1.70	-	19.36
Pozolana (Canada Espírito Santo)	50.01	28.49	6.45	2.51	1.88	-	15.67

2.2.1.1.2 Pozolanas da ilha de Porto Santo

Existem poucos dados relativos às pozolanas de Porto Santo. As informações disponíveis constam do estudo de Sousa Coutinho [53], que utilizou material proveniente de duas localizações diferentes, Pedras Pretas e Vigia, tendo estudado a sua composição química e misturado ambos os materiais com cal, de forma a aferir a evolução da resistência mecânica das pastas de cal e pozolana.

Tab. 2.3 Composição química de algumas pozolanas da ilha de Porto Santo (%) [53]

Origem	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	P.R.
Pedras Pretas	43.55	16.89	11.21	6.28	4.14	Vest.	1.60	4.30	12.41
Vigia	42.83	18.25	9.88	8.10	3.45	0.49	0.56	2.60	15.11

2.2.1.1.3 Pozolana de Santo Antão/Cabo Verde

Segundo Sousa Coutinho [53], a Pozolana de Cabo Verde foi formada a partir de uma erupção violenta, de grande amplitude e regularidade, que permitiu a formação de uma cinza, posteriormente aglomerada e alterada por acção de águas carbonatadas.

Tab. 2.4 Composição química das pozolanas da ilha de Santo Antão (%) [53]

Origem	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O + Na ₂ O	P.R.
Gamboesas 1	49.5	20.0	2.05	3.22	1.94	0.35	9.08	13.6
Gamboesas 2	49.9	19.6	1.96	2.04	1.74	0.28	9.89	13.6
Ribeira Fria	51.6	20.2	1.93	1.54	1.54	0.13	10.79	12.8
Fundão	50.8	21.0	1.66	1.45	1.77	0.19	10.19	13.3
Brejo 1	49.1	19.4	3.33	1.02	2.44	0.33	11.80	12.3
Brejo 2	50.5	19.5	1.88	1.81	1.59	0.29	11.10	12.7

2.2.1.1.4 Pozolanas Italianas

Sendo um país com grandes reservas de materiais pozolânicos, estes encontram-se divididos em vários grupos, com diferentes características. Os três grupos principais são [53], [115]:

- Grupo romano ou laical (arredores de Roma) – pozolanas constituídas por leucites alteradas e, por vezes por augite. Usualmente contêm traços de mica, olivina e zeólitos.
- Grupo napolitano ou flegreano (zona Nápoles) – pozolanas constituídas por tufos traquíticos. Ricas em sílica e alcalis, contendo sanidina e, por vezes, inclusões de piroxena.
- Grupo de Volturmo (Vesúvio) – composição semelhante à do grupo Romano, contendo hayuna em vez de leucite

Tab. 2.5 Composição química de algumas pozolanas Italianas (%) [115]

Origem	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	SO ₃	P.R.
Bacoli (Nápoles)	53.08	17.89	4.29	9.05	1.23	3.08	7.61	0.31	0.65	3.05
Barile	44.07	19.18	9.81	12.25	6.66	1.64	1.12	0.97	vstg.	4.42
Salone	46.84	18.44	10.25	8.52	4.75	1.02	6.35	0.06	vstg.	3.82
Vizzini (Sicília).	50.48	16.77	11.59	4.86	5.24	0.87	0.17	0.08	0.15	9.68

2.2.1.1.5 Terra de Santorini

Originárias da ilha vulcânica de Santorini, na Grécia, estas pozolanas naturais são fundamentalmente rochas não coesivas, constituídas principalmente por silício, conforme a Tab. 2.6. Ao nível mineralógico são compostas por quartzo, calcite e labradorite [115].

Tab. 2.6 Composição química de Santorini (%) [115]

Origem	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	P.R.
Santorini	65.1	14.5	5.5	3.0	1.1	3.5

2.2.1.1.6 Trass

Proveniente de erupções lodosas, o trass é classificado como um tufo traquítico, podendo ser encontrado em certas zonas da Alemanha, da França e da Hungria. Trata-se de um material terroso e compacto, abundante nas imediações de vulcões extintos.

Tab. 2.7 Caracterização química de trass (%) [53], [115]

Material	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	P.R.
Trass Alemanha [55]	56.50	21.56	5.81	2.56	1.50	6.98	0.00	n.d.	
Trass Reno [58]	52.12	18.29	5.81	4.94	1.20	1.48	5.06	n.d.	11.10
Trass Bavaria [58]	62.45	16.47	4.41	3.39	0.94	1.91	2.06	n.d.	7.41
Trass Selyp, Hungria [58]	55.69	15.18	6.43	2.83	1.01	n.d.	n.d.	0.26	16.33
Trass Ratka, Hungria [58]	73.01	12.28	2.71	2.76	0.41	n.d.	n.d.	0.10	6.34

Análises efectuadas a amostras de trass de Alemanha, provenientes das regiões do Reno e da Bavária indicam a existência de fases vítreas em ambos os materiais, da ordem dos 55 a 60% para o trass do Reno e ligeiramente superior, na ordem dos 62 a 67%, para o trass da Bavaria; para os dois materiais, a composição mineralógica é fundamentalmente quartzo e feldspato [115].

2.2.1.1.7 Pozolana vólvia (França)

Este material pode ser classificado como uma rocha não coesiva, sendo constituída por andesito e quantidades inferiores de quartzo, diopsido e magnetite [115]. A sua composição química encontra-se expressa na Tab. 2.8, enquadrando-se dentro dos valores correntes para pozolanas, com uma predominância de silicatos, seguida por uma quantidade menor mas significativa de aluminatos.

Tab. 2.8 Caracterização química de Pozolana Vólvia (%) (França) [115]

Material	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	TiO ₂	P.R.
Pozolana Vólvia	54.30	16.80	n.d.	n.d.	n.d.	4.47	2.60	n.d.	n.d.	n.d.

2.2.1.1.8 Pozolana E.U.A.

Os depósitos de pozolana que se encontram nos E.U.A. são constituídos por riolitos com pouca coesão, contendo uma percentagem vítrea que varia entre os 65% e os 95% [115].

Tab. 2.9 Caracterização química de pozolana proveniente dos E.U.A (%) [115]

Material	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	TiO ₂	P.R.
Pozolana E.U.A.	65.74	15.89	2.54	3.35	1.33	4.97	1.92	n.d.	n.d.	3.43

2.2.1.1.9 Furue shirasu e Higasi Matsuyama

Contendo quantidades muito elevadas de matéria vítrea (95% e 97%, respectivamente), as pozolanas provenientes do Japão, designadas por Furue shirasu e Higasi Matsuyama contêm adicionalmente quartzo e anortite [115]. A fase vítrea é composta fundamentalmente por SiO₂, conforme indica a tabela relativa à composição química destes materiais (Tab. 2.10)

Tab. 2.10 Caracterização química de pozolana proveniente do Japão (%) [115]

Material	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	TiO ₂	P.R.
Furue shirasu	69.34	14.56	1.02	2.61	n.d.	3.00	2.39	n.d.	0.25	1.85
Higasi Matsuyama	71.77	11.46	1.14	1.10	0.54	1.53	2.55	n.d.	0.14	6.50

2.2.1.1.10 Outros

Vários outros países com actividade vulcânica, como a Grécia, a Turquia e o México (entre outros) possuem reservas de pozolanas. A caracterização não se encontra expressa neste trabalho.

2.2.1.2 Pozolanas Naturais de origem sedimentar

Para além de pozolanas naturais de origem vulcânica, a outra principal fonte abundante de sílica reactiva na natureza é a terra diatomácea ou diatomito, de origem sedimentar, que pode ser encontrada no seu estado puro ou incorporando argila, sendo neste caso conhecida por moler. Também de origem sedimentar, o gaize contem sílica reactiva; contudo, esta rocha é utilizada principalmente após cozedura a 900°C, formando uma pozolana artificial [115].

Tab. 2.11 Pozolanas naturais de origem sedimentar [115]

Designação	Origem	Observações
Terra diatomácea/ diatomito	Várias	Conchas microscópicas de diatomas, contendo alto teor em sílica
Moler	Dinamarca	Terra diatomácea com percentagem de argila
Gaize	França (Ardenas e Vale do Meuse)	Rocha sedimentar com alto teor em sílica

2.2.1.2.1 Terra diatomácea/ diatomite

Trata-se de um produto mineral resultante da fossilização das conchas siliciosas de organismos unicelulares (Bacillariophyta) que são usualmente designados por diatomas. Estes organismos habitam em água doce ou salgada, extraíndo dela a sílica com a qual formam as suas conchas. Trata-se portanto, de um material abundante que, segundo dados do U.S. Geological Survey (2004) é um recurso explorado principalmente nos EUA, na China, no Japão e na Dinamarca (que produz moler, contendo 30% de argila). Na Europa, segundo a European Association of Mining Industries, reportando-se aos dados de 2003, a divisão da produção de diatomito pelos principais países produtores apresenta-se no gráfico seguinte: Devido à sua potencialidade pozolânica, já foi estudada a sua utilização em betão [8].

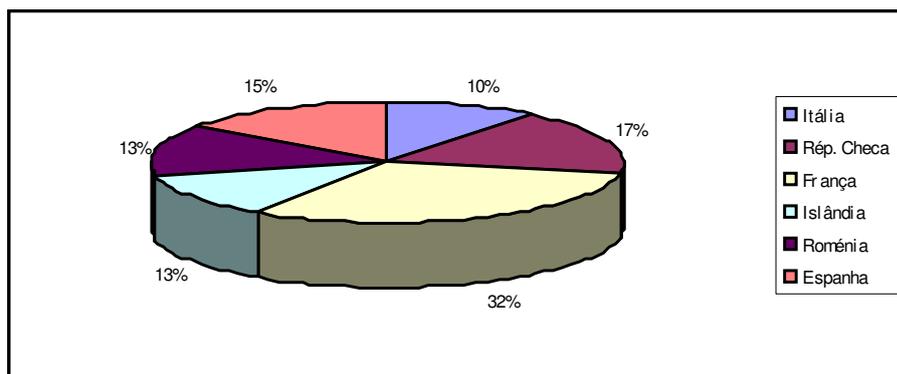


Fig. 2.1 Principais produtores mundiais de terra diatomácea

Segundo estas mesmas fontes, Portugal produziu 400 toneladas de diatomito anualmente na sua exploração situada em Óbidos. As restantes explorações (Rio Maior, Tomar, Sesimbra) encontram-se encerradas.

Alguns depósitos (a norte de Roma, em Oita no Japão) são compostos por materiais de origem diversa (vulcânica, sedimentar e orgânica) formando rochas híbridas procedentes da mistura de materiais de diferentes origens (rochas vulcânicas, diatomitos) em água, seguida de ataque ácido. Apresenta-se a composição química de dois diatomitos estudadas no LNEC por Sousa Coutinho (Tab. 2.12).

Tab. 2.12 Composição química de diatomitos comerciais (%) [53]

Diatomite	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	P.R.
1	71.51	13.19	3.99	6.28	4.14	Vest.	12.41
2	87.43	5.04	0.76	8.10	3.45	0.49	15.11

Paralelamente, estudos relativos a duas amostras de terra diatomácea revelaram a seguinte composição mineralógica: 95% de diatomas e 5% de ilite para a primeira amostra e 90% de diatomas e 10% de ilite para a segunda amostra.

2.2.2 Materiais Pozolânicos Artificiais

Os materiais pozolânicos artificiais decorrem da calcinação de materiais naturais em condições específicas ou são provenientes de subprodutos industriais. Actualmente, a sua utilização é frequentemente associada à produção de betão, como inibidores da reacção alcali-silica ou como substitutos do cimento.

Tab. 2.13 Pozolanas Artificiais [52, 53, 88, 115, 147, 192, 216, 249, 257]

Designação	Observações
Argilas cozidas	Caulinite, illite, esmectite, argilas cozidas a uma temperatura próxima de 900° e finura inferior a 34µm
Metacaulino	Calcinação de argila caulinítica entre 650°C e 850°C e moagem a uma finura entre 700m ² /kg e 900m ² /kg
Tijolos, telhas moídas (argila cozida)	Cozedura a baixa temperatura (menor do que 950°C) e finura entre 38µm e 600µm
HTI	Porcelana finamente moída
Gaize cozido	Rocha siliciosa contendo alguma argila, cozida a cerca de 950°C
Moler cozido	Moler (terra diatomácea contendo argila) cozido a cerca de 750°C
Bauxite cozido	Rocha formada a partir de basalto sujeito a meteorização, cozida entre 250°C e 300°C
Minion*	<i>Ironstone</i> (rocha com grande conteúdo em óxido de ferro) cozida e moída. Produto utilizado na antiguidade.
Basalto calcinado	Pedra basáltica calcinada e finamente moída
Cinzas de madeira	Com grande conteúdo em sílica, que é absorvida por muitas plantas durante o seu crescimento
Cinzas de casca de arroz	Com grande conteúdo em sílica, que é absorvida por muitas plantas durante o seu crescimento. Cozedura entre 500°C e 700°C.
Cinzas de cana de açúcar	Com grande conteúdo em sílica, que é absorvida por muitas plantas durante o seu crescimento
Vidro moído	Resíduo da indústria do vidro, obtido em pó ou moído
Cinzas volantes	Produto da queima de carvão em centrais termoelétricas
Silica de fumo / microsilica	Subproduto do fabrico de metais com ligas de silício e ferro/silício

* - Material produzido e utilizado na antiguidade

Embora por vezes consideradas como pozolanas [88], as escórias de alto forno, subproduto da indústria do aço, têm os mesmos constituintes que o cimento e são um material hidráulico [45, 52, 147].

2.2.2.1 Argila cozida

Durante a época Romana eram utilizados os resíduos cerâmicos como adições pozolânicas derivadas de argila cozida a baixas temperaturas, técnica que continua a ser utilizada actualmente em países como a Índia [208]. Contemporaneamente, nos países europeus, para obter este

produto usualmente não é possível recorrer a produtos cerâmicos de fabrico industrial devido às elevadas temperaturas de cozedura utilizadas nos fornos da indústria cerâmica.

2.2.2.1.1 Matéria prima

As argilas formaram-se a partir da desintegração química das rochas siliciosas, seguida de meteorização (gelo/degelo, mudanças de temperatura, acção do vento, acção da água, entre outros). Os produtos da desintegração incluem minerais, química e mecanicamente resistentes como o quartzo e os minerais argilosos, que são basicamente alumino-silicatos hidratados [71].

A argila usualmente utilizada para fabrico de tijolos contém uma grande fracção de silte e de areia apresentando, portanto, uma textura grosseira. A fracção argilosa é reduzida e constituída pelos seguintes minerais: quartzo, mica, carbonatos, sulfatos, sulfuretos, óxidos e hidróxidos de ferro, matéria carbonácea, caulinite, illite, esmectite e clorite.

Tab. 2.14 Composição química de argilas para tijolo (%) [71]

Compostos	(%)
SiO₂	40 – 65%
TiO₂	≤ 1%
Al₂O₃	15 – 25%
Fe₂O₃	2 – 10%
FeO	
MgO	0.5 – 11%
CaO	0.3 – 10%
Na₂O	< 1%
K₂O	1 – 4%
SO₃	0 – 0.4%
Perda CO₂	0 – 6%

2.2.2.1.2 Processo de transformação

De forma a induzir nestes materiais argilosos reactividade pozolânica é necessário efectuar a sua cozedura a uma temperatura adequada, que destrua ligações químicas produzindo material reactivo mas que não seja suficientemente alta para proporcionar a formação de novas fases cristalinas. O intervalo térmico óptimo difere consoante a composição da matéria-prima e pode ser determinado com recurso a análises térmicas. Os minerais argilosos, principais responsáveis pela formação da fase amorfa e reactiva libertam a água absorvida a cerca de 100°C, e desidroxilam entre 500°C e 600°C. Entre os 800°C e os 1000°C dá-se a nucleação de novas fases cristalinas.

Estas modificações podem ser aferidas através de Análise Térmica, nomeadamente, por Análise Térmica Diferencial.

2.2.2.1.3 Caracterização

A coloração deste material varia consoante a matéria-prima e o grau de cozedura, apresentando cores do laranja ao vermelho e do amarelo ao castanho-escuro. A granulometria e superfície específica são usualmente ajustadas através de moagem e peneiração.

2.2.2.2 Metacaulino

A designação caulino deriva da palavra chinesa Kau-ling, significando alta cordilheira, local de onde era extraído este material, utilizado ao longo dos tempos para diversas finalidades como a cerâmica e as indústrias do papel e da borracha. Sendo o metacaulino o produto da calcinação de caulino, é possível a sua obtenção através da cozedura do material caulínico mais ou menos puro à temperatura adequada. Tendo como principal intuito comercial, a inibição da reacção alcali-silica no betão, é possível a sua obtenção por via comercial de marcas internacionais, sendo de salientar que alguns produtores iniciaram recentemente o processo de produção de metacaulino a partir de matérias-primas nacionais.

2.2.2.2.1 Matéria prima

Os principais produtores de caulino são os Estados Unidos, Uzbequistão, Republica Checa, Alemanha, Brasil e a Ásia onde a produção de estes materiais se encontra em franco crescimento. Segundo dados da European Association of Mining Industries, a Europa extrai cerca de 25% do caulino mundial, sendo o Reino Unido o principal produtor e existindo uma tendência de decréscimo da produção quer a nível mundial, quer a nível europeu. Em Portugal, a produção, que se situava na ordem das 150000 toneladas em 2002 (EAMI), tem vindo a decrescer.

Os depósitos de caulino encontram-se localizados ao longo de vários pontos da costa portuguesa, com especial incidência na Costa Norte, regiões de Viana do Castelo, Porto e norte de Aveiro. Outros depósitos situam-se nas proximidades de Coimbra, Leiria, Santarém e Viseu. Os locais de extracção conhecidos [65, 72], são os seguintes:

- Andorinha, Coimbra
- Alvarães, Viana do Castelo
- Bouça da Guelha, Barcelos, Braga
- Campados, Esposende, Braga

- Carreiro, Barcelos, Braga
- Casal dos Braçais, Óbidos, Leiria
- Caulinos da Vista Alegre, Ovar, Aveiro
- Chão, Lousã, Coimbra
- Cumieira n.º7, Barcelos, Braga
- Cunha, Vila do Conde, Porto
- Custóias, Porto
- Macieira de Sarnes, S.João da Madeira
- Mosteiros, Santarém
- Olho Marinho, Coimbra
- Quelha das Borrachas, Santo Tirso, Porto
- Quinta da Antónia, Esposende, Braga
- Quinta do Covo, Oliveira de Azeméis, Aveiro
- Rio Maior, Santarém
- Telheira, Vila Nova de Gaia, Porto
- Tojal, Mangualde, Viseu
- Vale do André, Pombal, Leiria
- Valverde, Viana do Castelo
- Viso de Cima, Senhora da Hora, Porto

Alguns destes depósitos não têm actualmente actividade, em grande parte devido a uma diminuição da demanda da matéria-prima e à pressão imobiliária. Os caulinos encontrados dividem-se em residuais e sedimentares: os caulinos residuais resultam da degradação do feldspato de granitos enquanto os caulinos sedimentares foram transportados e depositados ou re-depositados em bacias.

Existe um estudo da autoria de Celso Gomes [72] que inclui a caracterização granulométrica, química e mineralógica de uma vasta gama de caulinos nacionais. Segundo este estudo, em termos de composição mineralógica, os principais constituintes de ambos os caulinos são quartzo, mica e algum feldspato, para além da caulinite, que é predominante na fracção fina (<2 μ m), observando-se também os minerais halosite e illite. A análise química da amostra total apresentou como óxidos principais SiO₂ (44 a 50%) e Al₂O₃ (25 a 39%), sendo o caulino de Andorinha aquele com menor percentagem de sílica (44,85%) e maior teor em alumina (38,5%). O caulino de Rio Maior possui a maior teor em sílica (59,72%) e a menor teor em alumina (25,95%).

A cristalinidade da matéria-prima influenciará de forma determinante o produto final (metacaulino), pelo que se apresenta o Índice Hinckley de cristalinidade (IC_H), que classifica as caulinites quanto à sua cristalinidade da seguinte forma:

Tab. 2.15 Índice Hinckley de cristalinidade [72]

Índice de Hinckley	Classificação
$IC_H > 1$	Cristalinidade elevada
$1 > IC_H > 0,75$	Cristalinidade boa
$0,75 > IC_H > 0,50$	Cristalinidade media
$0,25 > IC_H > 0,50$	Cristalinidade fraca
$IC_H > 0,25$	Cristalinidade muito fraca

Regra geral, os caulinos residuais estudados possuem média ou boa cristalinidade, com o caulino de residual de Alvarães a apresentar um valor de 0.95 para a caulinite, correspondente ao maior índice encontrado; nos caulinos sedimentares a variação do grau de cristalinidade é muito notória, com o valor mínimo de 0.10 para o caulino de Alvarães (Chasqueira) e máximo de 0.73 para o caulino de Rio Maior, sendo comum a classificação de cristalinidade média.

2.2.2.2.2 Processo de transformação

O metacaulino é obtido através da calcinação de caulino a temperaturas entre 650°C e 800°C e é conhecida a sua utilização desde 1962, quando foi incorporado no betão utilizado para construção da barragem Jupia, no Brasil [160].

O comportamento do caulino durante a fase de aquecimento traduz-se na perda da água adsorvida por volta dos 100°C e na sua desidroxilação por volta dos 500°C, com a formação de metacaulino. Com a continuação do aquecimento, para valores superiores a 900°C, permite a nucleação de mulite, e fase vítrea [160]. Estas modificações de estrutura são visíveis através da aplicação de Análise Térmica Diferencial.

2.2.2.3 Cinzas Volantes

Anualmente, são produzidas, a nível mundial, 600 milhões de toneladas, sendo principal produtor o EUA; países como o Reino Unido, Alemanha, Austrália e Espanha são também grandes produtores. Em Espanha, a produção anual de cinzas volantes é superior a 7 milhões de toneladas por ano.

A percentagem de utilização deste produto é usualmente baixa, inferior a 30%, exceptuando-se alguns países como a Bélgica, pequena produtora, que tem uma taxa de utilização de 73%, e outros como a Itália, Reino Unido, Alemanha e Japão, que escoam uma parcela significativa do produto (>48%) [34].

2.2.2.3.1 Matéria prima

Carvão betuminoso ou sub-betuminoso, assim como lignite podem ser utilizados para queima em estações termoelétricas, formando cinzas volantes com diferentes composições dependendo da composição da ganga [208].

2.2.2.3.2 Processo de transformação

Produto proveniente da queima do carvão em estações termoelétricas, a cinza volante é sujeita a alta temperatura seguida de arrefecimento brusco, proporcionando a formação de material vítreo. A sua composição depende da composição da matéria-prima e do processo de queima.

2.2.2.3.3 Caracterização

Embora sejam mais comuns as cinzas volantes constituídas por partículas esféricas, também existem sob a forma irregular ou angular; a coloração pode variar do preto ao castanho e vermelho e ao transparente ou branco. Ao nível dimensional, verifica-se também uma grande variabilidade, existindo cinzas com partículas mais pequenas (0-20 μm) até cinzas com partículas na ordem dos 50-500 μm .

A análise da composição química de cinzas volantes de diversas proveniências (Tab. 2.16) (Europa, Canadá, Japão, EUA) resultou numa preponderância de sílica (SiO_2) com teores entre 40% e 60%, seguida por alumina (Al_2O_3) com teores entre os 20% e os 30%; a percentagem de óxidos de ferro revelou-se muito variável de local para local e a quantidade de óxido de cálcio encontrado foi sempre baixa, na ordem dos 2% a 5%, em todas as amostras, enquanto a quantidade de alcalis encontrada chegou, em alguns casos, a 5%; o teor de óxido de titânio encontrado rondou sempre o valor de 1%. [115]

Ao nível mineralógico, é possível constatar a existência de matéria vítrea e de algumas fases cristalinas identificadas como quartzo, mulite, hematite e magnetite, em cinzas provenientes da queima do carvão betuminoso e sub-betuminoso. Nas cinzas produzidas através da lignite, a composição diferencia-se por teores mais elevados em cálcio e baixo teor em alcalis na maioria dos casos, dependendo contudo da composição da matéria-prima [92, 183].

Tab. 2.16 Composição química de cinzas volantes de baixo teor em cálcio em diversos países (%) [115, citando vários]

País	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	C	P.R.
França (CV1)	51.68	27.01	6.25	1.72	1.88	0.54	4.49	n.d.	n.d.	4.70
França (CV2)	48.10	24.68	6.50	1.41	1.82	0.56	4.06	n.d.	n.d.	11.70
Bélgica	55.74	24.14	6.02	2.47	2.22	n.d.	n.d.	1.04	n.d.	2.74
Taiwan	48.75	23.21	4.15	3.93	1.00	0.24	1.10	n.d.	n.d.	10.39
Reino Unido	50.09	28.1	11.7	1.62	1.54	0.28	0.62	n.d.	n.d.	1.27
Polónia	50.8	23.9	8.6	3.6	2.8	0.8	2.9	0.8	n.d.	2.9
Dinamarca	53.98	22.27	11.60	3.95	1.97	2.71	n.d.	0.73	n.d.	2.13
Holanda	50.46	25.74	6.53	4.32	2.24	2.04	4.43	n.d.	n.d.	3.95
Canada	47.0	17.7	25.3	2.1	1.0	0.7	2.3	0.3	n.d.	2.4
Japão	57.5	26.1	4.0	5.1	1.3	1.50	1.35	0.4	n.d.	1.6
Reino Unido	48.0	38.2	4.5	3.3	1.5	0.3	1.7	0.37	n.d.-	2.3
Japão	53.53	23.55	6.23	5.85	1.60	2.20	1.75	n.d.	2.14	3.44
EUA	52.24	19.01	15.71	4.48	0.89	0.82	2.05	1.34	n.d.	0.92
Canadá	43.8	22.1	16.2	3.5	0.8	4.4	n.d.	1.1	n.d.	5.0
Alemanha	51.2	29.6	6.8	3.4	1.2	0.6	3.1	0.5	n.d.	3.3

Em Portugal, são produzidas cinzas volantes nas centrais de Sines e do Pego, as quais são posteriormente utilizadas para fabrico de cimento e betão. A sua composição química, segundo Aires Camões [34] encontra-se expressa na Tab. 2.17, sendo traduzida por valores de SiO₂ superiores a 40% e valores de Al₂O₃ superiores a 20%. A quantidade de cálcio é relativamente baixa, característica comum das cinzas produzidas a partir de carvão.

Tab. 2.17 Composição química de cinzas volantes portuguesas (%) [34]

Origem		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	P.R.
Sines	Mínimo	50	27	5	1.5	0.5	0.5	1	0.5	2
	Máximo	54	29	8	4	2	1	2	1	4
Pego	Mínimo	42.2	21	3.5	1.7	0.6	0.2	1.1	0.2	5.6
	Máximo	58.5	32.6	9.1	9.2	2.6	0.9	3.1	1.04	9.3

2.2.2.4 Sílica de fumo / microsíllica

2.2.2.4.1 Matéria prima / processo de transformação

Este material é proveniente do processo de fabrico de silício e ligas de ferro e silício em fornos eléctricos que atingem temperaturas na ordem dos 2000°C, produzindo um gás SiO que, transportado para zonas de temperatura mais baixa, oxida (reacção com o ar) e condensa formando partículas de dióxido de silício. Anualmente, são produzidas 2 milhões de toneladas [34].

2.2.2.4.2 Caracterização

Caracteriza-se por ter cor cinza-escura, e é formado por pequenas partículas esféricas com um diâmetro médio de 0.1µm, possuindo um superfície específica de 15 a 25 m²/g. Quimicamente, é fundamentalmente constituído por sílica em fase amorfa, podendo conter vestígios de quartzo. A sílica de fumo proveniente do fabrico de ligas de ferro e silício tem uma composição mais complexa do que a sílica de fumo proveniente do fabrico de silício, podendo o seu conteúdo em elementos menores atingir o valor de 30%.

Tab. 2.18 Composição de sílica de fumo proveniente da produção de silício e ligas de ferro-silício (%) [115]

Composição Química	Si (metal)	Liga 75% Fe/Si
SiO ₂	94 – 98	86 – 90
C	0.2 – 1.3	0.8 – 2.3
Fe ₂ O ₃	0.02 – 0.15	0.3 – 1.0
Al ₂ O ₃	0.1 – 0.4	0.2 – 0.6
CaO	0.08 – 0.3	0.2 – 0.6
MgO	0.3 – 0.9	1.0 – 3.5
Na ₂ O	0.1 – 0.4	0.8 – 1.8
K ₂ O	0.2 – 0.7	1.5 – 3.5
S	0.1 – 0.3	0.2 – 0.4
P.R.	0.8 – 1.5	2.0 – 4.0

2.2.2.5 Vidro moído

Em betões [187, 188] ou como parte da composição do cimento [47, 245], algumas tentativas têm sido efectuadas com o intuito de utilizar os resíduos de vidro provenientes quer da reciclagem, quer da indústria vidreira.

2.2.2.5.1 Matéria prima / processo de transformação

A própria indústria vidreira produz resíduo que pode ser utilizado sem preparação ou necessitar de moagem. Os vidros procedentes de processos de reciclagem necessitam de selecção e moagem. Como a dimensão das partículas é de extrema importância, desempenhando um papel fundamental na reacção pozolânica, é crucial que a moagem produza pós de elevada finura.

2.2.2.5.2 Caracterização

Cajun Shi et al [192] efectuaram a caracterização de resíduos de vidro provenientes da indústria vidreira Tab. 2.19 e ensaiaram este material com diversos graus de moagem relativamente à sua reactividade pozolânica e à reacção alcali-silica, concluindo favoravelmente à sua utilização em ambas as situações. O vidro é fundamentalmente composto por sílica, com algum teor de cálcio e sódio.

Tab. 2.19 Caracterização de resíduos de vidro (%) [192]

Composição química	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃
Vidro	72.5	0.16	0.2	9.18	3.65	13.2	0.12	0.39

2.2.2.6 Cinzas de casca de arroz

Incorporadas no conceito de biomassa, conjuntamente com todas as cinzas de origem orgânica (refugo agrícola, produtos agrícolas, refugo florestal, refugo industrial em indústrias com produtos de natureza orgânica, refugo municipal), são talvez o produto alvo de estudos mais aprofundados e já de utilização corrente.

Este produto tornou-se abundante no mercado asiático, onde existe uma elevada produção de arroz e portanto, um grande excedente de casca de arroz. De utilização variada (isolante, estabilização de solos, vidros, argamassas e betão, tijolos prensados, cimento Portland, refractários) [35] é comercializado por diversas empresas, sendo produzidas anualmente 20 milhões de toneladas [34]. Em Portugal, existe a possibilidade de produzir cinzas de casca de arroz em quantidade razoável para o mercado interno.

2.2.2.6.1 Matéria prima

As cinzas de casca de arroz são provenientes da queima da casca do arroz, material excedente na produção do arroz. No processo de descasque do arroz, é extraída casca correspondente a cerca de 22% da matéria-prima [257].

2.2.2.6.2 Processo de transformação

A utilização mais frequente da casca de arroz é a de combustível nas fábricas de arroz, sendo sujeita a queima a altas temperaturas de forma a produzir vapor para o processo de cozedura. Este procedimento provoca a volatilização de 75% da casca, constituída por matéria orgânica, e a produção de 25% de cinzas de casca de arroz. Desta forma, a partir de 1000kg de arroz, são produzidos cerca de 55kg de cinzas de casca de arroz [257].

A temperatura de cozedura mais usual, em fornos locais e pouco controlados ronda os 700°C; estudos efectuados apontam para a existência de algum material cristalino com uma temperatura de cozedura de 600°C e para a preponderância de material cristalino à temperatura de cozedura de 900°C [201].

2.2.2.6.3 Caracterização

Este produto apresenta uma coloração cinzenta e dimensões na ordem dos 25µm. Ao nível da sua constituição química, é composto fundamentalmente por sílica (> 80%), existindo a possibilidade de parte dessa sílica se encontrar em estado cristalino, sob a forma de quartzo ou cristobalite.

Tab. 2.20 Composição química de cinzas de casca de arroz, cinzas de palha de arroz e cinzas de bagaço (%) [115]

Composição Química	Cinzas de casca arroz	Cinzas palha arroz	Cinzas bagaço
SiO ₂	79.5	82.0	75.0
Al ₂ O ₃	0.09	0.3	6.7
Fe ₂ O ₃	0.06	0.3	6.3
CaO	0.64	1.5	2.8
MgO	0.83	1.8	3.2
Na ₂ O	0.07	5.3	1.1
K ₂ O	3.75	4.9	2.4
P ₂ O ₅	0.31	0.8	4.0
P.R.	14.3	-	0.9

2.2.2.7 Cinzas de caule de trigo

Inseridas no contexto de cinzas de origem vegetal, produzidas a partir da planta do trigo que, à semelhança de outros produtos agrícolas de crescimento anual que retiram minerais e silicatos dos solo (arroz, girassol, tabaco), têm alto conteúdo em sílica [22].

2.2.2.7.1 Matéria prima

Produto de consumo generalizado, o trigo é o principal produto agrícola mundial, com uma produção de 880 milhões de toneladas, de onde se extraem 550 milhões de toneladas de caule de trigo [22].

2.2.2.7.2 Processo de transformação

A temperatura de queima, à semelhança do que acontece nas restantes pozolanas artificiais, é fundamental para a activação pozolânica deste material. Experiências com queimas feitas de 300°C a 1000°C, em intervalos de 100°C e tempo de queima entre 1 e 30 horas, indicaram como gama de temperatura óptima entre 570°C e 670°C durante 5 horas [22].

2.2.2.7.3 Caracterização

Embora o conteúdo mineral deste material, à semelhança de outros materiais de origem agrícola, varie com o solo e as condições ambientais, na Tab. 2.21 apresentam-se valores referentes a uma amostra de cinzas produzidas a partir de trigo proveniente da Turquia, sujeita a temperaturas de queima de 570°C e 670°C (limites do intervalo que confere maior reactividade pozolânica [22]).

Tab. 2.21 - Composição química de cinzas de trigo produzidas à temperatura de 570°C e 670°C (%) [22]

Composição Química	Cinzas caule trigo 570°C	Cinzas caule trigo 670°C
SiO ₂	73.06 (50.78 solúvel)	83.80 (54.24 solúvel)
Al ₂ O ₃	3.90	4.55
Fe ₂ O ₃	1.75	1.05
CaO	8.12	12.54
MgO	2.80	2.39
SO ₃	1.91	1.49
K	5.85	-
Na	1.83	-

Composição Química	Cinzas caule trigo	Cinzas caule trigo
	570°C	670°C
Ca	3.05	-
P.R.	8.79	7.22

2.2.2.8 Cinzas de madeira

As cinzas são muito utilizadas como fonte de potássio para uso agrícola [135]; no entanto, têm-se estudado outras possibilidades para o consumo deste material, nomeadamente a sua incorporação em argamassas e betões [217], tendo em conta a sua eventual reactividade pozolânica.

Da mesma forma que outros produtos de origem vegetal, as árvores extraem minerais e silicatos do solo; contudo, o seu conteúdo em silicatos é menor do que o de plantas que crescem anualmente [22].

2.2.2.8.1 Matéria prima

São utilizados resíduos da indústria da madeira (produção de mobiliário e restantes produtos à base de madeira). Dadas as diferenças de composição entre os vários tipos de madeira, a temperatura ideal de cozedura, de forma a potenciar a reacção pozolânica, será também variável [135]. A madeira produz pouca quantidade de cinza, na ordem dos 0.4% a 2% do seu peso seco [135], valor também dependente do tipo de madeira utilizado.

2.2.2.8.2 Processo de transformação

Os resíduos de madeira são frequentemente utilizados como combustível na própria indústria, gerando cinzas como subproduto; contudo, a cozedura não tem em conta a sua reutilização, dado que tanto a temperatura como o tempo são variáveis, pelo que as características deste material são inconstantes.

2.2.2.8.3 Caracterização

Os resultados publicados [60, 135] relativos à composição química deste material são distintos. Segundo Misra et al [135] o conteúdo em CaCO_3 é predominante na cinza proveniente dos vários

tipos de madeira, seguido pelo composto $K_2Ca(CO_3)_2$ quando a temperatura de cozedura é de 600°C. Para uma temperatura de 1300°C, verifica-se uma modificação fundamentalmente resultante da transformação de $CaCO_3$ em $Ca(OH)_2$.

Tab. 2.22 - Composição elementar de cinzas de dois tipos de madeira sujeitas a cozedura a 600°C (%) [135]

Elemento	Pinho (EUA)	Carvalho branco (EUA)
Cálcio	29.05	31.35
Potássio	16.24	10.25
Magnésio	7.03	7.57
Enxofre	1.07	1.21
Fósforo	0.84	0.56
Manganês	4.04	0.14
Zinco	0.36	0.08
Ferro	0.58	0.09
Alumínio	0.47	<0.03
Sódio	0.06	<0.06
Silício	n.d.	0.13
Boro	0.06	0.04
Cobre	0.04	0.02

Outros autores [60], relativamente a cinzas de madeira provenientes da Nigéria, obtiveram resultados da análise química, que indicam como composto principal o SiO_2 , seguido de K_2O .

Tab. 2.23 Caracterização química de cinzas de madeira da Nigéria (%) [60]

Composição Química	Cinzas de madeira
SiO_2	67.20
Al_2O_3	4.09
Fe_2O_3	2.26
CaO	9.98
MgO	5.80
Na_2O	0.08
K_2O	18.75
SO_2	0.04
P_2O_5	0.048

2.2.2.9 Outros

Diversos materiais, produzidos a partir da queima de resíduos (agrícolas, industriais, urbanos, hospitalares) detêm propriedades mais ou menos pozolânicas, sendo susceptíveis de incorporação em argamassas e betões. Existem diversos estudos relativos à utilização de cinzas de queima de resíduos, que variam consoante as necessidades de cada país. Assim, na Malásia e Indonésia, são produzidas cinzas por incineração a 800°C de resíduos do fabrico de óleo de palma, produto com baixa reactividade pozolânica [206], enquanto em Cuba são produzidas cinzas a partir da cana-de-açúcar [134] com resultados satisfatórios

3 Reacção Pozolânica

Entende-se por reacção pozolânica, a reacção química entre um dado material, vulgarmente designado como pozolânico, e o hidróxido de cálcio, na presença da água, formando compostos hidráulicos. É a existência desta reacção que permite classificar os materiais como pozolânicos (ou não) e a sua extensão determina o grau de pozolanicidade (ou a reactividade pozolânica) de um dado material.

Dada a complexidade desta reacção, a sua semelhança com a reacção de hidratação do cimento e a sua interacção com a reacção de carbonatação, efectuar-se-á uma breve descrição destas reacções. Em seguida, será descrita a reacção pozolânica e abordados os factores que interferem nesta reacção.

A contextualização desta reacção no campo das argamassas com base em cal aérea será efectuada através de registos desta reacção em argamassas antigas e da explicitação da sua interferência nas características das argamassas, com base em pesquisa bibliográfica.

3.1 Reacções Hidráulicas e a Reacção de Carbonatação

3.1.1 Matérias-primas e ligantes aéreos e hidráulicos

[52, 93, 98, 99, 147]]

Enquanto a cal aérea é obtida a partir do calcário, fundamentalmente constituído por CaCO_3 , com mais ou menos impurezas, a cal hidráulica parte da utilização de calcários com o máximo de 20% de argila (calcários margosos), contendo portanto compostos argilosos (SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3), estando classificada como cal hidráulica natural (NHL), ou da mistura de hidróxido de cálcio, silicatos de cálcio e aluminatos de cálcio pré-determinada, classificando-se como cal hidráulica artificial (HL). No caso do cimento Portland, o seu fabrico pressupõe a utilização de calcários margosos ou a mistura de cal com argila, variando a componente argilosa entre 20% e 40%. A composição química do clinker, produto obtido após a transformação térmica das matérias-primas para a produção do cimento, é caracterizada por conter teores em CaO que variam entre 60% e 68%, em SiO_2 entre 17% e 25%, em Al_2O_3 entre 2% a 9% e em Fe_2O_3 entre 0,5% e 6%. A adição gesso, é efectuada na altura de moagem do clínquer resultante do processo de cozedura, de forma a produzir cimento CEM em que o teor de hidróxido de cálcio e sílica reactivos deverá ser superior a 50%.

Os compostos básicos MgO , K_2O e Na_2O estão normalmente presentes de forma residual nas matérias-primas destes materiais.

3.1.2 Fabrico de ligantes/ Compostos formados durante o processo

Cal Aérea [32, 52, 93, 147]

De uma forma simplificada, omitindo as reacções secundárias que podem ocorrer durante o processo, devido à presença de impurezas na matéria prima, pode-se descrever a reacção ocorrida a partir da calcite (CaCO_3) ou dolomite ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) quando sujeita a aquecimento até cerca de 900°C , como:



Trata-se, portanto, de reacções endotérmicas, com libertação de dióxido de carbono. A produção da cal aérea hidratada pressupõe a hidratação do óxido de cálcio ou de magnésio, para se obter hidróxido de cálcio ou magnésio através da seguinte reacção:



É o hidróxido de cálcio (por vezes, conjuntamente com o hidróxido de magnésio), em pasta ou em pó, dependendo do processo de extinção, que é utilizado como ligante nas argamassas de cal.

Cal Hidráulica [45, 75, 98]

No fabrico da cal hidráulica, com cozedura das matérias-primas a cerca de 1200°C , geram-se compostos semelhantes aos presentes no fabrico de cimento, sendo de salientar a formação de C_2S ($2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$) e os compostos C_3A ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$) e C_4AF (na forma de solução sólida variando entre C_2F ($2\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$) e $\text{C}_6\text{A}_2\text{F}$ ($6\text{CaO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$)), embora estes últimos estejam presentes em pequenas quantidades. É expectável a presença escassa de C_3S ($3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$) devido a altas temperaturas pontuais no processo de queima, assim como de percentagens variáveis de calcite, dolomite e CaO que não tiveram tempo, temperatura ou estequiometria para reagirem. A principal diferença de composição relativamente ao cimento reside na diminuição da relação $\text{C}_3\text{S}/\text{C}_2\text{S}$, dado que o primeiro composto é formado a temperaturas mais elevadas, só pontualmente atingidas nos fornos de fabricação de cal hidráulica. Ao nível de fabrico, este produto necessita de passar pelo processo de extinção, da mesma forma que a cal aérea de forma a converter o CaO em $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

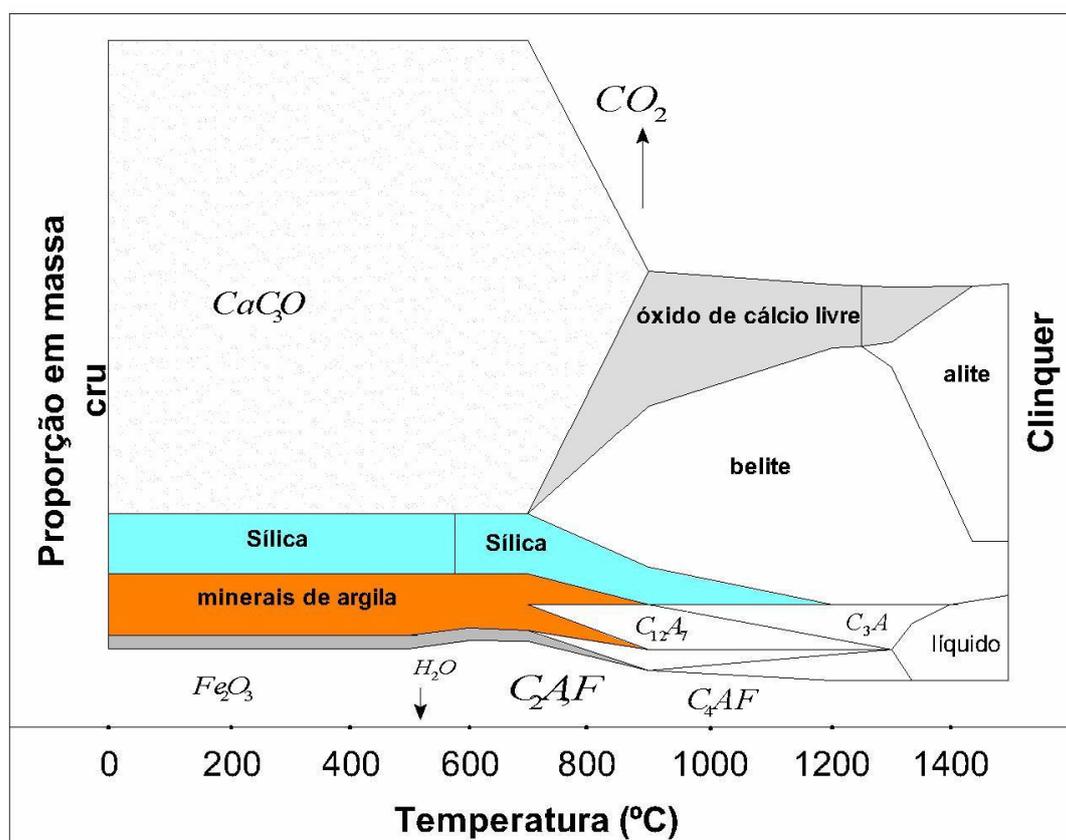


Fig. 3. 1 Modificações químicas no processo de fabrico do cimento Portland, conforme [100]

Cimento [52, 93, 147]

Fundamentalmente devido às altas temperaturas atingidas (1450°C), os compostos que constituem o cimento são, principalmente C_3S (alite), C_2S (na forma de βC_2S , belite), C_3A e C_4AF ($4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$), com preponderância para o C_3S (Fig. 3. 1). No processo de formação destes compostos, é necessária uma rápida velocidade de arrefecimento, dado que o composto C_3S é instável a temperaturas inferiores a 1250°C e o composto βC_2S produzido a 1450°C não é estável abaixo dos 675°C, transformando-se em γC_2S , que é muito pouco reactivo. Na realidade, outros elementos estão presentes na estrutura destes compostos; assim ao C_3S contendo Mg, Al ou Fe é dado o nome de alite e ao βC_2S com K, P ou Ba, o nome de belite. Em ambos os casos, tratam-se de estruturas cristalinas. O composto C_3A existe sob a forma cristalina ou como vidro nas zonas intersticiais dos restantes cristais.

3.1.3 O fenómeno da carbonatação

Partindo de ligantes aéreos, a reacção que provoca o endurecimento de argamassas é designada por carbonatação e refere-se à reacção do hidróxido de cálcio ou de magnésio com o dióxido de carbono, obtendo-se carbonato de cálcio e carbonato de magnésio, respectivamente, consoante as equações 3.5 e 3.6:



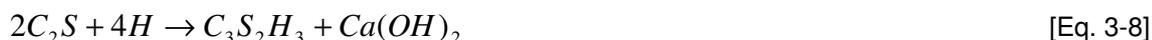
Estas reacções ocorrem simultaneamente em argamassas produzidas com cal aérea ou com cal hidráulica.

3.1.4 O fenómeno da hidratação

[52, 93, 147]

O fenómeno de hidratação ocorre tanto nas cais hidráulicas como no cimento, a fase de hidratação é complexa e demorada, devido aos variados elementos intervenientes e reacções simultâneas. Neste ponto serão tratadas as principais reacções típicas de um cimento Portland.

As principais reacções que ocorrem no cimento Portland, após adição de água, são de hidratação, e podem traduzir-se fundamentalmente pelas seguintes equações:



Os compostos $C_3S_2H_3$ são usualmente designados por C-S-H e parecendo amorfos, mostram a sua cristalinidade quando observados por MEV, dada a sua estrutura microcristalina.

Dado que a reacção do composto C_3A com a água (Equação 3.10) é muito violenta, provocando endurecimento imediato, é adicionado gesso ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) no final do processo de fabrico do cimento para reagir com o C_3A , durante a fase de desenvolvimento de presa, formando-se sulfoaluminato de cálcio, usualmente designado por etringite (Equação 3.11).

Paralelamente, o composto C_4AF também reage com o gesso, produzindo sulfoferrite de cálcio e sulfoaluminato de cálcio. A etringite é posteriormente transformada em monossulfato de cálcio ($C_3A \cdot CS^- \cdot H_{16}$), metaestável, formando-se ao longo do tempo aluminato tricálcico hidratado (C_3AH_6).

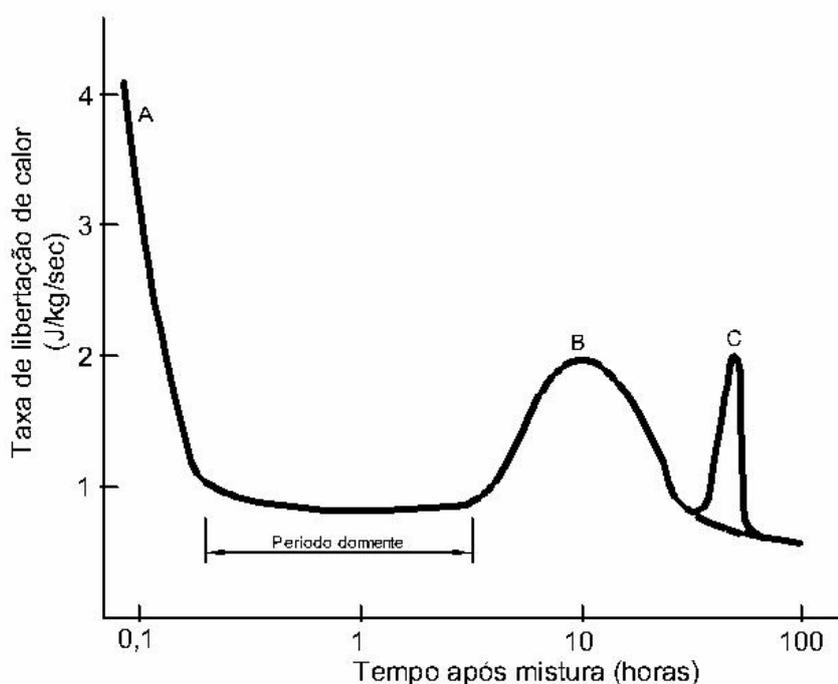


Fig. 3. 2 Libertação de calor devido às acções de hidratação (conforme [93])

Durante a fase de hidratação, os primeiros a reagir são o C_3A e o C_3S , sendo que, com a adição de gesso, o C_3S reage em primeiro lugar; a reacção do C_2S é mais lenta. A libertação de calor devido às reacções de hidratação é usualmente monitorizada de forma a permitir o acompanhamento dos diversos momentos de ocorrência destas reacções [Fig. 3. 2], em que A corresponde fundamentalmente à reacção do C_3A com a água, anterior à acção do gesso e B (que ocorre usualmente entre as 4h e as 10 h) corresponde principalmente à reacções de hidratação. Num período entre as 18 e 30h surge o pico C, devido à renovada acção do C_3A com a água, após esgotamento do gesso. Após a fase de hidratação, a pasta é composta pelos vários compostos hidratados - silicatos hidratados, aluminatos de cálcio, sulfoaluminatos de cálcio e

ferrites - muito ou pouco cristalizados, por cristais de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (portlandite), outros componentes minoritários e cimento não hidratado, numa estrutura porosa. As impurezas das matérias primas e o combustível utilizado na queima introduzem outros compostos, minoritários, no cimento, tais como os compostos alcalinos (Na, K), os compostos de magnésio que podem cristalizar ou manter-se na fase vítrea e também fluoretos, fosfatos, óxidos de chumbo e zinco e sulfuretos.

3.2 Descrição da Reacção Pozolânica

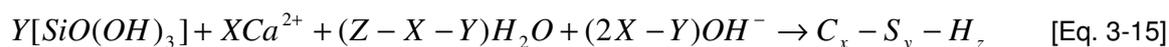
O estudo do comportamento químico dos vários materiais utilizados como ligantes em argamassas de uso corrente (cal, cal hidráulica, cimento) permite aprofundar a compreensão sobre a reacção pozolânica. O conceito de reacção pozolânica tem variado até aos nossos dias. Vicat, na sua publicação de 1837 sobre argamassas e cimentos, afirma que as pozolanas naturais e artificiais, são compostas principalmente por sílica e alumina [240], e também a proposta de que as reacções dos silicatos e aluminatos de cálcio serem as responsáveis pela hidraulicidade de determinadas cals é da sua autoria [131, 240]. Durante a segunda metade do século XIX, Frémy e Landrin, entre outros, estudaram o fenómeno de reacção de pozolanas com a cal, reforçando a importância dos silicatos e aluminatos presentes nos materiais pozolânicos relativamente à sua reactividade com a cal [131]. Em Portugal, Sousa Coutinho [52] descreve a reacção pozolânica como a reacção entre os compostos siliciosos e aluminosos reactivos da pozolana e o hidróxido de cálcio. Segundo A. Moroupoloulou et al [142, 143], a dissolução das fases siliciosas (que ocorre em meio alcalino) na solução aquosa controla a reacção pozolânica. Desempenham também um papel interventivo os aluminatos, dando-se a dissolução da alumina em soluções de elevado pH [160]. Actualmente, entre várias publicações sobre o tema, os autores Cajun shi e Robert L. Day [190] definem claramente os vários passos desta reacção, descrevendo a reacção pozolânica como despoletada pela hidrólise do hidróxido de cálcio, conforme a reacção em baixo.



Segundo estes autores, as pozolanas, constituídas fundamentalmente por matéria vítrea siliciosa ou aluminosa, são despolimerizadas conforme as equações seguintes:



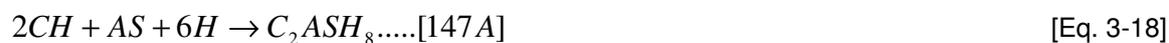
A reacção entre os iões Ca^{2+} e os mono-silicatos e aluminatos ocorre então da seguinte forma:



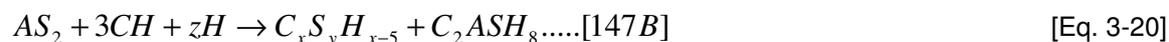
A interacção entre os iões Ca^{2+} e os grãos de pozolana é descrita por outro autor da seguinte forma [241]:

- difusão de iões Ca^{2+} da solução para a partícula de pozolana
- adsorção dos iões Ca^{2+} na superfície da partícula
- difusão dos iões Ca^{2+} através da camada exterior constituída pelo produto de reacção
- reacção dos iões Ca^{2+} com a partícula de pozolana

Existem estudos especificamente dedicados a reacção de algumas pozolanas específicas com hidróxido de cálcio ou cimento. Nesta perspectiva, as principais reacções entre cinzas volantes e hidróxido de cálcio podem ser expressas como:



ou sob a forma:



Em relação à sílica de fumo, a equação da reacção é análoga a 3.17 e 3.18; contudo Lu et al. [121] verificaram que para uma pasta cimentícia com 18% de sílica de fumo e relação água/cimento de 0,2, a relação H/S decresce de 3.9 aos 3 dias para 2.1 aos 28 dias.

Verifica-se que já com 3 dias de idade as argamassas de cal e pozolana apresentam gel C-S-H [190]. Enquanto o C-S-H precipita à volta das partículas de pozolana, os aluminatos de cálcio hidratados precipitam mais afastados das partículas de pozolana.

3.2.1 Silicatos de cálcio hidratados (C-S-H)

Sendo os produtos principais da hidratação do cimento e da cal hidráulica, assim como da reacção pozolânica analogamente designados por C-S-H, é de salientar a existência de diversos tipos de C-S-H, tendo em conta as condições nas quais são formados, as suas estruturas cristalinas e as suas propriedades [208]. O conhecimento relativo a estes compostos tem aumentado, sendo conhecidos 17 tipos cristalinos de C-S-H em 1972 [208] e estando contabilizadas actualmente mais de 30 fases de CSH no estado cristalino [48]. Contudo, o grau de cristalinidade destes produtos é usualmente baixo, dado que para a formação de produtos cristalinos são necessárias condições de pressão e temperatura superiores às encontradas em meio ambiente (temperatura superior a 100°C e pressão superior à pressão atmosférica). Para além da sua ocorrência como produto de reacção, o C-S-H pode ser encontrado como formação natural sob diversas designações, sendo mais comuns os grupos das tobermorites e wollastonites [208].

Segundo Taylor [208], no campo do C-S-H do tipo tobermorite, existe a possibilidade de formação de duas fases semi-cristalinas, C-S-H tipo I e C-S-H tipo II. O C-S-H tipo I é caracterizado por um rácio Ca/Si <1,5 e apresenta-se sob a forma de favos. O C-S-H tipo II tem um rácio Ca/Si $\geq 1,5$ e a sua morfologia é fibrosa. Dentro do grupo das tobermorites, mas caracterizado como um material praticamente amorfo, o gel C-S-H apresenta um rácio Ca/Si usualmente superior a 1,5 e morfologia variada (plaquetas irregulares, favos, fibras). Outros autores apresentam diferentes terminologias para o C-S-H baseando-se na formação de fases distintas. Nonat [149] sustenta a existência de α C-S-H, β C-S-H e γ C-S-H, com rácios Ca/Si respectivamente entre 0,66 e 1, entre 1 e 1,5 e entre 1,5 e 2. Estas conclusões foram obtidas através de estudos utilizando Ressonância Magnética Nuclear (MNR) para a monitorização da hidratação de Ca_3SiO_5 em soluções com diferentes quantidades de portlandite. Segundo este autor, existe uma correspondência entre o β C-S-H e o C-S-H tipo I, mas tal não acontece entre o γ C-S-H e o C-S-H tipo II.

Apesar da incerteza latente em relação à classificação das várias fases do C-S-H, neste trabalho será adoptada a terminologia proposta por Taylor [29] de C-S-H tipo I e C-S-H tipo II. Neste contexto, os produtos da hidratação do cimento Portland, inicialmente C-S-H tipo I e C-S-H tipo II, têm tendência para estabilizar, com o tempo, sob a forma de C-S-H tipo II, com rácios Ca/Si superiores a 1,5 [29]. Os silicatos de cálcio formados a partir de reacções pozolânicas em condições de temperatura e pressão ambientes foram estudados por vários autores, tendo em conta o material pozolânico a partir do qual são formados (Tab. 3. 1).

Tab. 3. 1 Silicatos de cálcio hidratados formados a partir da reacção de pozolanas com hidróxido de cálcio

Pozolana	Produto formado	Referências bibliográficas
Sílica	C-S-H tipo I variando entre CS_2H_n e $C_3S_2H_n$	114, 200, 257
Pozolana italiana (Bacoli)	C-S-H	115, 208
Pozolana italiana (Segni)	C-S-H	115, 208
Pozolana natural (Terra de Milos)	C-S-H	107
Trass	C-S-H	117
Argila Cozida	C-S-H tipo I variando entre CS_2H_n e $C_3S_2H_n$	114, 257
	C-S-H	78, 136, 177
	$C_3S_2H_n$	114, 200
	C-S-H ₂	222
Metacaulino	$C_3S_2H_n$	114, 200
	C-S-H	66, 115, 136, 173, 177, 208
Cinzas volantes	C-S-H	7, 21
Sílica fumo	C-S-H	19, 146
Cinzas casca arroz	C-S-H tipo I	102, 103
Cinzas cana açúcar	C-S-H	86

Como resultado de todas as reacções pozolânicas, quer de pozolanas naturais, quer de pozolanas artificiais é identificado o composto C-S-H; contudo, apenas raramente é reconhecido o tipo de C-S-H encontrado.

Verifica-se alguma variedade na morfologia observada de C-S-H formado a partir de pozolanas ou sílica, com o hidróxido de cálcio. Embora Taylor [208] especifique a morfologia do C-S-H tipo I como alveolar e a do C-S-H tipo II como fibrosa, existem exemplos de ambas as morfologias no C-S-H produzido pela reacção pozolânica. Em argamassas antigas contendo tijolo moído, foi detectado C-S-H fibroso e alveolar [143], com variados rácios Ca/Si; em misturas de cinzas de casca de arroz com hidróxido de cálcio formaram-se estruturas fibrosas [102]; C-S-H do tipo alveolar pode ser visto através de análise MEV em misturas de hidróxido de cálcio com metacaulino e com sílica de fumo [146]. O C-S-H fibroso é identificado por alguns autores como C-S-H tipo I [69,102].

O C-S-H designado como fibroso apresenta-se usualmente sob a forma de um cristal de forma tubular e oca [102]. A formação deste tipo específico de cristal é explicada pelos autores J. James

e M.Subba Rao [102] da seguinte forma: é formado um gel de C-S-H à volta dos grãos de cálcio, constituindo uma membrana através da qual se dá a difusão de água que conseqüentemente, dissolve parte da sílica e cria pressão osmótica; o aumento dessa pressão vai provocar o rompimento da membrana e a formação tubular do C-S-H.

3.2.2 Aluminatos e silicoaluminatos de cálcio hidratados

Para além dos silicatos de cálcio hidratados, e à semelhança das reacções hidráulicas, são adicionalmente formados compostos designados por aluminatos de cálcio ou silico-aluminatos de cálcio (Tab. 3. 2).

Conforme exposto na Tab. 3. 2, existe uma grande variedade de aluminatos e silico-aluminatos de cálcio hidratados, verificando-se a constatação da formação de C_2ASH_8 (gehlenite hidratada) tanto com pozolanas de origem natural como com pozolanas artificiais. C_4AH_{13} é formado sob a forma hexagonal em pastas de cal e trass e em solução saturada de hidróxido de cálcio com tufo Napolitano [115]; Lea [115], contudo, afirma que este é um produto típico de reacção entre pozolanas naturais em água de cal saturada, o que parece ser secundado por Turriziani [208] que verifica o aparecimento de C_4AH_x em pastas de cal e pozolana natural. Também em pastas de cal e pozolana natural (Segni, Bacoli e Tufo Napolitano) e após 5 anos de cura, Lea [115] diferenciou o composto $C_3A.CaCO_3.H_{12}$, que encontrou igualmente em pastas de cal e pozolanas naturais provenientes do Japão. O mesmo composto foi identificado em misturas de trass com hidróxido de cálcio [117]. Analisando os resultados dos diversos autores, o composto é C_4AH_{13} resultado da reacção de $Ca(OH)_2$ com pozolanas artificiais. Todos os materiais classificados como pozolanas artificiais produzem adicionalmente C_3AH_6 , embora este produto de reacção não seja consensual entre todos os autores no que toca às cinzas volantes, o que se deve à grande variabilidade na sua composição. Apenas um autor [177], das referências consultadas, menciona o aparecimento de C_4AH_{13} em reacções entre metacaulino e hidróxido de cálcio.

Outros compostos, resultantes da presença de sulfatos nas matérias-primas, podem ser identificados como produto destas reacções, caso da etringite ($C_4A.3SO_4.H_{32}$) e do monossulfato de cálcio hidratado ($C_3A.CSO_4.H_{12}$).

Tab. 3. 2 Aluminatos e silico-aluminatos de cálcio hidratados formados a partir da reacção de pozolanas com hidróxido de cálcio

Pozolana	Produto formado	Referências bibliográficas
Pozolana Bacoli (italiana)	C_2ASH_8	115
	$C_3A.Ca CO_3.H_{12}$	115
	$C_4AH_x^1$	208
Pozolana Segni (italiana)	C_2ASH_8	115, 208
	$C_3A.Ca CO_3.H_{12}$	115
	$C_4AH_x^2$	208
Tufo Napolitano	C_2ASH_8	115
	$C_3A.Ca CO_3.H_{12}$	115
	C_4AH_x	208
Trass do Reno	C_2ASH_8	115
	$C_3A.Ca CO_3.H_{12}$	117
	C_4AH_{13}	115, 117
	C_2ASH_2	117
Argila Cozida	C_2ASH_8	136, 222
	C_4AH_x	222
	C_3AH_6	222
Metacaulino	C_4AH_6	177
	C_4AH_{13}	66, 115, 136, 173, 177
	C_2ASH_8	66, 78, 115, 136, 173, 177, 208
	C_2ASH_n	114, 200
	$C_3AH_6^3$	66, 78, 115
Cinzas volantes	C_4AH_{13}	115
	C_3AH_6	21
	C_2ASH_8	115

3.3 Medição da Reactividade Pozolânica

Principalmente devido à aplicabilidade de pozolanas como aditivos em betões, foram desenvolvidos ensaios de avaliação da reactividade pozolânica, que visam estimar a extensão da

¹ Composto formado em solução em suspensão constantemente saturada em hidróxido de cálcio ou através do método de percolação com remoção de alcalis.

² Composto formado em solução em suspensão constantemente saturada em hidróxido de cálcio ou através do método de percolação com remoção de alcalis ou em argamassas a condições de temperatura ambiente.

³ Este composto é produto de reacções a temperaturas superiores a 50°C ou em misturas com défice de $Ca(OH)_2$ [158].

reacção da pozolana com a cal, em presença de água, e conseqüentemente a formação de compostos que confirmam resistência à argamassa. São frequentes ensaios baseados na medição da resistência mecânica de pastas de cal e pozolana e ensaios baseados na medição da reacção química entre a pozolana e o hidróxido de cálcio. Sousa Coutinho [53], citando a publicação “Nouvelles études sur les pouzzolanes artificielles comparées à la pouzzolane d’Italie”, elaborada em 1846 por Vicat, relata que em relação a ensaios químicos e mecânicos, o autor (Vicat) distingue entre “energia” de uma pozolana e capacidade de imprimir coesão a argamassas, estabelecendo como “energia” ‘a capacidade para entrar rapidamente em combinação com a cal por via húmida, o que não implicaria necessariamente uma argamassa mais coesa a longo prazo. Apenas a complementaridade de ensaios poderá permitir uma real caracterização dos mecanismos da reactividade pozolânica.

O ‘Caderno de Encargos para o Fornecimento e Recepção de Pozolanas’ [166], anexo do Regulamento de Betões de Ligantes Hidráulicos (R.B.L.H.), elaborado em 1960, identifica e resume os regulamentos aplicados na altura em outros países (Alemanha (DIN 51043), Espanha, Itália, Rússia (Gast 6296-54) e EUA (ASTM C 402-58T, ASTM C 340-58T e Federal)). Denota-se uma grande variedade nas exigências, tanto ao nível das características próprias das pozolanas (finura, Superfície Específica Blaine, composição química) como ao nível dos ensaios requeridos. Neste campo, tanto são efectuados ensaios com pastas de cal e pozolana, como com argamassas de areia, cal e pozolana (Alemanha e EUA), sendo requeridos ensaios com a agulha de Vicat apenas em 2 regulamentos. Relativamente a ensaios químicos, é pedida a medição da reactividade na legislação russa e ASTM, sendo esta medida através da redução de CaO em solução saturada de CaO em contacto com a pozolana e, para a norma americana, através da redução da alcalinidade de uma solução de NaOH.

Em Portugal, o já referido ‘Caderno de Encargos para o Fornecimento e Recepção de Pozolanas’ [166], anexo do R.B.L.H. regulava o ensaio de pozolanidade e a classificação de pozolanas consoante as suas características físicas e a tensão de rotura por flexão e compressão de pastas de cal e pozolana. Datada de 1993, a norma NP 4220 [96] passou a definir as exigências químicas e físicas das pozolanas, requerendo a satisfação do ensaio de pozolanidade definido pela norma NP EN 196-5, ‘Métodos de ensaio de cimentos. Parte 5: Ensaio de pozolanidade dos cimentos pozolânicos’ [97]. Esta norma destina-se à verificação da pozolanidade dos cimentos pozolânicos, com base na comparação entre a quantidade de hidróxido de cálcio presente após um dado período de tempo numa solução aquosa à qual é adicionado o cimento e a quantidade de hidróxido de cálcio numa solução saturada com a mesma alcalinidade. O índice de actividade das cinzas volantes para betão é definido pela norma NP EN 450 (1995).

Em quase todos os países, onde a utilização de pozolanas naturais é prática corrente desde a antiguidade, existem documentos legislativos que regulam a qualidade dos materiais pozolânicos.

O Regio Decreto del 16/11/1939 [165], italiano, define como condição de aceitação de material pozolânico, uma resistência mínima à flexão e compressão, adoptando também uma classificação, semelhante à portuguesa, mas menos exigente. São também conhecidos documentos normativos de origem cubana [86] e grega [145] e é expectável que outros países tenham elaborado regulamentação nesta área.

Referindo as normas dos EUA, a ASTM C 593-95 [13], relativa a cinzas volantes e outras pozolanas a serem utilizadas com cal, pressupõe exigências físicas, incluindo resistência à compressão mínima de provetes constituídos por cal, pozolana e areia. As normas ASTM C 311-04 [12], ASTM C 618-01 [14] referem-se à utilização de cinzas volantes e pozolanas naturais para utilização em betão. A ASTM C 618-01 [14] engloba também as pozolanas naturais calcinadas. Estas normas preconizam ensaios de 'índice de reactividade' (strength activity index) entre pozolanas e cimento como parte integrante da caracterização dos materiais pozolânicos.

3.3.1 Ensaios mecânicos

A utilização de ensaios mecânicos para avaliar a reactividade de pozolanas baseia-se no pressuposto de que os produtos formados a partir da reacção pozolânica provocam um aumento de resistência mecânica de pastas de cal e pozolana. Desta forma, é possível identificar um dado material pozolânico ao nível da sua capacidade de reacção com a cal, através da comparação de resistências mecânicas de provetes normalizados. É conhecida a sua utilização por Vicat [240] que empregava os termos 'muito enérgica', 'enérgica', 'fracamente enérgica' e 'inerte', tendo em conta a dureza que atingiam pastas de cal e pozolana comparativamente a outros produtos (tijolo, pedra branda e sabão). Também Feret [53] utilizou uma metodologia baseada em ensaios mecânicos, inserida num conjunto de ensaios alargado para caracterização de pozolanas. Os seus ensaios eram efectuados sobre pastas de cal e pozolana com traço 1:4 (em peso), utilizando cal com características definidas e uma consistência da pasta também definida.

Actualmente, estes ensaios, regidos por normalização diferente, consoante o país, apresentam algumas variações e alguns (os mais utilizados em Portugal) serão descritos pormenorizadamente em capítulo próprio. De uma forma geral, existe uma diferenciação no que respeita à execução de provetes (composição, traço, execução), diferindo igualmente o condicionamento. Os ensaios são usualmente efectuados aos 7 e 28 dias de idade.

3.3.2 Ensaios químicos

Já em 1837, Vicat efectuava ensaios com vista à medição da reactividade pozolânica, com recurso a métodos químicos, utilizando pozolana passada (dimensão inferior a 88 μ m) em solução saturada

de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, sujeita a agitação, após a qual era efectuada a determinação do teor de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, em tempos definidos [53]. O Teste Chapelle [109, 112] preconiza a colocação de 1g de pozolana e 1g de hidróxido de cálcio em 100ml de água a ferver durante 16h, medindo-se o $\text{Ca}(\text{OH})_2$ livre após esse período utilizando extracção por sucrose e titulação com uma solução de HCl. Outros métodos foram experimentados, como a determinação da quantidade de CaO numa solução, após aquecimento ou por análise térmica diferencial [53]. Todos estes métodos se baseiam na combinação da sílica e alumina das pozolanas com o $\text{Ca}(\text{OH})_2$, sendo efectuada a medição desta combinação ao longo do tempo.

A determinação da sílica e alumina solúveis em ácido, em base ou em ambos foi igualmente experimentada [53, 78, 222], baseando-se no pressuposto de que estes componentes das pozolanas, solúveis em dado meio, são os responsáveis pela reacção pozolânica.

A metodologia de medição da reactividade pozolânica de materiais utilizando o fenómeno da condutividade [115, 125, 131, 133, 241] baseia-se na capacidade de reacção de cada material, fixando iões dispersos em solução e criando uma diminuição da condutividade. Pilar de Luxán propôs um método rápido para avaliação da reactividade de pozolanas naturais através da medição da condutividade numa solução saturada em hidróxido de cálcio [125], de forma semelhante a Lea [115].

3.4 Factores que Afectam a Reacção Pozolânica

3.4.1 Tipo de pozolana (composição)

Estudos de acompanhamento das reacções entre a cal e pozolanas artificiais e naturais concluem que há diferenciação na cinética de reacção, dado que os produtos de reacção são formados a tempos diferentes e com velocidades também diferentes [136]. Através da utilização das técnicas de MEV e Análise Térmica, os autores [46] verificaram o aparecimento de diferentes cristais em argamassas de cal e pozolana dependendo da pozolana utilizada. F. Massaza e U. Costa [37], após trabalhos experimentais com diferentes pozolanas, concluíram que embora não exista uma correlação directa entre a combinação de pozolana com cal e o endurecimento das argamassas, esta correlação é válida para cada pozolana diferente. Este factor prende-se essencialmente com a composição química dos materiais, sendo condição essencial para o sucesso da reacção pozolânica a quantidade de aluminatos e silicatos activos, isto é a quantidade de SiO_2 e Al_2O_3 em estado amorfo, capazes de reagir com o $\text{Ca}(\text{OH})_2$ em presença da água [129].

No caso das pozolanas naturais, a reactividade da pozolana depende também do magma a partir do qual é formada. Segundo Sousa Coutinho [53], as pozolanas originadas a partir de magmas ácidos são mais reactivas do que as pozolanas originadas a partir de magmas básicos. A origem desta diferença está na fluidez da lava pois, enquanto os magmas básicos são muito fluidos, permitindo a cristalização dos seus componentes durante o processo de arrefecimento, os magmas ácidos são viscosos, potenciando a formação de materiais amorfos através da explosão dos gases que contêm. Opinião contrária é expressa por Turriziani [208] que explica que a existência de cationes alcalinos afectam as estruturas Si-O e Al-O, criando estruturas abertas e mais reactivas.

Posteriormente, os processos de influência das condições atmosféricas sobre estes materiais contribuem para as suas propriedades.

Contudo, segundo Lea [115], experiências efectuadas com trass de diferentes origens e diferentes quantidades de sílica vítrea, em que se verifica o fenómeno no qual o material contendo menor percentagem de sílica reage com maior quantidade de cal, indicando que outros factores para além da composição têm um papel relevante na reactividade pozolânica dos materiais.

3.4.2 Superfície Específica

Também é sabido que factores como a finura do material e, conseqüentemente, a sua superfície específica [53, 129, 209] influem na sua reactividade; uma maior superfície específica implica obrigatoriamente uma maior área de reacção, influenciando assim no aumento da reactividade. Ensaio efectuados por Lea [115], utilizando pozolanas com diferente superfície específica e medindo a sua reactividade através da fixação de Ca(OH)_2 durante 180 dias, demonstram que, numa fase inicial, correspondendo a 28 dias de reacção, existe uma correlação entre a superfície específica e a reactividade do material; para as 6 pozolanas diferentes utilizadas neste ensaio, uma maior superfície específica implicou uma maior reactividade inicial (até aos 28 dias). Este facto pode ser explicado pelo motivo da reacção se dar inicialmente na superfície dos grãos de pozolana, enquanto que a reacção em continuidade depende principalmente da quantidade de matéria vítrea presente.

3.4.3 Temperatura de cozedura/formação

No caso de pozolanas artificiais, a temperatura de cozedura/formação é um factor fundamental para garantir a reactividade do produto [53, 115, 209, 234], questão que se encontra interligada com a quantidade de sílica amorfa presente no material.

No caso dos materiais argilosos, a temperatura adequada variará com o tipo de argila utilizada, dependendo da sua composição (ilítica, esmectítica, caulínica), podendo ser aferida com recurso a análises térmicas (termogravimétricas, termodilatométricas e análises térmicas diferenciais). De uma forma geral, para este tipo de materiais (exceptuando a caulinite, principal componente do caulino), poderá dizer-se que a temperatura se deverá situar abaixo dos 950°C, temperatura de formação de novas estruturas cristalinas em alguns tipos de argilas, mas suficientemente alta para permitir que se inicie a formação da fase amorfa da sílica [52, 78, 182, 209, 234], situando-se o intervalo óptimo de temperaturas entre os 700°C e os 900°C. Sousa Coutinho [53] descreve os mecanismos decorrentes do aquecimento dos vários minerais argilosos, identificando as fases de perda de água, destruição da rede cristalina e formação de novos compostos cristalinos. Através do recurso a análise térmica diferencial, estas mudanças encontram-se expressas na Fig. 3. 3 [106], onde o primeiro pico endotérmico (por volta dos 100°C) representa a desidroxilação dos minerais argilosos, o segundo pico endotérmico corresponde a saída da água combinada quimicamente e o pico exotérmico corresponde à cristalização dos minerais mulite ou enstatite (no caso da sepiolite e argilas magnesianas). Contudo, apesar da temperatura ideal para potenciar a reactividade pozolânica se basear no pressuposto de aquecimento até obtenção de uma estrutura desordenada e reactiva, esta reactividade varia com o tempo conforme observado por Sousa Coutinho [53], cujos ensaios com argila cozida, com cozeduras a baixas temperaturas produziram reactividades mais elevadas (medidas pelo método de rotura à compressão) nas idades mais baixas, enquanto para idades de 1 ano, pastas cozidas a temperaturas mais altas, até 1000°C produziram os melhores resultados.

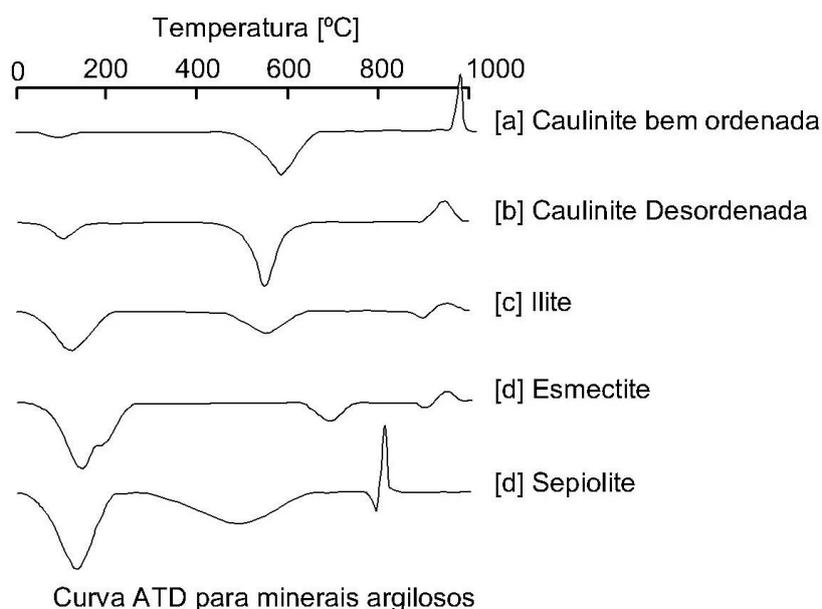


Fig. 3. 3 Análise térmica diferencial de minerais argilosos, conforme [42]

Vários estudos foram efectuados no sentido de verificar a reactividade de caulinos tratados a diferentes temperaturas [17, 53, 93, 105, 136, 173, 177, 193], concluindo que a temperatura de cozedura indicada para fomentar a reacção pozolânica se situará entre os 700°C e os 800°C, implicando a desidroxilação da caulinite e o início da decomposição da alunite (caso exista), sendo anterior à temperatura (900°C) de formação de compostos cristalinos sob a forma de mulite [105]. Contudo, esta temperatura dependerá da composição mineralógica da matéria-prima, sendo analogamente inequívoco que uma estrutura mais ordenada de caulino produzirá um metacaulino menos reactivo [105]. O tempo de cozedura influencia igualmente a reactividade do produto final [22, 98, 193], assim como a forma de arrefecimento [193].

A formação de pozolanas artificiais como a sílica de fumo, as cinzas volantes e as cinzas produzidas através da queima de matéria orgânica, entre outras, relaciona-se também com as temperaturas que estes materiais atingem (2000°C no caso da sílica de fumo, 670°C para cinzas de palha de trigo [22]) e seu posterior arrefecimento, gerando produtos ricos em sílica reactiva [115]. Estudos de cinzas de casca de arroz utilizando as técnicas MEV, MET e DRX apontam para o início de formação de estruturas cristalinas a 600°C [201], aspecto confirmado por José James e Suba Rao [102] que verificam a diminuição da reactividade do produto entre os 500°C e os 600°C. Contudo, estudos efectuados em Portugal [178] indicam 650°C como temperatura mais adequada de cozedura de forma a maximizar a quantidade de sílica amorfa.

Reportando às pozolanas naturais, de origem vulcânica, é possível afirmar que um baixo grau de cristalinidade é conseguido através de aquecimento seguido de arrefecimento rápido de um material, fenómeno que ocorre nas erupções vulcânicas, com o arrefecimento repentino dos materiais expelidos pelo vulcão. A rápida velocidade de arrefecimento revela-se fundamental pois não permite que se dê o re-arranjo cristalino, mantendo-se o produto com uma estrutura amorfa ou cripto-cristalina que favorece a reactividade.

3.4.4 Relação Cal/Pozolana

A questão relacionada com a quantidade de hidróxido de cálcio e de sílica reactiva que reagem para formar C-S-H produzido pela reacção pozolânica é abordada por alguns autores, verificando-se não estar estabelecido um consenso sobre a questão. Sousa Coutinho [53] afirma que a razão cal/pezolana deve variar consoante o tipo de pozolana utilizada, devido à diferente reactividade de cada material pozolânico com a cal. Ensaio relatados por Lea [115], envolveram a utilização de diversas pozolanas, com diferentes razões cal/pezolana (10/90; 25/75; 40/60), de forma a verificar a fixação de Ca(OH)_2 através do tempo (91 dias); relativamente a todas as pozolanas utilizadas, verificou-se que a existência na mistura de uma quantidade superior de cal implica uma reacção mais rápida e maior de Ca(OH)_2 , sendo esta diferença especialmente notória para a composição

com rácio C/S de 40/60 (0.67). Contudo, estudos mais recentes dão como relação ideal cal/pozolana cerca de 45% de cal em peso sobre a quantidade de cal e pozolana, baseando-se na reacção entre o hidróxido de cálcio e as cinzas volantes e tendo em conta as reacções e os produtos de reacção [83, 84]. Uma relação de apenas 20% de cal é avançada por Cajun Shi [189] que se baseia em testes de compressão em argamassas de cal e de uma pozolana natural. Neste contexto, J.James e M. Subba Rao [102] estudaram a extensão da reacção utilizando cinzas de casca de arroz como pozolana e concluindo que a extensão da reacção entre o Ca(OH)_2 e a sílica reactiva depende do rácio C/S inicial que deverá ser inferior a 0.65.

Dada esta diversidade, parece contudo evidente que a relação entre cal e pozolana se deverá fundamentar na quantidade de sílica e alumina (e eventualmente ferro) reactivas presentes nos materiais pozolânicos e nas reacções que ocorrem em condições de pressão e temperatura ambientes. Devido às diferenças de composição e de conteúdo de sílica e alumina reactiva de cada material pozolânico, os rácios C/S deverão ser diferentes para cada pozolana.

3.4.5 Quantidade de água

Segundo Sousa Coutinho [53], a água a utilizar em pastas de cal e pozolana deverá ser de 32% do peso em cal e pozolana, o que corresponde à água de hidratação de silicatos e aluminatos anidros. Lea [115] afirma que quanto maior for o conteúdo de água da mistura, mais rápida é a reacção, comparando reacções em meio aquoso com reacções em pastas. O autor verificou a ocorrência deste fenómeno transversalmente às pozolanas naturais e artificiais testadas.

3.4.6 Condicionamento (temperatura/humidade)

A forma como a temperatura de condicionamento pode influenciar a reacção pozolânica encontra-se exemplificada num conjunto de ensaios descritos por Lea [115] onde são utilizadas diversas pozolanas, sendo monitorizada a sua reacção com a cal a diferentes temperaturas. Analisando os resultados destes ensaios, é possível verificar um ligeiro aumento da reacção pozolânica como aumento de temperatura (de 20°C até 60°C). Analogamente, a utilização de duas gamas de temperaturas (20°C e 60°C) para cura de pastas de cal e metacaulino evidenciou uma reactividade superior para o caso da temperatura mais elevada, com uma taxa de combinação de hidróxido de cálcio muito superior [131, 158, 159], sendo possível a criação de mais um produto de reacção (C_3ASH_6) face aos produtos obtidos a temperatura ambiente [172, 173]. Também Sousa Coutinho [53] efectuou ensaios de pastas de cal com diversas pozolanas conservadas em água a temperaturas que oscilam entre 10°C e 24°C, observando-se um acréscimo de resistência aos 7 e 28 dias das pastas, com um acréscimo de temperatura. Contudo, para pastas de cal e cinzas

volantes, Jalali [101] verificou uma diminuição de resistência final com o aumento de temperatura de cura.

Relativamente à humidade, Sousa Coutinho [53] denota uma queda acentuada da resistência mecânica de argamassas de cal e pozolana condicionadas ao ar livre, atribuindo este facto à elevada contracção inicial das pastas, a qual provocaria a rotura das ligações entretanto formadas, e também à saída de água, que originaria modificações nos produtos de reacção. A corroborar estas hipóteses, ensaios efectuados com pastas de cal e pozolana (1:3) em diversos estados higrométricos, apresentam contracção desprezível a 100% H.R. e alteração significativa deste parâmetro, que atinge valores elevados a 55% H.R. Na sequência deste ensaio, foi adicionalmente medida a quantidade de água retida após um ano em pastas de cal e pozolana com traço 1:3, mantidas a diversas humidades relativas, verificando-se um acréscimo de água em pastas a 99% H.R. e um decréscimo muito acentuado em pastas a 75% H.R. ou 55% H.R. (ainda mais significativo). Tendo em conta estes ensaios, pode-se concluir que as pastas contendo pozolanas devem ser mantidas a cerca de 100% H.R.

3.4.7 Compactação

Jalali [101] afirma que uma adequada compactação de pastas de cal e pozolana produz diferenças significativas no desempenho do material. Foram verificados aumentos entre 50% e 160% na resistência à compressão de pastas de cal e cinzas volantes devido a melhorias de compactação [130].

3.5 Activação da reacção pozolânica

Entende-se por activação da reacção pozolânica a introdução de factores que promovam esta reacção. A actuação pode ser efectuada sobre o próprio produto pozolânico através de aquecimento ou sobre a própria reacção, introduzindo produtos denominados 'activadores' [53, 74, 78, 79, 105, 115, 117, 161, 190, 208, 244].

Experiências efectuadas por Vicat em 1818 [240] indicam que a adição de soda caustica a argila ou xisto e a posterior calcinação da mistura melhoravam a resistência das argamassas feitas com este material e cal, face à utilização simples dos produtos pozolânicos (argila ou xisto calcinados) nas mesmas argamassas. Segundo Sousa Coutinho [53] a adição de alcalis a pastas de cal e pozolana implica a substituição de certa parte da cal pelos alcalis, hipótese confirmada pela adição de NaCl e NaOH a soluções de cálcio e silício, com resultante diminuição do rácio Ca/Si do C-S-H formado. Também, segundo Lea [115] e Turriziani [208] a adição de gesso a misturas de cal e pozolana, com excesso de água, favorece a reacção pozolânica e este último autor menciona a adição de CaCl_2 a pozolanas Romanas. Cajun Shi [190] utiliza Na_2SO_4 e $\text{CaCl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ como

activadores, proporcionando resultados bastante positivos de aumento de resistência de pastas de cal e pozolana, devido ao consumo mais rápido (por reacção) de Ca(OH)_2 . Segundo estes autores, a adição de Na_2SO_4 promove a seguinte reacção:



A existência de CaSO_4 e NaOH implicam um aumento de alcalinidade, factor que promove a dissolução das pozolanas. Por outro lado, o Na_2SO_4 fomenta a formação de sulfoaluminatos de cálcio hidratados (etringite e eventualmente, monossulfato), que densificam a estrutura existente [191]. Embora a adição de CaCl_2 implique uma diminuição do pH existente, gera a formação de compostos em solução sólida sob a forma $\text{C}_3\text{A} \cdot \text{Ca(OH)}_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O} - \text{C}_3\text{A} \cdot \text{CaCl}_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$, que precipitam longe da pozolana, não interferindo com a continuidade do seu processo de reacção. Estes compostos, à semelhança dos sulfoaluminatos de cálcio hidratados, aumentam o volume sólido e conseqüentemente, a resistência do material assim constituído [191]. Estes resultados encontram-se em concordância com os anteriormente publicados por Turriziani [208], que alerta para a quantidade de gesso a adicionar para que a formação de etringite não cause danos às argamassas.

O fenómeno de reactividade pozolânica pode ser potenciado através da reactivação térmica ou química dos materiais pozolânicos, existindo vários trabalhos que abordam essa questão. A cozedura de pozolanas a temperaturas adequadas especificamente a cada tipo de pozolana, após conhecimento da sua mineralogia e estudo do seu comportamento térmico, aumentará a sua reactividade pozolânica. Este fenómeno ocorre devido à perda de água adsorvida, zeolítica e de hidratação e à destruição das estruturas cristalinas. O aquecimento a temperaturas excessivas poderá criar novas estruturas cristalinas, diminuindo novamente a reactividade. Segundo Lea [115] a temperatura de activação mais comum para pozolanas naturais é por volta de 700-800°C. Para a phillipsite, presente no trass e em outras pozolanas naturais, a temperatura de activação mais adequada é a de 500°C [117].

3.6 Evolução da Reacção Pozolânica

Vicat [240] afirmava que 'o progresso de cimentos feitos com cal gorda e pozolanas energéticas ou muito energéticas continua sensível durante o terceiro ano após imersão'. Segundo Caijun Shi [190] a reacção pozolânica tem um desenvolvimento lento; resultados dos seus trabalhos mostram

resistências à compressão de provetes de cal e pozolana que aumentam mais de 100% entre as idades de 28 dias e de 1 ano.

Os gráficos seguintes representam resultados obtidos por Sousa Coutinho [53] com pastas de cal e pozolanas naturais e artificiais mantidas nos moldes até aos 7 dias e em água após esse período. Verifica-se uma certa variabilidade de comportamento, mesmo dentro do mesmo material com diferentes locais de extracção [Fig. 3. 4, Fig. 3. 5] A variação da resistência ao longo do tempo aponta, em todos os casos, para um aumento de resistência mecânica em idades de 1 ou 3 anos face à resistência inicial medida aos 7 dias. Contudo, o amento não é linear nem gradual, sofrendo por vezes, tanto as pozolanas artificiais como as naturais, de diminuições de resistência a certas idades. O comportamento das cinzas volantes difere substancialmente do comportamento das pozolanas naturais e das restantes pozolanas artificiais. O relato efectuado por Lea [115] de ensaios com estes materiais revela uma reacção inicial das cinzas volantes com a cal mais lenta do que a reacção inicial das pozolanas naturais (até aos 28 dias). Ao fim de algum tempo (90 dias), as misturas de cinzas volantes e cal consomem quantidades semelhantes de hidróxido de cálcio às misturas de pozolana natural e cal.

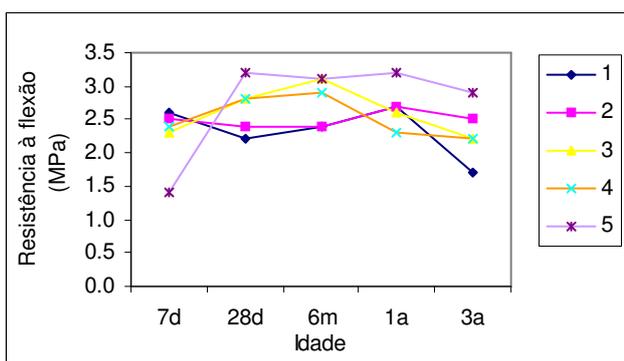


Fig. 3. 4 Resistência à flexão Pozolana Cabo Verde [53]

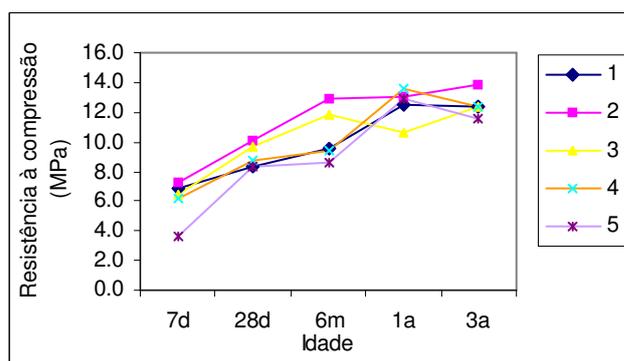


Fig. 3. 5 Resistência à compressão Pozolana Cabo Verde [53]

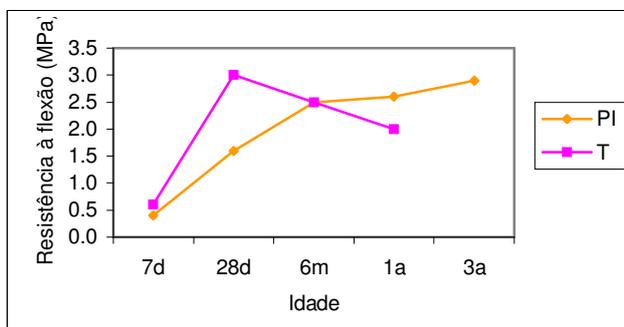


Fig. 3. 6 Resistência à flexão de Pozolana Naturais (Italianas (PI) e Trass(T)) [53]

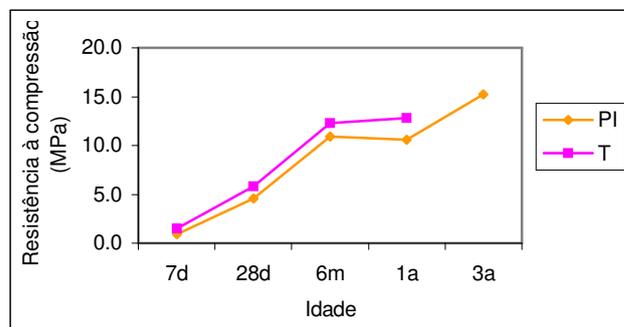


Fig. 3. 7 Resistência à compressão Pozolanas Naturais (Italianas (PI) e Trass (T)) [53]

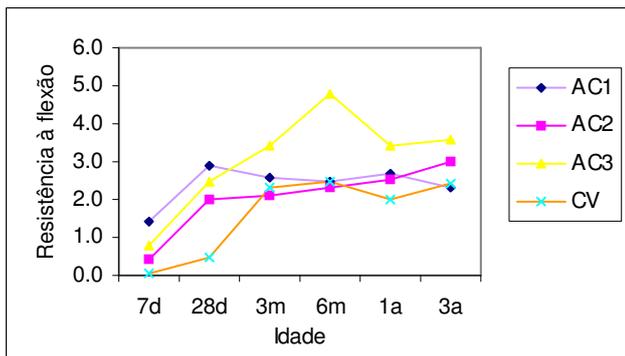


Fig. 3. 8 Resistência à flexão de pozolanas artificiais (Argila Cozida (AC) e Cinzas Volantes (CV)) [53]

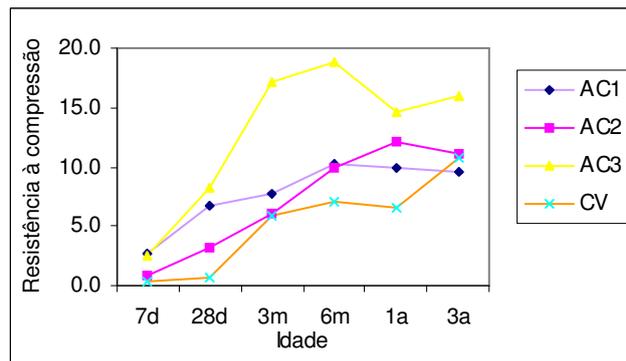


Fig. 3. 9 Resistência à compressão de pozolanas artificiais (Argila Cozida (AC) e Cinzas Volantes (CV)) [53]

3.7 Vestígios da Reacção Pozolânica em Argamassas Antigas

Diversos estudos abordam a análise de argamassas antigas, tanto ao nível dos processos de análise, como relativamente à determinação da composição das argamassas. A conjugação de técnicas de análise química, térmica, de difracção de raios X (DRX), observação ao microscópio electrónico de varrimento (MEV) ou de transmissão (MET), entre outras, é necessária de forma a efectuar uma caracterização completa das argamassas (traço, materiais utilizados na sua composição, produtos de reacção entre materiais). Ao nível das argamassas pozolânicas, podem ser vários os produtos formados ao longo do tempo, dada a diversidade de constituição das pozolanas e a reacção com os restantes compostos integrantes da argamassas e com o meio exterior. A análise de argamassas antigas contendo pozolanas, providencia informação sobre os produtos formados, sendo para tal usualmente utilizadas técnicas de análise térmica (ATG/ATD), difracção (DRX) ou ópticas (microscópio óptico, MEV, MET).

Ellis [61] relaciona o resultado de ATD com os compostos presentes nas argamassas, permitindo a sua classificação dentro de grupos pré-definidos pelo autor (incluindo argamassas contendo compostos potencialmente provenientes de reacções pozolânicas). As análises térmicas (ATG) são também utilizadas por outros autores [94, 127, 197], atribuindo as perdas de massa entre os 200°C e os 600°C a silicatos, aluminatos ou silicoaluminatos de cálcio, compostos desta forma identificados em argamassas. A relação entre esta perda de peso e a perda relativa à descarbonatação do carbonato de cálcio permite identificar as argamassas como aéreas, pozolânicas, hidráulicas ou com adição de pó de tijolo.

Santos Silva [181] detecta a presença de geis de silicato de cálcio hidratado, através da observação da micro-estrutura, em argamassas provenientes do Aqueduto das Águas Livres e no Forte do Bugio; em outras argamassas, dos Fortes de S. Julião da Barra e de S. Bruno e das ruínas romanas de Tróia (Opus Signinum), foi detectada a presença de material pozolânico através de uma metodologia de análise química e térmica, complementada com visualização no MEV. Com recurso a DRX, ATD e MEV, M.P. Luxán identifica C-S-H classificando-o como C_2SH em argamassas do século XVI existentes em Santo Domingo, República Dominicana. Também Elena Charola e Fernando Henriques [45], relativamente à análise de argamassas antigas mencionam a presença de gehlenite hidratada e silicoaluminato de cálcio hidratado nas argamassas do Coliseu de Roma, de diopsido, analcime, leucite e material vítreo (que poderão ser provenientes da pozolana e não da reacção pozolânica) na Tor di Nona, assim como a existência de aluminossilicatos de cálcio na Capela Sistina. Os mesmos autores afirmam que a visualização em MEV de uma argamassa de cal e pó de tijolo proveniente de um banho Romano de 70DC, na Alemanha (Badenweiler), permitiu a detecção de minerais fibrosos, semelhantes ao C-S-H. Em argamassas antigas provenientes da Grécia e Turquia, incorporando pozolanas, foi igualmente observada a presença da fase C-S-H utilizando Microscopia Electrónica de Transmissão (MET) [143]. Tendo igualmente como base a análise de argamassas contendo cerâmico moído, Moropoulou [142] detecta a formação de gel C-S-H entre as fases cristalinas da calcite e os fragmentos cerâmicos e quartzo; esta fase é detectada através de EDX, concluindo-se que os elementos Al e Si aumentam da pasta para o tijolo, acompanhados por um decréscimo do elemento Ca. Utilizando DRX em argamassas do período Veneziano em Creta (cerca do ano 1450), por vezes com alterações efectuadas mais tarde detectam o composto C-S-H em grande parte das amostras [127].

Embora não seja derivado de uma reacção pozolânica, o C-S-H presente em betão fabricado com cimento foi encontrado abundantemente em betão com 136 anos de idade [164] utilizado no fabrico de um muro de uma habitação. Este facto é indicativo da durabilidade do C-S-H. Contudo, a presença deste composto (C-S-H) em argamassas com pozolanas, segundo Elisabeth Goms [70], é posta em causa pela afirmação da autora de que no processo de carbonatação, o CO_2 converte o gel em carbonato de cálcio e sílica e a lavagem do gel C-S-H retira o cálcio até cerca de metade da quantidade original.

4 Breve Historial da Composição de Argamassas

Os registos de diversos autores, que conhecemos nos nossos dias, fornecem a base para o conhecimento dos materiais e das técnicas construtivas desde a antiguidade à actualidade.

Reportando à Época Romana, são mais conhecidos os registos de Marcus Vitruvius Pollio [108, 174, 217, 218], compilados no seu tratado sobre arquitectura, frequentemente designado por ‘Dez Livros sobre a Arquitectura’. Este tratado, difundido em Itália durante a Época do Renascimento, devido ao reavivar do interesse pelas culturas clássicas e consequentemente, pelos conceitos arquitectónicos subjacentes, sofreu várias interpretações e traduções [20]. É contudo, o documento que retrata de forma mais vasta a construção na Época Romana, englobando os materiais utilizados e as técnicas construtivas. O facto do autor ter nascido no ano 84 A.C. fornece a limitação temporal da sua obra, anterior ao apogeu do Império Romano.

Autores Renascentistas, como Alberti (1404-1472) e Palladio (1508-1580) [20, 250], mencionando apenas dois dos autores mais relevantes entre vários, retomam a execução de tratados de arquitectura tendo como referência a obra de Vitruvius. Durante o Século XIX, vários autores, como Vicat e Smeaton, dedicaram-se ao estudo de ligantes hidráulicos [147, 240, 247], tanto ao nível de argamassas de cal com aditivos pozolânicos como em relação ao desenvolvimento de argamassas hidráulicas, devido ao interesse despertado por este tipo de material. Na mesma época, outros, entre os quais Rondelet [257] escreveram tratados sobre a construção praticada na altura, descrevendo materiais e processos construtivos. Em Portugal, durante o Século XIX e início do Século XX, são analogamente publicados manuais referentes à arte de bem construir, onde figura a cal em lugar de destaque entre os materiais e onde é focada a execução de rebocos [116, 185, 186]. Em 1906, Castanheira das Neves [31] publica um extenso estudo sobre pozolanas nacionais, mencionando a sua aplicação em diversas obras da altura. Mais tarde, em meados do século XX, Sousa Coutinho [53] aprofunda o estudo sobre estes materiais, incluindo pozolanas de diversas proveniências, com o intuito de aplicação em betões. Durante o século XX, com a adopção do betão e argamassas cimentícias por toda a América do Norte e Europa, os estudos centraram-se no cimento Portland [59] e na sua utilização como material estrutural. No final do século, com um ressurgimento do interesse pelo património histórico e pela sua preservação, iniciam-se estudos sobre a composição de argamassas antigas, de forma a possibilitar uma adequada intervenção no Património; destas publicações emerge o conhecimento sobre materiais e técnicas empregues através das épocas.

4.1 Materiais

Tendo como base as argamassas de revestimento, incidir-se-á sobre os materiais utilizados na sua composição. Materiais de obtenção imediata, como a terra e lama, foram primordialmente utilizados na construção, funcionando também como revestimento de paramentos, com a ajuda de fibras vegetais. Esta prática manteve-se ao longo dos tempos, devido à facilidade de obtenção das matérias-primas e ainda hoje subsiste em diversas partes do globo. O gesso parece igualmente ter sido dos primeiros produtos a ser utilizado como ligante [137]. Argamassas de asfalto foram usadas desde 3000 A.C. [137] e a utilização de cal resultante de processos de calcinação é conhecida desde 4000 A.C. [28], embora existam registos de calcinação e utilização de rebocos e pavimentos com cal desde o neolítico [246, 254]. De forma a alterar as propriedades das argamassas foram utilizados diversos aditivos ao longo do tempo: pozolanas naturais e artificiais, adições orgânicas como óleos, leite, resina, sal e açúcar [88], citando apenas alguns entre uma variabilidade imensa deste tipo de aditivos, e também fibras animais ou vegetais. O ligante era cozido em fornos tradicionais, correspondendo hoje em dia à cal aérea ou um pouco hidráulica, dependendo da matéria-prima então utilizada. É patente o interesse pelas pozolanas e sua aplicação durante o Século XIX, evidenciada pela representação das pozolanas dos Açores na Exposição Universal de Londres, em 1862 [35]. Contudo, Castanheira das Neves [35] afirma que estes materiais despertaram maior interesse no Século XVIII e até meados do Século XIX, tendo então a sua utilização entrado em declínio. Um facto incontornável na história das argamassas é a composição desenvolvida por John Smeaton em 1756, para o farol de Eddystone, através da calcinação de pedra calcária contendo argila, produzindo uma cal hidráulica à qual adicionou pozolana italiana para obter melhor desempenho [256]. Finalmente, a produção de cimento Portland em 1824, por Joseph Aspdin e o seu posterior desenvolvimento em 1845 por Isaac Johnson [147], empregando temperaturas de cozedura mais elevadas, iniciaram uma era de forte utilização deste material como ligante, relegando para segundo plano os ligantes tradicionais.

4.1.1 Cal aérea

A cal aérea foi um ligante utilizado desde tempos ancestrais, e com continuado uso até ao tempo actual, o seu fabrico e a sua incorporação em argamassas é relatada amiúde; as primeiras alusões conhecidas a este material datam da Época Romana. Com uma utilização verdadeiramente abrangente, ultrapassando o domínio da construção, este material foi empregue em obras espalhadas pelo mundo em construções tão emblemáticas como [28, 246, 254]:

- Conurbação urbana de Çatal Hoyuk, Turquia (rebocos e pavimentos), 7400 A.C.
- Pirâmide de Gizé, no Egipto (reboco) em 2500 A.C.
- Palácio Ruossos em Creta (2 camadas com fibras animais) em 1500 A.C.

- Templos Gregos a Apolo e Elis em 450 A.C.
- Muralha da China

4.1.1.1 Matéria prima

Materiais e traços utilizados na composição de argamassas são descritos na obra de Vitruvius [174, 252, 253, 254]. No Capítulo V do Livro II é mencionado o fabrico da cal a partir de pedra branca ou sílex, indicando também que pedras de textura mais fina e mais duras são melhores para construção de paredes, enquanto pedras mais porosas são mais indicadas como matéria-prima para argamassas. Na obra de Palladio [20, 250] surgem referências a vários tipos de pedra, incluindo um tipo de pedra rugosa retirada dos montes de Pádua especialmente dotada para fabrico de cal a colocar em construções muito expostas ao clima ou debaixo de água. Alberti [4] menciona, para além da cal fabricada a partir da pedra calcária, a produção deste material a partir de conchas, em França. Este mesmo autor disserta sobre a qualidade da pedra a utilizar para a produção da cal, realçando a importância de uma pedra branca (calcária) e não terrosa. Tanto Vicat [240] como Rondelet [251] focam a qualidade da pedra a utilizar para o fabrico da cal, ao nível de aspecto (compacidade, grão) [251] e ao nível de composição (conteúdo ferro, magnésio, sílica, alumina, entre outros) [240, 251]. Segundo Vicat, diferentes tipos de rocha, darão origem a diferentes tipos de cal. Actualmente é conhecida a composição mineralógica dos diversos tipos de pedra calcária, que pode conter diferentes quantidades de calcite, aragonite, dolomite e magnesite e é determinante a quantificação de material argiloso presente na matéria-prima.

4.1.1.2 Processo de cozedura

Embora a cozedura da pedra calcária para a sua transformação em cal viva tenha sofrido diversas alterações ao longo do tempo, principalmente com a sua industrialização, é inegável que o processo de cozedura artesanal subsistiu ao longo dos tempos e é ainda hoje praticado, de forma diversa, em distintas partes do globo.

Os autores Vicat e Rondelet [240, 251] relacionam a calcinação da pedra calcária com a sua decomposição e consequente libertação de um gás, designado então como ácido carbónico. Ambos consideram que o tempo de cozedura deve ser variável dependendo de:

- qualidade da pedra [251]
- combustível utilizado [240, 251]
- tipo de forno [251]
- direcção do vento [240, 251]

Publicações portuguesas [208, 223] datadas dos Séculos XIX e XX revelam-se bastante precisas, descrevendo fornos, processos e temperatura de cozedura (800/1000°C); de forma análoga aos restantes autores, refere a dependência do tempo de cozedura de vários factores.

Durante o século XX, com a industrialização do processo de produção, são abordados temas como a velocidade de aquecimento e, dado que o comportamento dos minerais que compõe a matéria-prima se encontra intrinsecamente ligado com o processo de cozedura, as temperaturas utilizadas relacionam-se directamente com as reacções em curso [28].

4.1.1.3 Processo de extinção

Do processo de extinção, resultará cal em pasta ou cal em pó ou, por vezes, uma mistura de cal e areia. Alberti [4] aborda processo de extinção, mencionando a utilização abundante de água, após o qual a cal deve ser deixada húmida em local sombrio e coberta de areia durante um longo tempo antes de ser utilizada. Palladio [250] acrescenta a observação de que a água deve ser adicionada aos poucos, ficando contudo pouco claro se este autor se refere à produção de cal em pasta ou cal em pó. Vicat [7] menciona três processos de extinção da cal:

- Extinção ordinária – imersão da cal viva em água criando cal em pasta
- Imersão – colocação da cal em água por alguns segundos, após os quais é retirada, criando cal em pó
- Acção atmosférica – resulta da acção da atmosfera sobre a cal viva deixada ao ar livre, produzindo cal em pó

Rondelet [251] menciona adicionalmente um outro tipo de extinção caracterizado pela colocação de uma camada de areia sobre a cal viva antes da adição de água. Nas publicações portuguesas consultadas [116, 185] são referidos quatro processos de extinção da cal, acrescentando o método de aspersão com água aos previamente definidos por Vicat. Actualmente, para além de existirem os métodos tradicionais de extinção, co-existe a produção industrializada de cal em pasta e em pó [28], sendo usual a comercialização em Portugal de cal em pó ensacada.

4.1.1.4 Classificação das cais

Desde que se iniciou o fabrico da cal, pedras com diversos teores de impurezas foram com certeza utilizadas para o seu fabrico, dependendo de recursos locais. Este factor, aliado ao deficiente controlo de temperatura e gradiente térmico existente em cada cozedura, faz crer que as cais com diversos níveis de hidraulicidade foram sendo acidentalmente fabricadas ao longo do

tempo. Contudo, na sua obra, Vitruvius [108, 116, 218] parece conhecer apenas as propriedades da cal aérea, pois prevê a adição de elementos pozzolânicos a argamassas sujeitas à humidade ou à acção da água. Mais tarde, Palládio [250] menciona um tipo de cal, que por si só endurece debaixo de água, distinguindo-a das restantes. Publicações do século XIX já fazem distinção entre os diversos tipos de cal, ao nível do seu grau de hidraulicidade. Vicat [240] classifica as cais como cal gorda, cal magra, cal ligeiramente hidráulica e cal eminentemente hidráulica, tendo como base o aumento de volume após extinção e a consistência desenvolvida ao longo do tempo após imersão em água. O seu contemporâneo, Rondelet [251] menciona a existência de cal gorda e cal magra (que não é totalmente absorvida por ataque ácido), embora cite Vicat diferenciando entre cal comum e cal hidráulica. Augusto Leitão [116] classifica as cais como gorda, magra e hidráulica (fracamente hidráulica, medianamente hidráulica, hidráulica, eminentemente hidráulica e limite), fazendo depender o grau de hidraulicidade do tempo de presa e da dureza atingida. Enquanto em tempos recentes a classificação das cais era semelhante, mas baseada no índice de cimentação [28]⁴ ou índice de hidraulicidade⁵, actualmente está definida pela norma NP EN 459:1 como dependendo da classe de resistência (cais hidráulicas) ou composição química (cais aéreas).

4.1.2 Areia/argila

4.1.2.1 Classificação

A junção destes dois materiais naturais no mesmo ponto deve-se ao facto de serem frequentemente utilizadas misturas contendo ambos, sob uma única designação. Segundo o Dicionário da Porto Editora [151], areia é definida como um conjunto de partículas granulosas de natureza mineral ou como sedimento clástico solto, formado essencialmente por quartzo ou outros minerais e rochas cujo diâmetro varia entre 0,07 mm e 2 mm. Sousa Coutinho [3], classifica areia como um inerte (parte de uma rocha) com dimensões inferiores a 5 mm e superiores a 0,1 mm. Celso Gomes [71] admite a dificuldade na classificação da argila, adoptando contudo a seguinte: rocha constituída essencialmente por minerais argilosos, com elevado conteúdo de partículas com dimensões inferiores a 2µm, plástica quando misturada com água e que adquire uma grande dureza após cozedura a 1000°C. Estes conceitos são alvo de regulamentação e actualmente as areias, designadas como agregados dada a sua natureza quase sempre reactiva, são alvo de classificação no âmbito de areias para argamassas pela EN 13139 [36]. Contudo, é inegável que tanto a areia como a argila, ou a mistura de ambas, têm significados diferentes, tendo em conta o tipo de utilização e as tradições regionais, existindo terminologias específicas que persistem no

$$^4 CI = \frac{2.8 * \%SiO_2 + 1.1 * \%Al_2O_3 + 0.7 * \%Fe_2O_3}{\%CaO + 1.4 * \%MgO}$$

$$^5 \text{Índice de Hidraulicidade} = \frac{SiO_2 + Al_2O_3}{CaO + MgO}$$

sector da construção. Ao longo do tempo ambos os conceitos foram encarados de diferentes formas por diversos autores.

O Capítulo IV do Livro II, do livro *De Architectura* [174, 252, 253, 254] é dedicado às areias, sendo identificados três tipos diferentes de areia: de rio, de mar e de mina. Vitruvius classifica as areias de mina segundo a sua coloração em *nigra*, *cana*, *rubra* e *carbunculus* [252, 253], sendo estes termos traduzidos por diversos autores como preta, branca, vermelha [252, 253, 254] e vermelho vivo [252], lignite [253] e carbúnculo. Alberti [4] e Palládio [250] seguem com bastante fidelidade os textos de Vitruvius. Alberti [4] dedica o Capítulo XII do Livro II aos três tipos de areia e materiais variados para a construção, em diferentes locais; neste capítulo, define areia como uma composição de pequenas pedras, resultando do esmagamento de grandes pedras em pedaços. Considerando os mesmos tipos de areia que Vitruvius, menciona as diferentes colorações da areia de mina, classificando o último tipo de areia de mina como *carbunculus*, originário da Toscana e produzido através da queima da terra por fogos existentes no interior das montanhas. Classificação análoga das areias é adoptada por Palladio [250] que, embora não utilize o termo *carbunculus*, designa este último tipo de areia de mina como um material da cor das cinzas, calcinado por fogos subterrâneos. Rondelet [251] descreve a areia como algo que se situa, em termos dimensionais, entre a terra e a pedra, proveniente dos diversos tipos de rocha existentes. Vicat [240] dedica um capítulo aos materiais adicionados à cal para execução de argamassas, no qual inclui areias e pozolanas. Relativamente às areias, argilas e materiais intermédios, divide-os nas seguintes categorias:

- Areias : material resultante da desagregação de rochas graníticas, xistosas, calcárias e outras, originárias de rio, de mar ou de mina (*arenas*)
- *Arenes* (sub-categoria da areia) : areia quartzosa irregular, contendo um a três quartos de argila, podendo ter várias colorações (*amarela, vermelha, castanha, branca*)
- Psamitos : junção de grãos de quartzo, xisto, feldspato e partículas de mica, aglutinados
- Argilas : substâncias finas e coloridas, que formam uma pasta com água e que endurecem quando sujeitas à acção do fogo

Verifica-se a diversidade de designações adoptadas e denota-se que a classificação de areia por Vitruvius e autores que o seguiram é muito generalista, englobando areia de mina e especificamente o *carbunculus*, termo que significa carvão pequeno ou pequena pedra vermelha e que é utilizado como designação possível para os minerais almandina e piropo (granadas).

4.1.2.2 Utilização em argamassas

Vitruvius [174, 252, 253, 254] menciona que a areia de mina é de óptima qualidade, superior à areia de rio e, por último, à de mar, que pode provocar desagregação de argamassas por acção dos sais. Contudo, não é a mais adequada para incorporação em rebocos, provocando fissuração; para tal função a areia mais apropriada será a areia de rio. De forma análoga a Vitruvius, e com certeza baseados na sua obra, Alberti [4] e Palladio [250] reforçam a ideia de que a areia de mina utilizada em rebocos provoca fissuração. Apoiado na utilização das areias em obras, Alberti [4] comenta que o carbúnculo da Toscana será o melhor tipo de areia, seguido pela areia vermelha, que também proporciona bons resultados, enquanto a areia branca é a de pior qualidade. Palladio [250] menciona que a areia de rio é a melhor para reboco (camada base) de paredes. Rondelet [251] experimentou a utilização de diversas areias em argamassas, concluindo que a areia quartzosa produz argamassas menos ‘duras’ do que as produzidas com areias mistas; concluiu adicionalmente que a areia de mina produz argamassas melhores do que a areia de rio. Para este tipo de areias, uma coloração mais escura e uma granulometria média são características adicionais apontadas por este autor para escolha das melhores areias a utilizar em argamassas. Fundamental é, contudo, a sua afirmação de que não são os locais de extracção que ditam a qualidade das areias, mas antes a sua composição.

4.1.3 Pozolanas Naturais

4.1.3.1 Classificação

Na antiguidade as pozolanas eram habitualmente classificadas como areias. A pozolana natural, designada como *pulvis Puteolanos*, dada a sua proveniência de *Puteoli* (Pozzuoli), é mencionada por Vitruvius [174, 252, 253, 254] como um tipo de pó que existe nas zonas de Baiae e do Vesúvio e que quando misturada com cal e areia, produz argamassas que endurecem debaixo de água. Este autor dedica o Capítulo VI do Livro II às pozolanas e menciona, para além do pó de Baiae e do Vesúvio, cinzas da Campania e uma espécie de areia da Toscana designada por *carbunculus*, afirmando que este último material é particularmente dotado para utilização em construções marítimas [174, 252, 253, 254]. Palladio [250] refere a pozolana como uma espécie de areia que é cavada nos territórios de Baia e Cuma e que endurece debaixo de água, enquanto Alberti [4] não menciona este material, referindo apenas o *carbunculus*, mas classificando-o, analogamente, como um tipo de areia. O autor Rondelet [251] descreve a pozolana como ‘uma espécie de areia que parece ser proveniente de pedaços de pedra-pomes e lavas porosas expulsas pelo Vesúvio e outros vulcões nas suas erupções’ e menciona a existência de vários tipos de pozolanas naturais, associadas a fenómenos vulcânicos, citando exemplos como o trass da Holanda e a cinzas de Tournay. Vicat [240] considera pozolanas naturais os materiais existentes em regiões com actividade ígnea, com diferentes colorações e compostos fundamentalmente por sílica e alumina.

Como produtos pseudo-vulcânicos são caracterizados os materiais decorrentes da ignição da pedra em minas de carvão.

4.1.3.2 Utilização em argamassas

É afirmado que as pozolanas naturais foram primeiro aplicadas em argamassas de reboco pelos Gregos cerca de 1500 A.C. [143, citando Jiang et al.], existindo evidências de tal ocorrência na ilha de Santorini; Moropoulou [137] confirma a utilização de terra de Santorini como aditivo pozolânico primordial, mencionando exemplares de argamassas pozolânicas datadas do Século II A.C. na ilha de Delos. É sobejamente conhecida a sua aplicação em argamassas pelos Romanos, que utilizaram em larga escala os materiais pozolânicos no fabrico de argamassas e betões e difundiram esta prática por todos os territórios que ocuparam. Também na Turquia se encontram argamassas designadas por *khorasan* dos períodos Bizantino e Otomano (cerca de 700 D.C. a 1920 D.C), com inclusão de material vulcânico, conforme comprovado por análises da sua composição [182]. Em Itália e restantes países com reservas pozolânicas abundantes é provável que o seu uso tenha sido feito de forma continuada, de acordo com a afirmação de Castanheira das Neves [35] que, referindo-se aos materiais pozolânicos, afirma que 'no país da pozolana, Itália, o seu uso é caseiro'. Argamassas de cal, pozolana e tufo zeolítico, podendo conter adicionalmente cerâmico moído, foram empregues nos Séculos I e II D.C. nos portos de Ostio, Civitavecchia, Anzio, em pontes sobre o rio Tiber e nos aquedutos de Nimes e de Segóvia [50]. Encontra-se igualmente relatado o seu uso no final do Século XIX, início do Século XX, este material foi utilizado em obras marítimas em Civitavecchia e outros portos de Itália [35].

Um estudo relativo ao Castelo de Alcácer do Sal afirma que as argamassas da taipa militar utilizadas na cerca almóada de Alcácer do Sal são semelhantes ao *opus coementicium* romano, sendo compostas por cal aérea e pozolana natural [44]. Segundo o autor deste trabalho, a incorporação de pozolanas em construções nesta época (séc. XII) deve-se à utilização corrente deste material pelo povo magrebino, decorrente da influência romana sofrida na altura da ocupação dos seus territórios. Análises efectuadas à denominada taipa militar das fortificações de Alcácer do Sal e Juromenha, Moura, Paderne e Silves, erigidas durante o período de ocupação islâmica da região, concluíram que entre os materiais constituintes da taipa foram empregues escórias (Alcácer do Sal e Juromenha) [31]. Análises efectuadas ao Forte de S. Julião da Barra, Oeiras, (Séculos XVI e XVII) detectaram a presença de escórias de origem vulcânica na argamassa de enchimento [162].

Sousa Coutinho [35] relata a aplicação de trass desde a Época Romana até ao início do século XX: este material foi aplicado em argamassas, na época de Constantino (310 A.C.), na construção da ponte sobre o Reno entre Colónia e Deutz, mantendo elevada resistência mecânica em finais do século XIX; no século XVII existiam na Holanda documentos que regulavam a qualidade deste

material, comprovando a sua utilização corrente; durante o século XVIII o trass foi empregue em obras marítimas na Holanda, Alemanha e no Reino Unido; o seu uso em obras hidráulicas mantinha-se no início do século XX, principalmente na Alemanha, Bélgica e Holanda. Para além do trass, aplicava-se na Holanda um outro produto com propriedades pozolânicas: lama dos canais seca, também apelidada Cimento de Amesterdão [80].

Existem inúmeros exemplos da utilização da pozolana de S. Miguel, Açores, nas obras nacionais, durante o Século XIX, particularmente em obras ligadas à construção ribeirinha ou marítima:

- Na construção do Porto de Leixões (1884-1892), embora o cimento empregue fosse proveniente da Societé des Ciments Français de Boulogne-sur-Mer, foi utilizada pozolana de S. Miguel, Açores [35, 49]
- Foi empregue, em 1855, no cais da Alfândega de Ponta Delgada [150]
- Os muros dos cais de Aveiro, datados de 1861 foram construídos com uma mistura de pedra britada, cal, areia e pozolana de S. Miguel [35, 49]
- É relatada a utilização na zona de Santarém de argamassas de massapez (tipo de pozolana de S.Miguel), cal e areia [35]
- Foi incorporada esta pozolana nas obras de melhoramento da barra e do porto da Figueira no Século XIX [35, 150]
- Para a construção da nova Alfândega do Porto (1860-1870) foram utilizadas pozolanas de S. Miguel, tanto nas fundações como nas argamassas para muros e cais [150]
- Foi empregue no *beton* efectuado para alargamento das caleiras do Aqueduto das Águas Livres no Século XIX [150]
- Foi utilizada a pozolana dos Açores nos cais de Portimão, assim como em pontes e obras hidráulicas efectuadas no distrito de Faro durante o Século XIX [150]

4.1.4 Pó de Tijolo/Cerâmica Moída

Na ausência de pozolanas naturais, eram frequentemente empregues resíduos cerâmicos peneirados [252], funcionando como pozolanas artificiais e permitindo o endurecimento de argamassas em condições húmidas ou de contacto com a água. Revestimentos com este tipo de argamassa, dispersos pelas construções do Império Romano são conhecidos pela designação de *Opus Signinum*, que deriva da localidade de Signia, onde eram reutilizados em argamassas os resíduos cerâmicos fabricados a partir de argilas locais [56, 174, 252]. Esta prática disseminou-se, possivelmente pelo bom desempenho deste tipo de argamassa. A inclusão de partículas cerâmicas é frequentemente descrita por Vitruvius (Livro II, Capítulo V; Livro VII, Capítulo I e Capítulo IV), sendo a sua utilização preconizada para locais húmidos ou, de uma forma geral, para

melhorar as propriedades da argamassa. Contudo, é afirmado que a utilização de partículas cerâmicas em argamassas fazia parte da prática construtiva existente na civilização Grega [252].

4.1.4.1 Produção

Os fornos utilizados na antiguidade, nomeadamente na Época Romana, para a cozedura de tijolos e restantes peças cerâmicas variavam de tamanho consoante as peças a produzir e o tempo de cozedura era extremamente variável, dependendo de factores como a dimensão do forno, o tipo de combustível e as condições atmosféricas, à semelhança dos fornos de cal; dentro do forno a temperatura podia sofrer grande variação atingindo cerca de 800°C ao nível do solo e 450°C na zona da saída superior [1]. Vicat [240] discorre sobre a calcinação de argilas, *arenas*, psamitos ou xistos, descrevendo diferentes métodos para obtenção de pozolanas artificiais. Segundo o autor, a pulverização do material e a sua cozedura sobre placa de ferro durante 5 a 15 minutos, dependendo do produto, produziria o melhor resultado. Como alternativa, menciona a cozedura em recipientes fechados ou a mistura dos materiais com areia e a sua colocação na zona superior de um forno de cal.

4.1.4.2 Utilização em argamassas

Vários exemplos da utilização desta técnica de revestimento em diversas épocas e em diferentes partes do globo podem ser enumerados. Há 3000 anos os Fenícios produziram argamassas de cal com propriedades hidráulicas, misturando tijolo moído com cal, para rebocar os muros de cisternas na costa Sírio-Palestiniana [50, 94], como também na mesma época, na Creta Minoica eram utilizadas argamassas similares [248]. Na Época Romana, de entre vários monumentos em que foi utilizada esta técnica, salienta-se que para o muro de Adriano, construído entre os anos 122 e 130 DC, onde foi utilizada uma argamassa de cal com cerâmico partido/moído, pedaços de arenito, areia e resíduos provenientes de fornos de cal [210]. Desde o período Helenístico (iniciado cerca do ano 300 A.C.) até ao início do Bizantino (século I D.C.), na Turquia, existem vestígios de argamassas de cal com cerâmico moído [57, 182], utilizadas em zonas de passagem de água, tais como canais de abastecimento de água, assim como em paredes, nesse último caso, com o intuito de protecção contra a humidade. Este material figura como um dos componentes das argamassas *khorsan* utilizadas neste país durante vários séculos [182]. Alguns estudos foram elaborados sobre a imponente igreja de Haghia Sophia em Istambul, executada com tijolo e argamassas de cal e cerâmico moído [18, 142, 145, 157], sendo atribuídos a estes materiais e ao gel de alumino-silicatos de cálcio decorrente da reacção pozolânica (com potencialidade de absorção energética), as suas características de resistência sísmica. Propriedades similares são atribuídas às argamassas de Rhodes, efectuadas com base nos mesmos materiais [108]. Lea [115] dá conta de

experiências realizadas com argamassa de argila cozida e cal na reconstrução da ponte de Londres e no farol de Eddystone, contudo mal sucedidas. Durante o século XVII, na Suécia, (Baggé de Gotenburgo) e França (Conde Chaptal) foram realizadas igualmente experiências com argamassas de cal e argila cozida [240, notas do tradutor]. Autores amplamente divulgados, como Vicat e Frémy, estudaram também argamassas incorporando estes materiais. Vicat refere, para além da argila cozida, a utilização de cacos de telhas, tijolos e vasilhame, recolhidos nas lixeiras dos produtores, advertindo contudo para a qualidade variável destes produtos. Da mesma forma, Rondelet [251] refere a utilização de argilas cozidas e materiais afins, mencionando que os antigos utilizavam todos os tipos de resíduos cerâmicos.

Argamassas baseadas em misturas de cal aérea com argila cozida/tijolo moído, têm várias denominações consoante o local do mundo onde a técnica é utilizada e foram empregues em várias obras conhecidas:

- *Surkhi*, denominação indiana para este material [88], foi utilizado na barragem de irrigação *Krishnaraja Wodeyar* construída na Índia em 1924 [113], assim como no sistema de canais de irrigação denominado *Ganga Canal System*, construído em 1847.
- Uma argamassa com cal e tijolo cozido foi utilizada na construção da barragem de Assuão [88]. Actualmente, ainda se emprega *Homra* (mistura de cal e tijolo cozido esmagado) no Egipto, dado o seu baixo custo [59, 81].
- Na Indonésia argamassas fabricadas a partir destes materiais são designadas como *Semen Merah* [88].

Em Portugal, análises efectuadas à denominada taipa militar das fortificações de Alcácer do Sal e Juromenha, Moura, Paderne e Silves, erigidas durante o período de ocupação islâmica da região, concluíram que entre os materiais constituintes da taipa foram empregues cal e fragmentos de tijolo (Alcácer do Sal, Juromenha, Silves) [31]. É também mencionada a sua utilização (cacos de tijolo ou de telha) para o fabrico de *betom*⁶ e *formigão*⁷ no início do Século XX [186].

4.1.5 Outras pozolanas artificiais

É relatada a utilização de uma mistura de cal, pó de tijolo, borra de ferro e cimento Romano para as obras na zona de Santarém [35]. Para além de materiais argilosos cozidos, Vicat [240] considera como pozolanas artificiais as borras de ferro e resíduos da combustão de carvão e de turfa mas não é muito entusiástico quanto à sua utilização, classificando as escórias como

⁶ *betom* – designação antiga para betão utilizando cimento como ligante

⁷ *formigão* – designação antiga para betão utilizando cal aérea como ligante

fracamente energéticas e indicando que a qualidade dos restantes produtos encerra grande variabilidade, podendo mesmo ser inertes. Na sua publicação *Alvenaria e Cantaria* [186], J. Segurado Santos refere a utilização de cinzas de carvão de pedra, escórias metálicas e cascalho de basalto na preparação de 'betões'. A reactividade das cinzas de carvão (cinzas volantes) foi constatada nos EUA em 1914 [52], iniciando-se a sua utilização em 1930; actualmente este produto é largamente utilizado no fabrico de betão. A sílica de fumo começou a ser empregue mais tardiamente, datando os primeiros estudos sobre este material de meados do Século XX [52].

4.2 Composições

Vitruvius [174, 252, 253, 254] menciona a utilização de uma parte de cal para duas partes de areia de mina ou para três partes de areia, se esta for proveniente de rio ou de mar. Através da descrição da cal a utilizar para rebocar, no Capítulo do Livro VII e dos documentos complementares de Alberti [4] e Palladio [250] (que preconizam o mesmo traço), parece provável que a cal fosse utilizada sob a forma de cal em pasta, sendo portanto os traços dados em volume de cal em pasta para volume de agregado. Subsiste a dúvida se o agregado era empregue em estado seco ou com um certo grau de humidade; parece contudo provável que, à semelhança do que acontece nas obras actuais, o agregado fosse armazenado e utilizado conforme a necessidade, detendo um grau variado de humidade consoante o local de extracção e a época do ano. Esta diferença de teor de humidade pode provocar uma grande variação volumétrica, implicando traços mais ricos em ligante e com maior quantidade de água, quanto maior o teor de humidade da areia.

Se os traços de argamassas de cal e areia são extremamente variados, tendo em conta época e local, o mesmo se verifica com os traços de argamassas contendo componentes pozolânicos, com a agravante da grande diversidade destes materiais. Na Tab. 4.1 encontram-se discriminados diversos traços utilizando pozolanas naturais e artificiais que foram empregues em obras diversas ao longo das épocas.

Para além dos traços realmente aplicados na construção, várias tentativas de execução de argamassas contendo pozolanas foram efectuadas, com vista ao conhecimento e consequentemente, à melhoria das suas propriedades. Neste âmbito, Saint Leger [240, n.t.], chegou à conclusão que a mistura de 1 parte de cal em pasta com 3 partes de argila calcinada em pó era a mais adequada, proporcionando um endurecimento rápido da argamassa. Experiências de J.T. Smith [240, n.t.] com trass concluem sobre a possibilidade de fabricar uma boa argamassa com um traço de 2 partes de cal em pasta para 1 parte de trass e 3 de areia.

Tab. 4.1. Traços de argamassas com componentes pozolânicos

Aplicação	Cal pasta	Cal pó	Areia	Pozolana Natural	Pozolana Artificial	Outros Componentes	Época	Autor
<i>Recomendado Vitruvius</i>	1	-	2	-	1 (Cerâmica moída)	-	Romana	174 252 253 254
<i>Recomendado Vitruvius obras marítimas</i>	1	-	-	2	-	-	Romana	174 252 253 254
<i>Recomendado Vitruvius camada regularização pavimentos</i>	1	-	-	-	3 (Cerâmica moída)	-	Romana	174 252 253 254
<i>Recomendado Smeaton Argamassa Acabamento</i>	-	2	0-3	1 (Trass)	-	-	1791	198
<i>Recomendado Smeaton Argamassa Regularização</i>	-	2	3	1/4 -1/2 (Trass)	-	-	1791	198
<i>Recomendado Smeaton Argamassa Acabamento</i>	-	2	2 1	-	2 3 (Minion)	-	1791	198
<i>Recomendado Smeaton Argamassa Regularização</i>	-	2	3	-	1/4-1/2 (Minion)	-	1791	198
<i>Docas de Sunderland</i>	2	-	-	-	1 (borras de ferro)	-	1835	240(n.t .)
<i>Santarém</i>	1	-	1	2 (Massapez)	-	-	Séc. XIX	35
<i>Santarém</i>	1	-	1	-	1 (Pó de tijolo)	1 (Cim. Rom.) ⁸	1858	35
<i>Barra da Figueira</i>	1	-	1	1 (S. Miguel)	-	-	Séc. XIX	150

⁸ Cimento Romano – tipo de cimento desenvolvido anteriormente ao cimento Portland e supostamente com presa mais rápida [2, 223].

Actualmente, através dos meios técnicos disponíveis, é possível determinar o traço de uma dada argamassa, ressalvando contudo o facto de transformações que possam ter ocorrido com o passar do tempo. Neste contexto, são definidos alguns traços, como os das seguintes argamassas:

- Banhos Públicos de Tahtakale (15 D.C.) - 1:1.25-3 (cal: tijolo e areia) [62]
- Muros marítimos de Constantinopla (5-8 D.C.) – 1:2.25-2.26 (cal: tijolo e areia) [62]
- Rebocos da Basilica de Hagia Sophia (532-537 D.C.) –1: 2-4(cal:tijolo e areia) [18]

Traços de argamassas contendo tijolo moído são mais fáceis de determinar, dada a distinção entre os fragmentos cerâmicos e o restante agregado. A determinação quantitativa das restantes pozolanas adicionadas a argamassas antigas apresenta-se, ainda hoje, como uma questão que não está completamente resolvida, apesar de algumas excelentes aproximações [195].

4.3 Características químicas, físicas e mecânicas de argamassas antigas

De forma a possibilitar a determinação dos constituintes das argamassas antigas, é fundamental determinar algumas características químicas. Esta questão revela-se particularmente importante quando se trata de argamassas com componentes pozolânicos, permitindo a distinção entre argamassas hidráulicas e argamassas pozolânicas. Moropoulou [141] desenvolveu uma metodologia baseada na análise térmica de argamassas, medindo o conteúdo em carbonato de cálcio pela libertação de CO₂ e o conteúdo de água de adsorção e água estrutural, os quais se encontram interligados com os materiais empregues nas argamassas e formados nas reacções químicas entretanto ocorridas. Esta relação encontra-se expressa na Tab. 4.2, não contemplando contudo argamassas de cal e argila.

Tab. 4.2. Classificação química de argamassas antigas, conforme [137, 141]

Tipo de argamassa	Água de adsorção	Água estrutural	CO ₂ (%)	CO ₂ / Água estrutural (gama de valores)
Argamassa de cal	<1	<3	>32	7.5-10
Argamassa de cal e cimento Portland	>1	4-12	18-34	1.5-9
Argamassa de cal hidráulica	>1	3.5-6.5	24-34	4.5-9.5
Argamassa com pozolanas naturais	4.5-5.5	5-14	12-20	<3
Argamassa com pozolanas artificiais	1-4	3.5-8.5	22-29, 10-19	3-6

Para além do conhecimento das características químicas, as características mecânicas e físicas são fundamentais para atingir um adequado conhecimento do material, permitindo a formulação de argamassas compatíveis, quando necessário. O facto é que houve uma mutação destas características com o tempo, relacionada com fenómenos como a erosão, poluição atmosférica e com a própria reacção química dos componentes da argamassa entre si e com o suporte. Neste contexto, a produção de uma argamassa “igual” à original, poderá não atingir os parâmetros físicos e mecânicos necessários para produzir uma argamassa compatível. A determinação da resistência mecânica proporciona um dado valioso quanto ao estado de conservação da argamassa e permite avaliar o tipo de intervenção a efectuar; dados como a absorção de água, interligados com a porosidade, fornecem informações sobre o comportamento da argamassa face à água. Uma estratégia de elaboração de argamassas de substituição ou colmatação de lacunas deverá passar pela obtenção destes dados e procura de formulações que respeitem estes requisitos. Moropoulou [141] sintetizou, com base num leque de argamassas estudadas, algumas das suas características, relacionando-as com a sua formulação (materiais e traço), conforme expresso na Tabela 4.3. Contudo, as características das argamassas antigas são extremamente variáveis, dependendo dos seus constituintes, tão diversos consoante a localização dos edifícios, e da sua exposição.

Tab. 4.3. Algumas propriedades físicas e mecânicas de argamassas antigas, conforme [137, 141]

Tipo de argamassa	Volume (mm ³ /g)	Densidade aparente (g/cm ³)	Dimensão média poro (µm)	Superfície Específica (m ² /g)	Porosidade total (%)	Resistência tracção (MPa)	Traço em massa (Lig.: Agr.)
Argamassa de cal	170-230	1.5-1.8	0.8-3.3	1.3-3.3	30-45	<0.35	1:4-1:1
Argamassa de cal e cimento Portland	105-241	1.8-1.9	0.03-6.5	1.7-10.6	20-43	0.6-0.7	1:2-1:1
Argamassa de cal hidráulica	90-230	1.7-2.1	0.1-3.5	2.5-13.5	18-40	0.35-0.55	1:4-1:1
Argamassa com pozolanas naturais	160-265	1.6-1.9	0.1-1.5	3-14	30-42	>0.60	1:5-1:1
Argamassa com pozolanas artificiais	170-280	1.5-1.9	0.1-0.8	3.5-9	30-40	>0.55	1:3

5 Análise Experimental de Argamassas Antigas com Pozolanas

De forma a alargar o conhecimento sobre argamassas antigas contendo adições pozolânicas para além da pesquisa bibliográfica, surgiu a necessidade de recorrer à análise de argamassas existentes. Pretendeu-se através da recolha de amostras e da sua análise caracterizar as argamassas quanto aos seus componentes e características, tendo em conta as reacções desenvolvidas ao longo do tempo. Neste contexto tentou-se, sempre que possível, confirmar a presença da reacção pozolânica. Procurou-se também perceber quais os tipos e quantidades de adições pozolânicas utilizados e analisar a sua influência nas características das argamassas. O estado de conservação das amostras em estudo é um parâmetro chave, que permitirá retirar ilações relativas à utilização das diversas adições nas argamassas.

Como base para este capítulo foi elaborado um quadro identificando as amostras analisadas e respectivas características analisadas (Anexo I). Foram elaboradas fichas individuais, por argamassa, com os resultados obtidos através dos diversos métodos de ensaio utilizados (Anexo I).

5.1 Amostragem

Foi efectuada uma recolha alargada de argamassas antigas, provenientes de diferentes locais, épocas e tipos de edifício, privilegiando-se as argamassas potencialmente pozolânicas.

Assim, a nível territorial, foram efectuadas recolhas na zona de Tróia, Setúbal (Fig. 5. 2), nas ruínas Romanas, onde é evidente a utilização de *opus signinum* entre outros tipos de argamassas de revestimento; nas ruínas Romanas de Frielas onde é possível encontrar rebocos com camadas de capeamento rosadas, indicativas da utilização de cerâmico moído; na região centro, na estação arqueológica de Conímbriga, onde abundam argamassas do tipo *opus signinum*, no *criptopórtico* do Museu Machado de Castro e numa parede do Convento de Santa Cruz em Coimbra com junta e reboco em argamassas com pó cerâmico; em diversos edifícios da ilha de S. Miguel, nos Açores (Fig. 5. 1), onde a utilização de matérias-primas de origem vulcânica é uma constante. Exemplos de outras proveniências com características potencialmente relevantes foram retirados da Igreja Matriz de Safara (Alentejo) e da Barragem Romana de Álamo (Algarve).



Fig. 5. 1 Casa Rua Eng.º José Cordeiro, 93
Ponta Delgada



Fig. 5. 2 Tanques de salga, Estação
Arqueológica Tróia

As argamassas recolhidas são também representativas de várias épocas: Época Romana, representada pelas argamassas provenientes de Tróia, Conímbriga e Frielas executadas entre os séculos I (Fig. 5. 3) e VI; século XVI ao século XVIII das argamassas do Forte de S. Brás em Ponta Delgada; do século XIX foram retiradas algumas amostras das fachadas da Fábrica da Chicória e da Fundação em Ponta Delgada; outras argamassas têm datação incerta, pertencendo provavelmente à época Romana ou século XVI (Museu Machado de Castro) (Fig. 5. 4) e aos séculos XIX ou XX (Furnas, Ponta Delgada).



Fig. 5. 3 Conímbriga
Século I



Fig. 5. 4 Convento de Santa Cruz,
Século XVI

Quanto ao tipo de edifício, relativamente às argamassas Romanas, foram retiradas amostras essencialmente do interior de estruturas de passagem ou contenção de água, tais como tanques com funções de banhos (Conímbriga e Tróia) como em tanques destinados a salga de peixe (Tróia), canais de passagem de água (Frielas) e de uma barragem (Algarve); exceções a esta regra são as argamassas retiradas do *criptopórtico* do Museu Machado de Castro; por outro lado, a parede do Convento de Santa Cruz que foi alvo de amostragem situava-se em local

extremamente húmido e é provável que tenha sido erigida tendo como função a protecção da humidade. As restantes argamassas foram retiradas de fachadas de edifícios com utilização diversa: habitacional (Fig. 5. 5), industrial (Fundição e Fábrica da Chicória), (Fig. 5. 6), e militar (Forte de S. Brás, Forte da Praia do Pópulo).



Fig. 5. 5 Furnas, Travessa entre os n.º 29 e 37 da Rua das Águas Quentes, n.º 31 – Habitação



Fig. 5. 6 Antiga Fundição de Ferro, séc. XIX, Ponta Delgada Edifício industrial

5.1.1 Técnica de amostragem

Dado que a amostragem incidu em vestígios arqueológicos ou edifícios em bom estado de conservação, neste caso principalmente ao nível das fachadas, não foi possível seguir um plano de amostragem que permitisse retirar grande quantidade de material. Embora fosse preferível efectuar a recolha de material a diferentes alturas do solo devido aos efeitos da capilaridade e da pluviosidade, assim como retirar amostras de fachadas diferentes devido à sua orientação, tal não foi efectuado pelas razões supracitadas. Procedeu-se à retirada de argamassas originais, que apresentassem preferencialmente bom estado de conservação, tendo o cuidado de efectuar o mínimo dano possível nos paramentos onde a amostragem foi efectuada. Nos locais arqueológicos e em Conímbriga, particularmente, foi utilizado o critério de retirar rebocos já em fase de destacamento da parede, sendo posteriormente efectuada uma acção de conservação com preenchimento das lacunas da amostragem.

5.2 Metodologia de Análise

De forma a obter a caracterização mais completa possível das amostras retiradas, foi necessário recorrer a técnicas complementares de análise química, física e de microscopia. Para além das questões usualmente impostas na análise de argamassas antigas, a verificação da incorporação

de materiais pozolânicos induz análises acrescidas. A metodologia adoptada foi baseada em processos correntemente utilizados [18, 24, 25, 30, 33, 68, 144, 153, 154, 158, 168, 179, 195, 196], assim como em resultados obtidos com diferentes métodos descritos por diversos autores [61, 107, 164, 121, 222, 232]. O esquema de análise adoptado encontra-se patente na Fig. 5. 7, tendo sido aplicado à maioria das argamassas. Os ensaios de absorção capilar e de determinação da resistência mecânica não foram aplicados em argamassas demasiado friáveis.

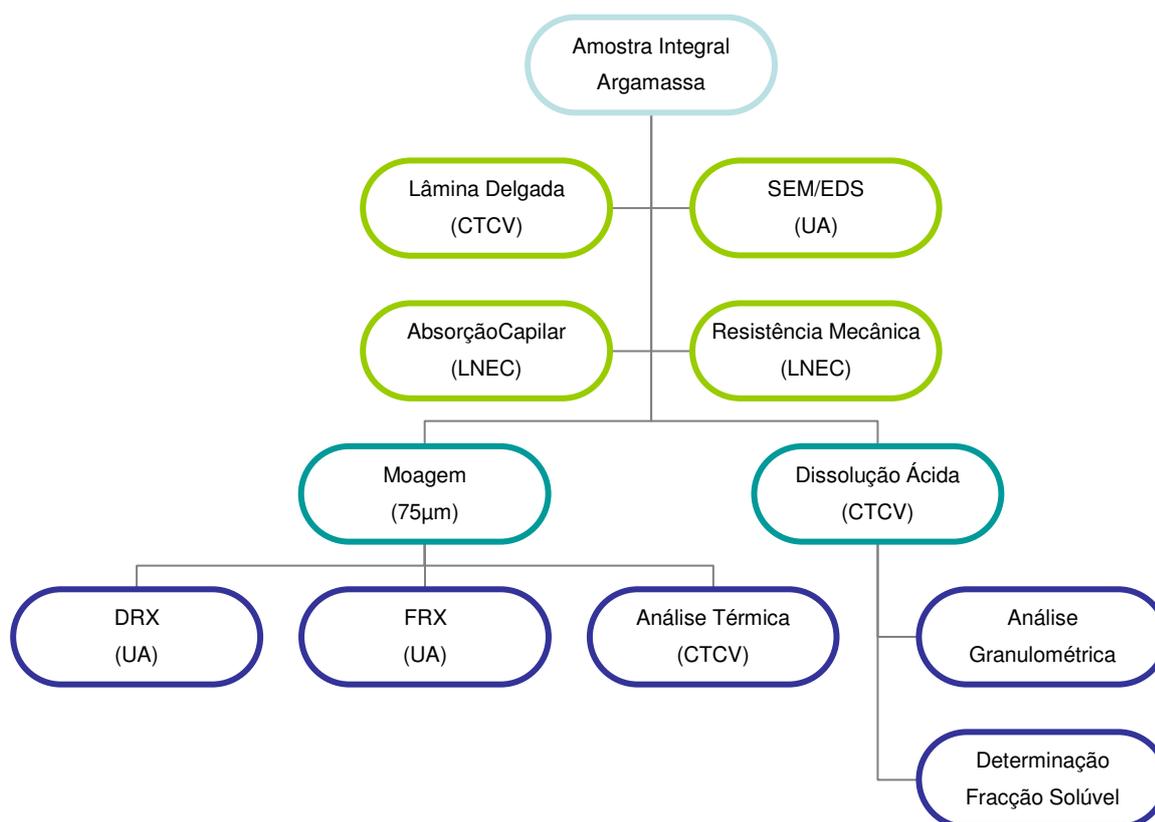


Fig. 5. 7 Organograma analítico utilizado no estudo das amostras seleccionadas

Para as argamassas contendo areia siliciosa como único agregado, a dissolução ácida permite a determinação, embora aproximada, da composição percentual em peso, o que pode não corresponder em rigor ao traço utilizado na altura da sua execução devido à dissolução de alguns constituintes pela água da chuva ou à sua decomposição por outras causas naturais. Em argamassas com agregado de base carbonatada, a informação resultante desta análise engloba todos os materiais solúveis, podendo incluir o agregado.

A verificação da granulometria do agregado reveste-se de uma importância fundamental, pois influi directamente na porosidade e, conseqüentemente, nas características e durabilidade da argamassa.

O recurso a métodos de análise térmica, nomeadamente análise termogravimétrica (ATG) e análise calométrica diferencial (DSC) permitem apurar alguns componentes das argamassas e a sua quantificação. Revelam-se fundamentais para a determinação quantitativa de carbonatos, permitindo adicionalmente classificar as argamassas quanto à sua hidraulicidade.

Apenas através de análise microscópica é possível conhecer detalhadamente a amostra; por microscopia óptica é possível observar o número de camadas, assim como identificar os vários minerais constituintes da argamassa; a microscopia electrónica de varrimento (MEV/EDS), através da visualização de estruturas cristalinas e/ou geles, permite identificar os diversos constituintes, sendo uma ajuda indispensável na identificação dos compostos hidráulicos de interacção de pozolanas com a cal.

Para além das metodologias supracitadas, o recurso à análise química complementa a informação já obtida relativa à argamassa em estudo. Da difracção de raios x (DRX) resulta a informação qualitativa dos minerais cristalinos existentes na amostra, enquanto a fluorescência de raios x (FRX) permite a determinação quantitativa da composição química (óxidos) da argamassa. O estudo mineralógico e químico complementam as análises e ensaios efectuados, permitindo em muitas situações esclarecer ou facilitar a interpretação de alguns resultados.

5.2.1 Determinação da fracção solúvel por dissolução ácida

Após secagem e pesagem, a determinação da fracção solúvel efectua-se através de ataque ácido, efectuando fundamentalmente a dissolução de carbonatos (calcite, portlandite, dolomite, magnesite) e a obtenção de um resíduo. A dissolução em ácido acético a frio produz um resíduo constituído por material terroso e/ou tijolo mais a fracção arenosa. Por este motivo, o ácido acético foi utilizado para argamassas do tipo *opus signinum*, permitindo a obtenção de um resíduo composto por areia e fragmentos cerâmicos. A dissolução em ácido clorídrico a quente produz como resíduo apenas o agregado e particularmente, a sua fracção siliciosa. Esta metodologia foi utilizada para as restantes argamassas. Em ambos os casos, o resíduo foi seco a baixa temperatura até atingir peso constante.

5.2.2 Análise granulométrica do resíduo

O resíduo seco proveniente da dissolução ácida, tomado como agregado, foi sujeito a análise granulométrica a seco. Para as argamassas *opus signinum*, a observação à lupa binocular permitiu determinar a percentagem aproximada de agregado silicioso (areia quartzosa) e de partículas de tijolo retida em cada peneiro.

5.2.3 Fluorescência de raios X (FRX)

Esta técnica permite a detecção de elementos presentes na amostra, através da excitação da amostra por um feixe de raios X [71]. A preparação das amostras seguiu procedimento análogo à preparação para análise por DRX e foi utilizado o equipamento Espectómetro de Fluorescência Philips PW 1400 X-Ray.

5.2.4 Difracção de Raios X (DRX)

A utilização desta técnica de análise permite a obtenção de informação qualitativa relativa aos compostos cristalinos existentes nas amostras, complementando desta forma as restantes análises efectuadas.

Através da incidência, na amostra pulverizada, de raios X e da sua difracção pelos cristais, é possível obter um difractograma onde se podem ler os registos pertencentes aos diversos materiais cristalinos que compõem a argamassa [158, 195].

O processo envolveu a moagem e secagem a baixa temperatura das amostras como preparação para análise no Difractómetro de Raios-X Philips X-Pert Pró.

5.2.5 Análise termogravimétrica (ATG/DTG) e calorimétrica (DSC)

Com a análise termogravimétrica, obtém-se um termograma contínuo da variação de massa de um material em função da temperatura a que este é aquecido, através de aquecimento/arrefecimento a velocidade constante. Neste registo figuram variações mais ou menos acentuadas correspondentes a alterações químicas no material como por exemplo desidroxilação, oxidação, carbonatação ou hidratação [67, 195]. Cada material tem a sua curva típica, permitindo assim a sua detecção através desta técnica.

A análise calorimétrica diferencial baseia-se na medição de diferenças energéticas entre o material estudado e um material de referência, em função da temperatura, fundamentando-se no facto de que estas diferenças representam reacções exo ou endotérmicas [77]. A sua interpretação parte do relacionamento dos picos obtidos com picos padrão de diversos materiais.

Para estas análises foi utilizado o equipamento Netzsch STA 409 C. A gama de temperaturas usada situou-se entre os 20 e os 1100°C, com uma taxa de aquecimento de 10°C/min.

5.2.6 Resistência mecânica (à compressão)

Devido à variabilidade de formas apresentadas pelas argamassas de junta e reboco que são retiradas como amostras, foi desenvolvido um processo, implicando a utilização de uma argamassa de confinamento mais resistente e com uma forma regular [221], conforme é possível visualizar na Fig. 5. 8.



Fig. 5. 8 Amostra preparada para ensaio de resistência à compressão

O confinamento foi executado utilizando uma argamassa de cimento e areia siliciosa com traço 1:3, com dimensões de 400x400 mm e o ensaio de compressão foi efectuado, segundo a norma NP EN 1015:11 nos aspectos em que é aplicável para este tipo de provetes, com a prensa electromecânica ETI HM-S do LNEC/LERevPa, utilizando a célula de 200KN ou a de 2KN, conforme a carga máxima a aplicar.

5.2.7 Absorção de água por capilaridade

A especificidade de amostras retiradas de edifícios antigos, com possibilidade de desagregação em contacto com a água e com formas diferenciadas exige a utilização de um ensaio especial para a determinação da absorção de água por capilaridade. O ensaio desenvolvido no LNEC, descrito na Ficha de Ensaio Pa 40.1 [64], foi aplicado às amostras ensaiadas.



Fig. 5. 9 Amostra preparada para ensaio de absorção de água por capilaridade

Esta metodologia de ensaio implica a pesagem de um conjunto formado por cesto de rede, geotêxtil e amostra (Fig. 5. 9). Este conjunto é colocado em tabuleiro com água, de forma a que a tela não desça mais do que 2mm abaixo do nível da água, e é efectuada a sua pesagem ao longo do tempo.

Após determinação da absorção de água, foi igualmente medida a secagem do conjunto, até este ter atingido peso constante.

5.2.8 Visualização no microscópio electrónico de varrimento (MEV)

Esta técnica, aplicada apenas a algumas amostras representativas, permite a visualização detalhada das amostras, dado ter uma resolução na ordem dos 200Å, e a consequente identificação dos compostos formados pela interacção entre pozolanas e cal, assim como dos cristais e demais estruturas constituintes das argamassas [162].

A utilização deste microscópio pressupõe, para este tipo de amostras, a obtenção de uma pequena sub-amostra cuja superfície seja de uma fractura fresca. A amostra é recoberta com uma película de carbono ou metal (usualmente ouro) para formar uma película condutora, permitindo que o feixe de electrões incidente produza a imagem com melhor resolução [29].

A junção de informação proveniente de análise por EDS (Espectometria de Difracção de Electrões) complementa a análise visual, através da caracterização química (elementos), da zona ou ponto em observação.

Para estas análises foi utilizado um equipamento Hitachi S-4100.

5.2.9 Análise da micro-morfologia

Para visualização ao microscópio óptico, foi efectuada a preparação de lâminas delgadas de diversas amostras, segundo o procedimento seguinte [90]:

- corte das amostras até à dimensão de cerca de 25mm de lado
- polimento das lâminas e das amostras
- encapsulamento das amostras em resina epoxy em condições de alto vácuo
- colagem das amostras na lâmina
- desbaste das amostras até espessura de 0,003mm, que possibilita a identificação de minerais ao microscópio óptico

No caso de amostras muito frágeis, que se desfizeram no corte inicial, foi efectuada a sua consolidação com resina epoxy, previamente ao corte.

As lâminas obtidas foram observadas ao microscópio óptico para identificação dos seus constituintes e possíveis interacções entre os mesmos.

5.3 Análise de amostras

5.3.1 Identificação das amostras analisadas

A relação das amostras analisadas encontra-se no Anexo I, conjuntamente com uma descrição básica das suas funções, estado de conservação e datação. Foram analisadas:

- 5 amostras provenientes da estação arqueológica de Tróia (TR 1 a TR 5)
- 16 amostras provenientes de diversos edifícios da ilha de S. Miguel, Açores (SM1 a SM16)
- 15 amostras provenientes da estação arqueológica de Conímbriga (CON1 a CON15)
- 3 amostras provenientes da estação arqueológica de Frielas (FR1 a FR3)
- 2 amostras provenientes do Convento de Santa Cruz (CSC1 e CSC2)
- 2 amostras provenientes do *criptopórtico* do Museu Machado de Castro (MC3 e MC4)
- 1 amostra de betão Romano (BR)
- 1 amostra do reboco exterior da Igreja Matriz de Safara (SF1)
- 1 amostra proveniente da barragem Romana de Álamo (BA)

As amostras foram estudadas seguindo as análises e ensaios estipulados no fluxograma da Fig. 5. 7, embora factores como insuficiência de amostra e friabilidade tenham inviabilizado a execução de algumas análises. Análises específicas, como a microscopia electrónica de varrimento e a visualização de lâminas delgadas foram aplicadas a apenas algumas amostras.

5.3.2 Resultados

De seguida, apresentam-se os resultados gerais ou considerados mais relevantes dos vários métodos analíticos utilizados. Em anexo (Anexo I) as fichas relativas a cada argamassa, contêm os resultados dos vários ensaios realizados.

5.3.2.1 Contextualização e caracterização visual

As argamassas retiradas da estação arqueológica de Tróia provinham fundamentalmente de revestimentos de tanques de salga, situados em zonas distintas, uma mais central e outra junto ao estuário do Sado. A sua constituição é de uma ou duas camadas, tendo sido retirada e analisada apenas uma das camadas. As amostras retiradas junto ao estuário (TR2 e TR3) diferenciam-se das restantes por conterem agregado grosso (areão) provavelmente calcário ou dolomítico, enquanto as restantes amostras contêm areia siliciosa. Todas as amostras são do tipo *opus signinum* e encontram-se em bom estado de conservação.

As argamassas açorianas provêm essencialmente de rebocos exteriores, embora SM 11 e SM 12 sejam amostras de reboco interior e SM 9 e SM 15 amostras de argamassa de junta. As amostras retiradas na zona das Furnas (SM 13 e SM 14) diferenciam-se das restantes, sendo compostas por uma camada interior de coloração cinza sobre a qual foi executado um barramento de cal. A amostra SM 15, de coloração cinza, apresenta elevada consistência e homogeneidade, não sendo distinguíveis os agregados à vista desarmada, que se supõem de elevada finura. As restantes argamassas apresentam uma coloração castanha, contendo partículas de agregado basalto/traquítico ou tufo vulcânico. O estado de conservação é muito variável, encontrando-se muito friáveis as amostras SM 2 (habitação, Ponta Delgada), SM 5 (Forte de S. Brás), SM 9 e SM 10 (Fábrica da Chicória), SM 11 e SM 12 (Fundição de Ferro) e SM 14 (habitação, Furnas).

Em Conímbriga, foram retiradas amostras fundamentalmente de duas zonas : nas Termas do Sul e na Casa de Cantaber. Todas estas amostras são do tipo *Opus Signinum*, constituídas por uma, duas ou três camadas. Adicionalmente, foram analisadas amostras anteriormente retiradas e armazenadas (CON 13, CON 14 e CON 15), representativas de rebocos interiores. As restantes amostras correspondem a revestimentos de tanques, piscinas e banhos, com excepção das amostras CON 11, proveniente de um revestimento de parede da Casa de Cantaber, e CON 12, retirada igualmente da Casa de Cantaber, mas desempenhando a função de revestimento de

pavimento. É generalizado o bom estado de conservação das argamassas, com as excepções das amostras CON 11 e CON 12.

A amostragem efectuada no Convento de Santa Cruz, em Coimbra, foi efectuada apenas numa parede com junta e reboco em argamassa rosada, indicando a presença de pó de cerâmica vermelha. As amostras apresentam aspecto uniforme e um bom estado de conservação.

Designado por Betão Romano, devido às dimensões dos agregados a amostra BR corresponde à camada intermédia de execução de pavimentos designada por *rudus* (entre as camadas *statumen* e *nucleus*), feita com uma argamassa contendo agregado grosso e fragmentos cerâmicos.

As amostras de Frielas foram retiradas do espelho de um canal de água à volta do peristilo (FR 1 e FR 3), sendo compostas por camada fina de reboco contendo cerâmico sobre reboco de cal, e do peristilo de uma habitação, neste caso constituídas por uma única camada do tipo *Opus Signinum*.

Da Igreja Matriz de Safara, Alentejo, foram retiradas amostras de reboco interior, de coloração castanha e fácil desagregação.

De entre várias amostras retiradas do *cripopórtico* do Museu Machado de Castro em Coimbra, figuram neste estudo as argamassas supostamente pertencentes à Época Romana. Trata-se de argamassas de reboco em parede de pedra (MC3) e de junta em parede de tijolo (MC4). As amostras possuem características bastante diferentes: enquanto MC 3 se assemelha a uma típica argamassa de cal e areia, MC4 é uma argamassa terrosa com agregado anguloso.

5.3.2.2 Determinação da fracção solúvel por dissolução ácida

A fracção solúvel determina a distinção entre materiais solúveis e insolúveis em ácido, não sendo contudo definidora de um traço, dado que é difícil definir os limites de dissolução ácida. Embora se parta do princípio que o resíduo representa a parte siliciosa do agregado, a metodologia de ataque com ácido clorídrico, poderá englobar um certo erro devido à dissolução parcial de materiais cristalinos pelo ácido, embora os resultados utilizando diversas concentrações e métodos não se traduzam num consenso sobre esta metodologia [6, 195, 222]. Conforme já explicitado no ponto 5.2.1, as argamassas contendo fragmentos cerâmicos foram sujeitas a ataque com ácido acético.

Tab.5.1 Fracção solúvel e resíduo após ataque ácido (Amostras Tróia)

Amostra	Fracção solúvel (%)	Resíduo (%)
TR1	37	63
TR2	32	68
TR5	28	72

Verifica-se alguma similitude em termos de resíduo/fracção solúvel das três argamassas. Contudo, ao analisar o resíduo constatou-se que enquanto na argamassa TR 2, este era constituído fundamentalmente por pó cerâmico e agregado calcário/dolomítico (Fig. 5. 10), nas argamassas TR1 e TR5 não existiam vestígios deste tipo de agregado, mas antes de areia siliciosa (Fig. 5. 11).

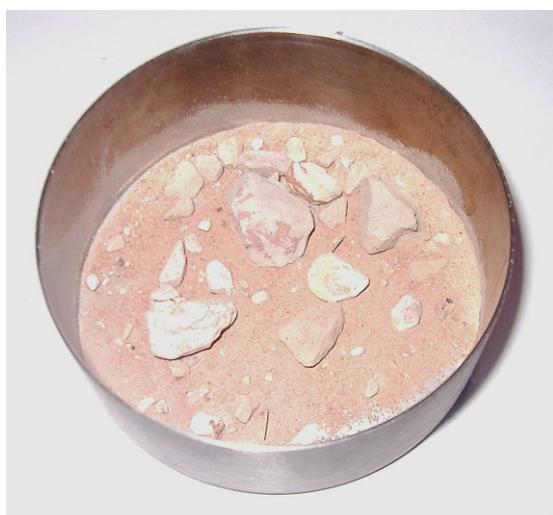


Fig. 5. 10 Resíduo da amostra TR 2



Fig. 5. 11 Resíduo da amostra TR 5 (fracção)

Tab.5.2 Fracção solúvel e resíduo após ataque ácido (Amostras S.Miguel)

Amostra	Fracção solúvel (%)	Resíduo (%)
SM 1	26	74
SM 2	39	61
SM 3	33	67
SM 4	30	70
SM 6	45	55
SM 8	21	79
SM 9	37	63
SM 10	23	77
SM 11	37	63
SM 12	25	75
SM 13 ext	54	46

Amostra	Fracção solúvel (%)	Resíduo (%)
SM 13 int	50	50
SM 14	53	47
SM 15	59	41
SM 16	27	73

Nas amostras açorianas, detecta-se alguma variabilidade na fracção solúvel/resíduo, embora a maioria das argamassas se situe dentro dos limites de 65% a 80% de resíduo. As amostras SM 8 (Forte de S. Brás) e SM 10 (Fábrica da Chicória) apresentam valores superiores de resíduo insolúvel, enquanto que SM2 (habitação, Ponta Delgada), SM6 (Forte de S. Brás) e SM 14 (habitação, Furnas) apresentam uma fracção solúvel bastante elevada. A amostra com maior fracção solúvel é, contudo, SM 15, proveniente das juntas da Doca de Ponta Delgada, a única cuja fracção solúvel é superior ao resíduo insolúvel. O resíduo é constituído usualmente por pó (silte) castanho e agregado basalto/traquítico (Fig. 5. 12) ou tufo vulcânico. A excepção é a amostra SM 7 que é constituída por areia fina, negra, do tipo da areia da praia e tufo vulcânico (Fig. 5. 13).



Fig. 5. 12 Resíduo da amostra SM 3



Fig. 5. 13 Resíduo da amostra SM 7

Tab.5.3 Fracção solúvel e resíduo após ataque ácido (Amostras Conímbriga)

Amostra	Fracção solúvel (%)	Resíduo (%)
CON 1	30	70
CON 2	29	71
CON 3	20	80
CON 4	19	81

Amostra	Fracção solúvel (%)	Resíduo (%)
CON 5 ext	30	70
CON 5 int	27	73
CON 6 ext	28	72
CON 6 int	20	80
CON 7ext	40	60
CON 7int	30	70
CON 8	27	73
CON 9 ext	26	74
CON 9 int	23	77
CON 10	24	76
CON 11	24	76

Existe grande uniformidade nos resultados de ataque ácido das amostras provenientes de Conímbriga. Contudo, a visualização do resíduo produz informações adicionais: usualmente este é composto por partículas de cerâmica vermelha e areia siliciosa (Fig. 5. 15); a camada interior, fundamentalmente calcítica, da amostra CON 6 produziu um resíduo composto apenas por areia siliciosa (Fig. 5. 14).



Fig. 5. 14 Resíduo da camada interior da amostra CON 6



Fig. 5. 15 Resíduo da amostra CON 10

Tab.5.4 Fracção solúvel e resíduo após ataque ácido (Amostras Convento de Santa Cruz, Frielas, Museu Machado de Castro, Betão Romano e Barragem do Álamo)

Amostra	Fracção solúvel (%)	Resíduo (%)
CSC 1	30	70
CSC 2	37	63
FR 1 ext	27	73
FR 1 int	26	74
FR 2	29	71
MC 3	18	82
MC 4	10	90
BR	8	92
BA	33	66

As amostras do Convento de Santa Cruz e de Frielas apresentam resultados bastante homogêneos, com resíduo na ordem dos 65% a 75%, enquanto das amostras provenientes do Museu Machado de Castro resultaram resíduos após ataque ácido mais elevados, sugerindo maior quantidade de agregado.

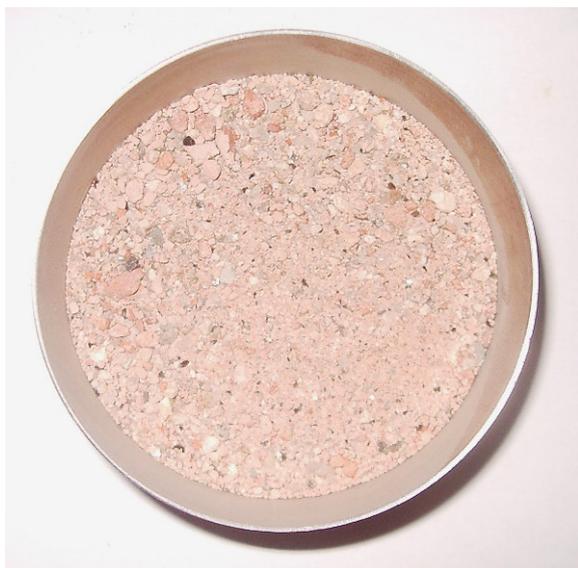


Fig. 5. 16 Resíduo da amostra CSC 2



Fig. 5. 17 Resíduo da camada exterior da amostra FR 1

Considerando, de forma aproximada, que a fracção solúvel representa o ligante e o resíduo insolúvel representa o agregado, na maioria dos casos a relação ligante/agregado encontra-se dentro dos limites esperados para argamassas antigas, que variam entre uma relação em peso 1:2 a 1:4 para argamassas de cal e tijolo moído ou argamassas de cal e pozolana [22]. Naturalmente,

as proporções aproximadas encontradas referem-se aos compostos que constituem o ligante após endurecimento das argamassas e não aos constituintes iniciais e não podem ser directamente comparados com estes, em termos percentuais. Fora destes parâmetros estão as argamassas do Museu Machado de Castro, provavelmente muito arenosas, e as argamassas TR 1, SM 2, SM 6, SM 12, CON 7 ext e CSC 2, com maior percentagem de fracção solúvel. Este facto pode dever-se a maior percentagem de agregado e/ou de produtos de reacção pozolânica solúveis em ácido.

5.3.2.3 Análise granulométrica do resíduo

A análise granulométrica das amostras encontra-se nas figuras Fig. 5. 18 a Fig. 5. 23.

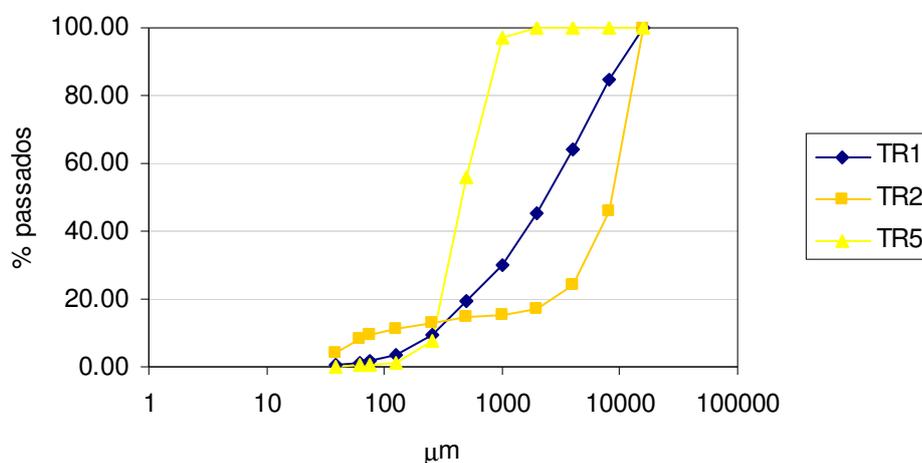


Fig. 5. 18 Análise granulométrica das amostras de Tróia

A análise granulométrica das argamassas de Tróia revela uma composição granulométrica muito diferente do agregado (tijolo e areia) das argamassas estudadas. Enquanto TR1 tem agregados com uma granulometria contínua, TR5 apresenta uma granulometria centrada no intervalo de 0,25mm a 1mm. Devido ao seu conteúdo em agregado dolomítico, de maior dimensão, grande parte da curva granulométrica de TR2 situa-se acima dos 4mm.

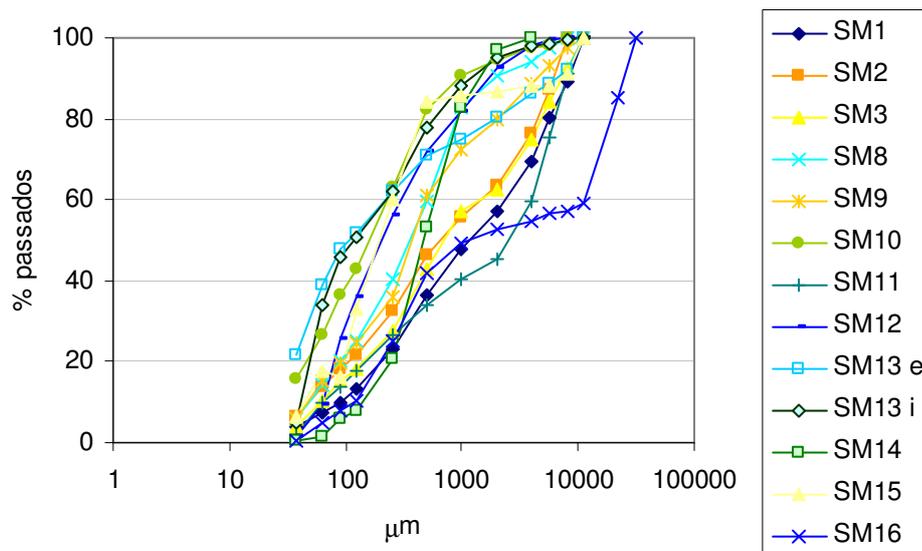


Fig. 5.19 Análise granulométrica das amostras de S. Miguel

As argamassas açorianas apresentam uma granulometria muito variada, não relacionável com os locais de extração ou tipo de edifício. As argamassas com granulometrias mais díspares são SM10 (reboco exterior da Fábrica da Chicória) e SM13 (reboco exterior de habitação nas Furnas), com maior percentagem de finos abaixo de $0,38\mu\text{m}$, assim como SM16, do Forte do Pópulo, com agregado mais grosso do que qualquer uma das restantes argamassas.

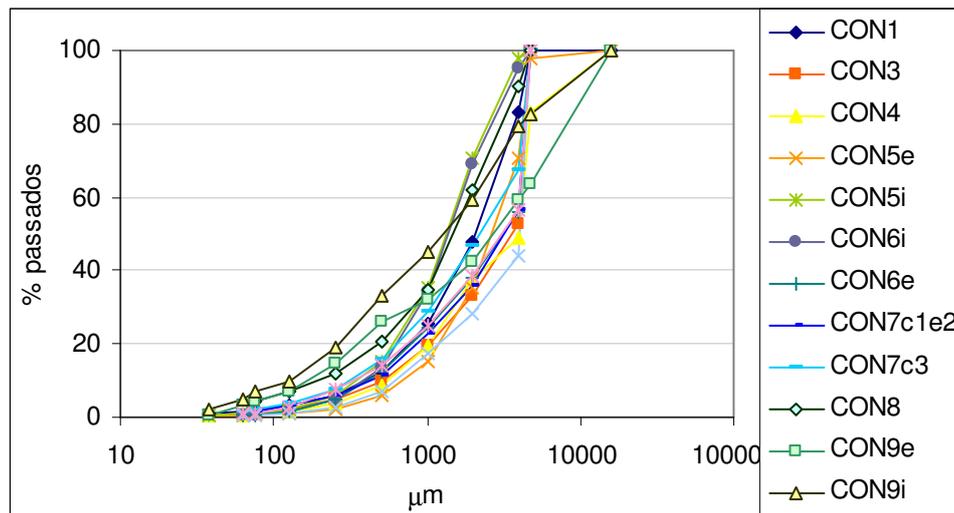


Fig. 5.20 Análise granulométrica das amostras de Conímbriga

Regra geral, as argamassas de Conímbriga apresentam alguma homogeneidade na questão de distribuição granulométrica dos agregados (tijolo e areia). As argamassas CON 8 e CON 9, ambas da Casa de Cantaber diferenciam-se das restantes por um conteúdo superior de material abaixo

de 0,5mm e, no caso de CON 9, por uma maior percentagem de agregado acima de 4,75mm. Contudo, a granulometria da argamassa CON 10, também da Casa de Cantaber, diferencia-se das restantes argamassas, enquadrando-se no fuso granulométrico definido pela maioria das argamassas de Conímbriga, sendo provável a datação diferente desta argamassa em relação às outras que foram recolhidas no mesmo local.

No final da análise dos agregados de cada argamassa, foi efectuada a sua separação pelas diferentes granulometrias, tendo cada parcela sido observada ao microscópio óptico, permitindo desta forma a determinação das quantidades de cerâmico moído e areia. A partir desta determinação, foi calculada a percentagem de cerâmico moído presente e determinada a sua granulometria média (excluindo CON 8 e CON 9), que consta da Fig. 5. 21.

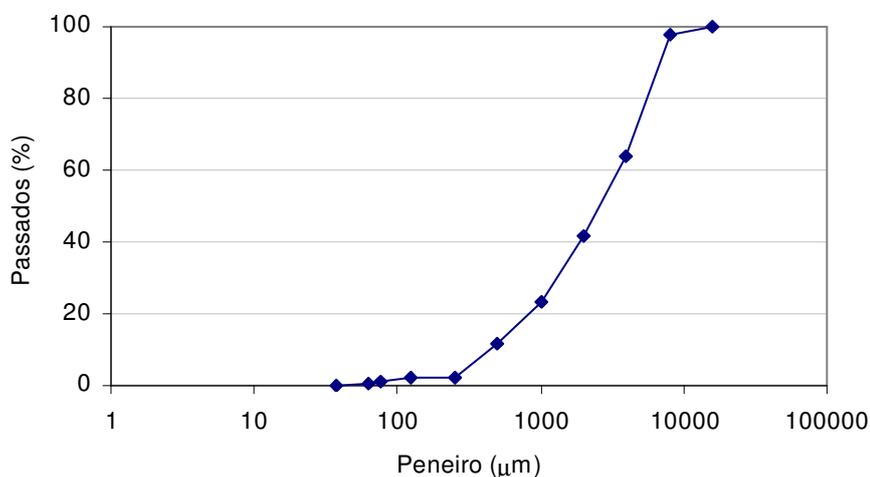


Fig. 5. 21 Granulometria média do agregado cerâmico utilizado em Conímbriga

A granulometria dos agregados das argamassas do Convento de Santa Cruz é similar (Fig. 5. 22). Relativamente aos agregados utilizados em Frielas, verifica-se que a camada exterior de FR2 tem agregado mais grosso do que a camada interior, enquanto FR1 apresenta uma curva granulométrica diferente, com menor percentagem de material abaixo de 0,5mm do que FR1 e com cerca de 60% do agregado compreendido entre 0,5 e 2mm (Fig. 5. 23).

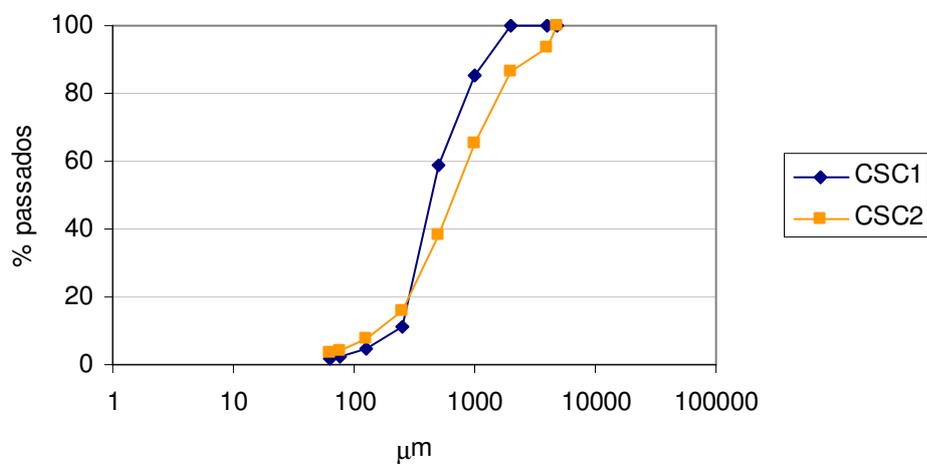


Fig. 5. 22 Análise granulométrica das amostras do Convento de Santa Cruz

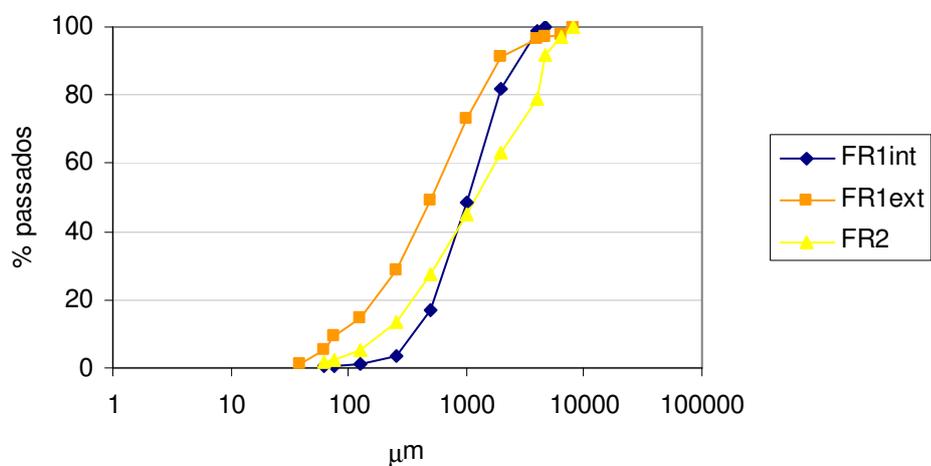


Fig. 5. 23 Análise granulométrica das amostras de Frielas

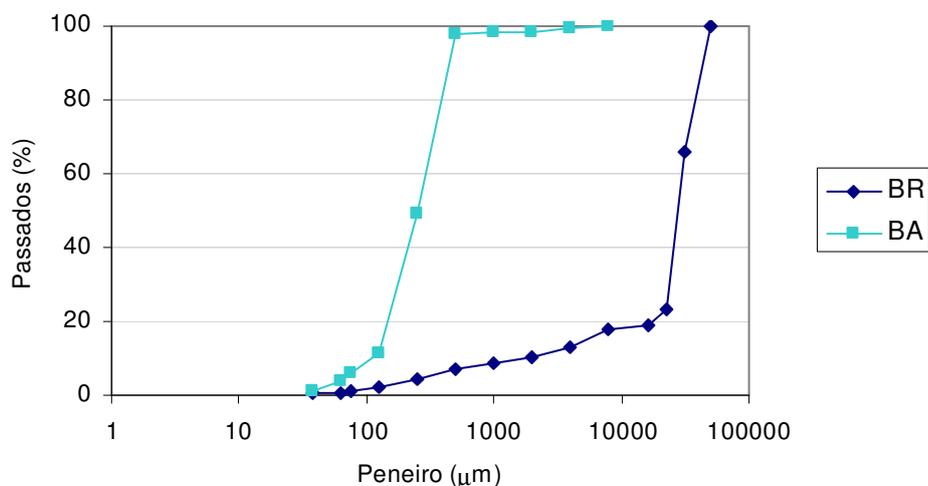


Fig. 5. 24 Análise granulométrica das amostras BR e BA

As amostras BR e BA situam-se nos extremos, em termos granulométricos, entre as argamassas da Época Romana. Uma percentagem significativa dos agregados do Betão Romano tem dimensões acima de 22,4mm (66%) enquanto na Barragem de Álamo foram empregues materiais muito finos, maioritariamente com menos de 0,5mm. Este gráfico (Fig. 5. 24) é exemplificativo da diversidade de composições de argamassas utilizada durante a Época Romana, para diferentes finalidades e usualmente com base em materiais de fácil acesso local.

5.3.2.4 Fluorescência de Raios X (FRX)

Tab.5.5 Composição química determinada por FRX às amostras provenientes de Tróia (%)

Amostra	Fe ₂ O ₃	MnO	TiO ₂	CaO	K ₂ O	P ₂ O ₅	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	P.R.
TR 1	2,04	0,03	0,33	19,80	1,15	0,25	43,04	6,58	2,96	0,82	19,51
TR 2	0,59	0,02	0,04	31,49	0,10	0,05	1,09	0,55	16,25	1,19	45,18
TR 3	1,02	0,02	0,19	36,52	0,20	0,15	8,01	1,28	8,51	0,32	39,28
TR 5	0,21	0,01	0,03	17,50	0,81	0,16	52,13	1,56	1,58	1,07	18,58

A análise química efectuada às argamassas do complexo arqueológico de Tróia revela quantidades muito diferentes de silicato, relacionadas de forma inversa com quantidades de óxido de cálcio e de magnésio, confirmando a presença de agregado calcário/dolimitico em algumas amostras. As quantidades variáveis, contudo baixas de óxido de ferro, relacionam-se fundamentalmente com a presença de partículas cerâmicas, podendo também advir, em menor quantidade, do agregado (feldspatos); o resultado desta análise indica menor percentagem de

fragmentos cerâmicos na amostra TR2 e principalmente na amostra TR5. Observando a quantidade de aluminatos nas diversas amostras, reforça-se esta ideia, assim como a de presença mais abundante de fragmentos cerâmicos na amostra TR1.

Tab.5.6 Composição química determinada por FRX às amostras provenientes de S. Miguel (%)

Amostra	Fe ₂ O ₃	MnO	TiO ₂	CaO	K ₂ O	P ₂ O ₅	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	P.R.
SM 1	7.07	0.15	1.85	15.29	2.24	0.29	39.00	13.25	3.76	3.42	13.30
SM 2	4.93	0.18	1.04	13.89	2.78	0.27	39.02	13.82	1.69	4.95	16.60
SM 3	6.47	0.12	1.78	21.86	1.66	0.37	33.39	10.10	4.66	1.98	16.30
SM 5	8.65	0.17	2.37	12.82	1.85	0.44	40.10	13.26	5.13	4.35	10.40
SM 7	8.28	0.13	2.36	20.22	1.35	0.36	36.41	10.72	5.32	2.49	12.40
SM 8	8.36	0.16	3.46	10.35	2.48	0.76	43.32	14.65	4.02	5.42	7.40
SM 9	7.00	0.18	1.80	12.49	2.57	0.26	43.61	14.94	3.16	3.54	10.40
SM 10	5.53	0.17	1.23	13.96	2.52	0.12	42.36	15.38	1.57	2.71	13.40
SM 11	7.07	0.16	1.83	12.92	2.35	0.32	41.04	13.76	3.62	4.27	11.90
SM 12	5.19	0.17	1.17	9.10	3.00	0.16	42.74	15.44	1.62	7.08	14.50
SM 13ext	1.05	0.06	0.22	40.45	1.43	0.07	17.06	4.78	0.51	1.83	32.70
SM 13 int	3.31	0.17	0.59	12.24	4.26	0.11	47.74	13.93	0.61	4.87	11.50
SM 14	3.11	0.16	0.49	15.33	3.87	0.17	43.53	12.33	0.79	4.59	14.60
SM15	3.30	0.06	0.37	45.27	0.09	0.20	20.56	7.18	1.45	1.09	18.40
SM 16	4.36	0.11	1.09	26.61	1.22	0.23	26.52	9.11	4.59	2.96	22.70

As amostras provenientes de S. Miguel apresentam alguma homogeneidade ao nível da sua composição química. Existe, contudo, uma distinção entre as argamassas de Ponta Delgada e as argamassas provenientes das Furnas (SM13, SM14), verificando-se nestas últimas menores quantidades de óxidos de ferro, titânio e magnésio, questão atribuível a diferenças de matéria-prima (agregados e ligante): poderá ter sido utilizada uma cal mais pura, com menos magnésio conjugado com o facto de serem utilizados como agregados materiais provenientes do próprio local e, portanto, com composição particular.

Analisando as argamassas pela sua composição química, observa-se que o teor de CaO se situa usualmente entre os 10% e os 15%. A amostra SM3, já de si de aparência diferente, parecendo conter maior quantidade de ligante, tem um teor superior de CaO (21,86%), assim como SM16, reboco do Forte do Pópulo com teor em CaO de 26,61%. Conforme era expectável, o barramento de cal executado sobre a argamassa de reboco, correspondendo à amostra SM 13 (Furnas), contém a maior quantidade de CaO (40,45%). As quantidades de silicato são sempre elevadas, rondando os 40%, enquanto as percentagens de aluminato se situam entre os 13% e os 15%.

Novamente, as argamassas SM3, SM13 ext e SM 16, mais cálcicas, contêm menores quantidades de silício e de alumínio, elementos associados ao agregado. Os níveis de óxido de ferro são igualmente elevados (excepto SM 13 ext), relacionados também com a utilização de agregados ricos em ferro. De forma análoga se poderão compreender os níveis elevados de sódio nas argamassas de Ponta Delgada (excepto SM 3). Relativamente ao conteúdo em óxido de magnésio, verifica-se alguma variação, que não se encontra directamente ligada à variação em óxido de cálcio, sugerindo a utilização de ligante de proveniências diferentes, com maior ou menor conteúdo em dolomite/magnesite.

Tab.5.7 Composição química determinada por FRX às amostras provenientes de Conímbriga (%)

Amostra	Fe ₂ O ₃	MnO	TiO ₂	CaO	K ₂ O	P ₂ O ₅	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	P.R.
CON 1	2,29	0,03	0,34	20,32	1,16	0,32	35,48	8,93	2,51	0,69	21,06
CON 2	3,59	0,02	0,63	12,95	1,36	0,35	51,21	11,31	1,46	0,58	14,48
CON 3	3,88	0,05	0,57	12,05	0,94	0,26	42,61	10,87	4,66	0,38	15,67
CON. 4	2,93	0,05	0,45	13,90	1,03	0,31	41,21	9,41	4,48	0,39	17,13
CON 5	3,17	0,04	0,45	17,69	0,86	0,29	34,90	9,12	4,16	0,33	19,96
CON 5 ext	3,16	0,04	0,47	14,77	0,70	0,22	39,48	8,27	4,23	0,27	17,88
CON 5 int	2,81	0,04	0,39	22,05	0,71	0,31	28,42	7,52	4,01	0,32	24,37
CON 6 ext	1,83	0,02	0,29	13,73	1,22	0,11	61,65	7,63	0,54	0,07	11,90
CON 6 int	0,27	0,01	0,05	9,56	0,38	0,03	79,08	1,83	0,24	0,03	8,20
CON7 c1/ 2	2,80	0,05	0,35	20,47	1,53	0,26	41,30	9,61	3,20	0,11	19,50
CON7 c3	2,72	0,05	0,37	19,88	1,64	0,24	41,57	9,82	3,36	0,11	19,30
CON 10	3,45	0,03	0,56	15,66	1,66	0,33	49,09	11,98	0,75	0,18	15,80
CON 12	2,69	0,06	0,40	11,84	1,97	0,39	43,04	9,70	4,09	0,51	13,59
CON 13	0,57	0,03	0,07	13,33	0,39	0,20	54,43	1,68	2,70	0,17	14,02
CON 14	0,74	0,01	0,09	6,16	1,31	0,10	67,06	3,29	0,53	0,51	10,08
CON 15	0,27	0,02	0,03	40,80	0,10	0,09	8,67	0,38	1,27	0,08	38,37

As amostras retiradas de Conímbriga podem ser subdivididas em dois grupos: as argamassas do tipo *Opus Signinum* e as argamassas de cal. Estas últimas (CON 6int, CON 13, CON 14 E CON

15) são facilmente distinguíveis a través dos conteúdos mais baixos em óxidos de ferro, titânio e alumínio.

Dentro do grupo das argamassas de cal, denota-se elevada heterogeneidade: CON 6 int e CON 14 são muito siliciosas e contêm pouca cal (CaO de 9,56% e 6,16%, respectivamente), CON 13 tem um conteúdo intermédio de silicato e óxido de cálcio e CON 15 é uma argamassa extremamente rica em ligante (CaO de 40,8%) e com baixo conteúdo de areia (SiO₂ de 8,67%).

Analisando apenas as argamassas do tipo *Opus Signinum*, as amostras que apresentam maior similitude entre si ao nível de composição química são referentes às camadas exterior e interior de CON 7. As restantes argamassas são caracterizadas por teores variáveis de CaO (12-22%) e SiO₂ (28-62%). Nas argamassas CON 3, CON 4, CON 5 e CON 12 é evidente a utilização de um ligante dolomítico, dados os seus teores em MgO por volta de 4%. Considerando o ligante constituído por calcite e dolomite e/ou magnesite, as argamassas do tipo *Opus Signinum* com maior teor em ligante serão CON 1, CON 5 e CON 7. A quantidade dos restantes óxidos (MnO, P₂O₅, Na₂O) é relativamente baixa.

Tab.5.8 Composição química determinada por FRX às amostras provenientes do Convento de Santa Cruz (%)

Amostra	Fe ₂ O ₃	MnO	TiO ₂	CaO	K ₂ O	P ₂ O ₅	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	P.R.
CSC 1	1.41	0.05	0.33	17.51	2.10	0.31	57.96	5.97	0.31	0.37	12.70
CSC 2	1.82	0.06	0.28	9.68	3.48	0.09	55.71	8.90	5.85	0.61	13.10

As argamassas do Convento de Santa Cruz, embora de aparência semelhante, desempenham funções diferentes. A nível composicional, a argamassa CSC 1 (reboco) é bastante semelhante à argamassa CSC 2 (junta). As diferenças sobressaem no teor de MgO, fazendo supor a utilização de um ligante dolomítico na argamassa de junta. Esta argamassa contém igualmente uma quantidade superior de aluminatos.

Tab.5.9 Composição química determinada por FRX às amostras provenientes de Frielas (%)

Amostra	Fe ₂ O ₃	MnO	TiO ₂	CaO	K ₂ O	P ₂ O ₅	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	P.R.
FR 1 int	0.60	0.03	0.18	14.50	1.51	0.38	66.67	3.28	0.25	0.25	12.10
FR 1 ext	2.00	0.02	0.46	12.05	2.19	0.30	63.34	7.23	0.46	0.61	10.60
FR 2	3.27	0.04	0.61	11.14	2.36	0.41	60.49	10.10	0.75	0.55	9.90
FR 3 ext	3.86	0.04	0.69	10.02	2.72	0.29	57.89	11.99	0.84	0.65	9.90

Das amostras provenientes da estação arqueológica de Frielas, diferencia-se FR 1 int, constituída por uma argamassa de cal e contendo, portanto, quantidades inferiores de óxidos de ferro, titânio

e alumínio. Segundo os dados obtidos, as argamassas parecem basear-se numa composição de areia siliciosa (quantidades de SiO_2 próximas de 60%) e cal aérea (teores CaO entre 10% e 12% e teores de MgO menores do que 1%). As percentagens de Fe_2O_3 e Al_2O_3 relacionam-se com a utilização de cerâmico moído.

Tab.5.10 Composição química determinada por FRX às amostras provenientes do Museu Machado de Castro (%)

Amostra	Fe_2O_3	MnO	TiO_2	CaO	K_2O	P_2O_5	SiO_2	Al_2O_3	MgO	Na_2O	P.R.
MC 3	1.53	0.14	0.13	28.35	1.37	0.10	32.15	3.40	5.06	0.35	26.60
MC 4	2.41	0.09	0.22	10.91	2.34	0.06	56.12	5.99	6.36	0.36	13.90

Retiradas de locais diferentes e cumprindo funções diferentes, as argamassas retiradas do *Criptopórtico* do Museu Machado de Castro, revelam substanciais diferenças de composição química. A amostra MC 4, retirada de uma argamassa de junta revelou-se mais siliciosa e com menor conteúdo em ligante (considerando os teores em CaO e MgO) do que MC 3; o seu conteúdo em Fe_2O_3 , K_2O e Al_2O_3 é também superior ao conteúdo destes óxidos na argamassa MC 4. Ambas as argamassas têm teores elevados de MgO , sugerindo um ligante dolomítico.

5.3.2.5 Difrração de Raios X (DRX)

Os resultados das análises por DRX às amostras de argamassa encontram-se expressos nas Tabelas Tab.5.11 a Tab.5.14, segundo a sua abundância

Tab.5.11 Análise por DRX às amostras de Tróia

Amostra	TR 1	TR 2	TR 3	TR 5
Quartzo	+++	++	++	+++
Calcite	+++	+++	+++	+++
Dolomite	+	+++	++	+
Aragonite	-	-	+	-
Feldspatos	+	+	+	+
Gesso	-	-	-	Vstg.
Anidrite	+	-	-	+
Halite	-	-	+	+
Trona	-	-	+	-
Pirite	+	+	+	Vstg.
Opala	-	+	+	-

Amostra	TR 1	TR 2	TR 3	TR 5
Zeólitos	-	+	+	-
Filossilicatos	++	+	+	Vstg.

(++++ para muito abundante a + para presente).

As amostras TR 1 e TR 5 têm maior componente de quartzo e menor de dolomite, inversamente às amostras TR 2 e TR 3, sobressaindo o diferente agregado utilizado na composição das argamassas. Em todas as amostras a existência de calcite é relevante, devido à utilização de cal aérea como ligante. A presença de aragonite, ligada a fenómenos de dissolução e re-cristalização, é apenas detectada na amostra TR 3. A presença de halite verifica-se nas amostras TR 3 e TR 5, embora todas as argamassas estivessem em contacto com ambiente salino. Apenas existem vestígios de gesso na amostra TR 5, mas a presença de anidrite estende-se à amostra TR 2. Na amostra TR 3 regista-se a presença de trona ($\text{Na}_3(\text{HCO}_3)(\text{CO}_3).2\text{H}_2\text{O}$). Relacionados com a existência de cerâmico nas argamassas, a presença de piritite e filossilicatos é transversal, com menor incidência na amostra TR 5, que contém menos agregado cerâmico. Possíveis indicadores pozolânicos, a opala e os zeólitos são detectados nas amostras TR 3 e TR 5.

Tab.5.12 Análise por DRX às amostras de S.Miguel

Amostra	SM 1	SM 2	SM 3	SM 5	SM 7	SM 8	SM 9	SM 10	SM 11	SM 12	SM 13 br	SM 13 cin	SM 14	SM 15	SM 16
Quartzo	Vstg.	+	+	+	Vstg.	-	-								
Calcite	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	++++	+++	+++	+++	+++
Magnesite	+	Vstg.	-	-	-	-	+	-	+	+	-	-	-	-	-
Feldspatos	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	++	++	++	+++	+++
Piroxenas	Vest.	++	++	++	++	++	++	++	+	+	-	-	-	-	-
Hematite	-	-	+	-	+	++	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Mica/Ilite	-	-	-	Vstg.	Vstg.	-	-	Vstg.	-	Vstg.	-	-	-	Vstg.	-
Caulinite	Vstg.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Halite	+	++	Vstg.	+	-	++	-	-	Vstg.	-	-	-	Vstg.	-	-
Anidrite	Vstg.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

(++++ para muito abundante a + para presente).

Segundo DRX revela que as presenças mais abundantes nas amostras recolhidas são de calcite (especialmente em SM 13 br., barramento de cal) e feldspatos. Dentro da classe dos feldspatos, detecta-se fundamentalmente a anortoclase e, em menor quantidade, feldspatos alcalinos e/ou plagioclases. Apenas as amostras SM 13 e SM 14, recolhidas na zona das Furnas, possuem menor quantidade de feldspatos. Piroxenas, principalmente sobre a forma de diópsido e augite estão presentes nas argamassas recolhidas em Ponta Delgada, embora nas amostras retiradas da

Fundição de Ferro (SM 1, SM 11, SM 12) a sua presença não seja tão evidente. Nestas últimas amostras é possível detectar a presença de magnesite, que também figura como componente das amostras SM 2 (Forte de S. Brás) e SM 9 (Fábrica da Chicória). A hematite foi detectada nas amostras SM 2, SM7 e SM 8, do Forte de S. Brás. A presença de sais foi revelada em diversas amostras, sob a forma de halite, sendo possível encontrar vestígios de anidrite na amostra SM 1. Dos resultados obtidos por DRX, a amostra SM 15 é a única que apresenta uma banda amorfa, provavelmente constituída por produtos da reacção pozolânica ou hidráulica, devido ao seu elevado teor em CaO face aos resultados da DRX.

Tab.5.13 Análise por DRX às amostras de Conímbriga

Amostra	CON	CON	CON	CON	CON	CON	CON	CON	CON	CON	CON	CON	CON	CON	CON	CON
	1	2	3	4	5	5	6	6	7	7	8	10	12	13	14	15
					int	ext	ext	int	c1e2	c3						
Quartzo	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	++++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	++++	++
Calcite	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++
Aragonite	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-
Dolomite	+	+	+	+	-	+	+	-	-	+	+	+	+	+	+	Vest.
Magnesite	+	++	-	-	-	+	+	Vstg.	-	-	-	-	-	-	-	-
Feldspatos	+	++	+	++	+	++	+	+	++	+	+	+	++	++	++	-
Gesso	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Anidrite	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	+	-	+	+	+	-
Halite	+	+	+	+	-	+	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+
Siderite	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	+	-
Hematite	-	+	+	+	+	+	-	-	+	Vest.	Vest.	+	+	-	-	-
Pirite	Vstg.	+	+	+	+	+	-	-	-	+	-	-	+	-	-	-
Filossilicatos	++	++	++	++	+	++	+	-	++	++	++	++	++	++	+	-

(++++ para muito abundante a + para presente).

As amostras provenientes de Conímbriga são constituídas fundamentalmente por quartzo e calcite, com alguma percentagem de dolomite e/ou magnesite em certas amostras, possivelmente devido à diferente proveniência do ligante. Só se detectou aragonite na amostra CON 13, correspondente a um revestimento interior. Os feldspatos presentes na maioria das amostras, assim como o quartzo, provêm do agregado utilizado. Embora apenas em CON 1 esteja presente o gesso, a anidrite é encontrada em várias amostras, assim como a halite. A pirite, a hematite e os filossilicatos, associados principalmente à presença de cerâmico moído são encontrados em várias amostras. A siderite está presente nas amostras CON 12, com cerâmico moído e CON 14, onde é atribuível ao pigmento ocre.

Tab.5.14 Análise por DRX a amostras do Convento de Santa Cruz, Frielas, Museu Machado de Castro e Barragem de Álamo

Amostra	CSC 1	CSC 2	FR1 ext	FR1 int	FR 3	MC 3	MC 4	BA
Quartzo	+++	+++	++++	++++	++++	++++	+++	++++
Calcite	+++	++	+++	+++	++	++	+++	+++
Aragonite	-	-	-	-		+	-	-
Dolomite	++	-	-	-	+	+	++	-
Feldspatos	-	++	++	++	++	++	++	+++
Gesso	-	+	-	-	-	-	-	-
Anidrite	+	+	Vstg.	-	-	-	-	-
Pirite	-	+	-	-	+	-	-	-
Hematite	+	+	-	-	-	-	-	-
Zeólitos	+	-	-	-	+	-	-	-
Filossilicatos	+	+	-	-	+	-	+	-

(++++ para muito abundante a + para presente).

Nas amostras pertencentes à mesma parede do Convento de Santa Cruz é possível verificar diferenças de composição: enquanto CSC 1, argamassa de reboco tem dolomite e zeólitos, são evidentes os minerais gesso e pirite, para além de feldspatos na argamassa de junta. Relativamente às amostras retiradas de estação arqueológica de Frielas, os componentes principais são quartzo e calcite; a amostra FR 3 diferencia-se, contendo dolomite, pirite, filossilicatos e zeólitos. Também com calcite e quartzo como componentes base, as argamassas do Museu Machado de Castro contêm ambas dolomite. Na argamassa MC 3 foi encontrada aragonite. A amostra proveniente da Barragem de Álamo contém principalmente quartzo e menores quantidades de feldspatos e calcite.

De uma forma geral, as argamassas, ressalvando as provenientes dos Açores, são constituídas por quartzo e calcite, com exceções quando o agregado é dolomítico. O ligante muitas vezes contém magnesite e/ou dolomite para além de calcite. Denota-se a existência de sais solúveis em grande parte das argamassas, sob a forma de gesso, anidrite ou halite.

As argamassas de S. Miguel têm como constituinte principal, para além da calcite, os feldspatos e as de Ponta Delgada apresentam como componente piroxenas derivadas dos agregados vulcânicos.

5.3.2.6 Análise termogravimétrica (ATG, DTG) e análise calorimétrica (DSC)

Através do recurso a análises térmicas é possível determinar os componentes das argamassas (com a ajuda da DRX e FRX) e quantificá-los, através das reacções químicas que vão ocorrendo com o aumento de temperatura. Contudo, devido a diferentes formas de cristalização e tamanho, o comportamento dos minerais não é uniforme, e as reacções podem ocorrer a temperaturas distintas. Vários autores estudaram o comportamento térmico dos minerais isoladamente [76, 77, 126] ou de argamassas [2, 61, 94, 113, 124, 136, 140, 150, 167, 195, 197, 244] contribuindo para uma melhor leitura dos fenómenos evidenciados por este tipo de análise. É nestas publicações que se baseia a seguinte descrição dos fenómenos avaliados por análise térmica.

No caso das argamassas, é consensual que as perdas de massa observadas na análise termogravimétrica até aos 500/650°C se devem à libertação da água adsorvida, da água de hidratação e da desidroxilação dos diversos compostos [140, 195]. Neste intervalo, a saída da água adsorvida e de água de hidratação dos minerais argilosos dá-se no intervalo até aos 250°C (visualização de picos endotérmicos na análise por DSC), enquanto que a água de hidratação dos aluminossilicatos, hidróxidos de ferro e matéria orgânica é libertada a temperaturas entre 200°C e 650°C [140, 197]. Contudo, a existência de pico na zona entre os 120-200°C, evidenciado como um pico duplo endotérmico na análise DSC, é indicativo da presença de gesso [61, 140]. Os minerais argilosos produzem analogamente picos endotérmicos na região de 500-600°C.

Componentes fundamentais das argamassas, os carbonatos, sobre a forma de calcite (CaCO_3), magnesite (MgCO_3) e dolomite ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), produzem efeitos de perda de massa a partir dos 600°C. Tendo em conta os minerais puros (e não recarbonatados, como acontece nos ligantes das argamassas), os picos da calcite, magnesite respectivamente cerca dos 960°C, 690-730°C [77, 126]. No caso da dolomite, são produzidos dois picos, nas zonas de 730-790°C e de 930-940°C [77, 126]. Quando o CaCO_3 se encontra cristalizado sob a forma de aragonite é visível um pico endotérmico a cerca de 440°C, correspondente à sua transformação em calcite [77, 140]. Quando estes minerais estão presentes nas argamassas, variações na dimensão dos cristais induzem mudanças nos resultados da análise térmica, questão especialmente sensível no caso da calcite [77, 140, 195]. A saída de CO_2 é evidenciada a temperaturas mais baixas, com a diminuição do tamanho do grão da calcite, criando perdas de massa que podem ser iniciadas em temperaturas tão reduzidas como 500°C, segundo Santos Silva [31]; contudo, usualmente a existência deste carbonato é verificada através da formação de picos endotérmicos na gama de temperaturas entre os 650°C e os 900°C [61, 126, 140, 167, 180]. Segundo Moropoulou [140], a descarbonatação da magnesite existente nas argamassas dá-se no intervalo de 450-520°C e a calcite, quando associada à magnesite, descarbonata na zona de 700-900°C. Ainda segundo a mesma autora, perdas de massa na zona dos 750°C indicam a saída de CO_2 da calcite re-carbonatada, com

inclusão de material cimentício. As perdas de massa acima de 900°C são atribuídas à descarbonatação dos agregados calcários por Santos Silva [195].

No caso das argamassas não se encontrarem completamente carbonatadas, serão visíveis os efeitos de desidroxilação da portlandite (Ca(OH)_2) e/ou brucite (Mg(OH)_2). A portlandite produz um pico na zona dos 400-520°C [140, 195] e a brucite a temperaturas entre os 350°C e os 420°C [113, 140].

O quartzo é usualmente detectado devido ao pico endotérmico que é produzido pela transformação da fase α na fase β à temperatura de 573°C [77].

Mais ambígua é a detecção de silicatos e aluminatos de cálcio hidratados, sendo o seu comportamento algo similar ao dos minerais argilosos. A saída da água de hidratação das fases C-S-H tipo I e tipo II dá-se a temperaturas entre os 95°C e os 120°C [61, 136]; a perda de água de hidratação de aluminatos hidratados dá-se a temperaturas entre os 110°C e os 320°C [61], embora picos específicos a 280°C, 540°C, 480°C, 550°C e 580°C sejam associados por Moropoulou [140] à libertação da água de hidratação por parte de aluminosilicatos de cálcio hidratados. Alguns autores afirmam que a perda de massa no intervalo de temperatura entre os 200°C e os 600°C é representativa da perda de água de hidratação dos compostos hidráulicos [94, 138, 142], quando não existem reacções de outros compostos neste intervalo térmico. Moropoulou [136] atribui a presença de um pico exotérmico na zona dos 980°C à transformação de minerais argilosos em mulite ou espinela e Luxán [124] relaciona um pico exotérmico a 894°C à presença de silicatos de cálcio hidratados e à conseqüente formação de wollastonite.

As análises termogravimétricas efectuadas às várias argamassas encontram-se nas Anexo I. Em seguida serão apresentados alguns resultados de análises termogravimétricas e de análises calorimétricas diferenciais representativas dos vários tipos de argamassa.

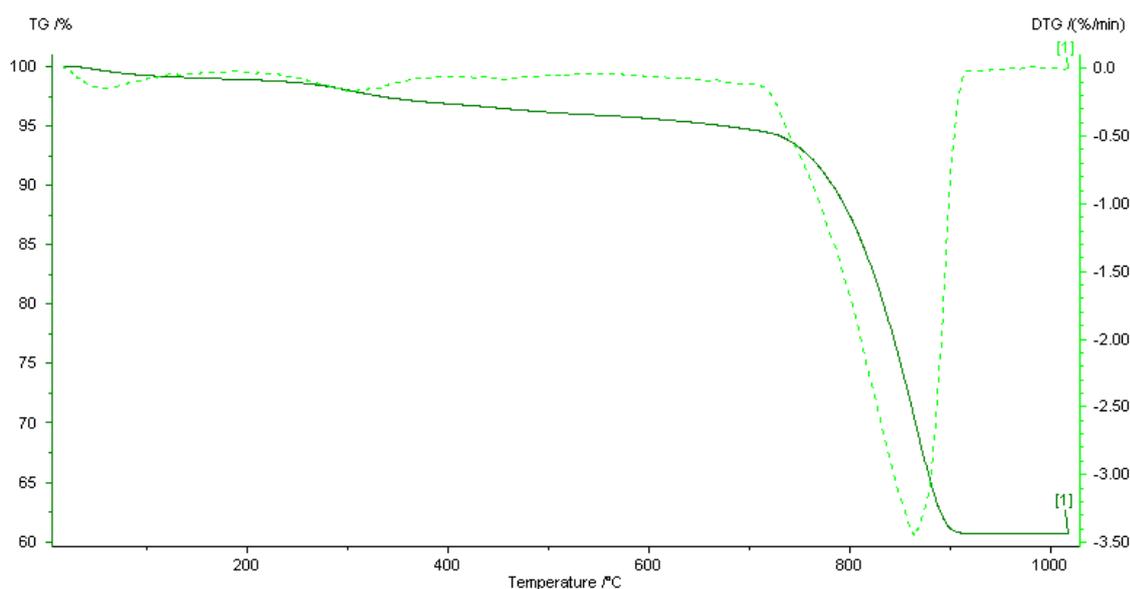


Fig. 5. 25 Análise termogravimétrica da amostra TR 2

Trata-se de uma argamassa com agregado dolomítico e fragmentos e pó cerâmico, em pequena quantidade. A análise térmica revela perdas de massa devidas a água adsorvida dos minerais argilosos (até 200°C) de 1%. Entre os 200°C e os 600°C verificam-se perdas devido à perda de água de hidratação e desidroxilação de minerais argilosos e, eventualmente, à perda de água de hidratação de compostos hidráulicos existentes, sendo neste caso a perda correspondente a 3%. Embora na análise DRX, sejam detectados os minerais calcite e dolomite, a sua decarbonatação expressa-se num pico único e é responsável pelas perdas de massa entre os 600°C e os 1000°C, de 34%.

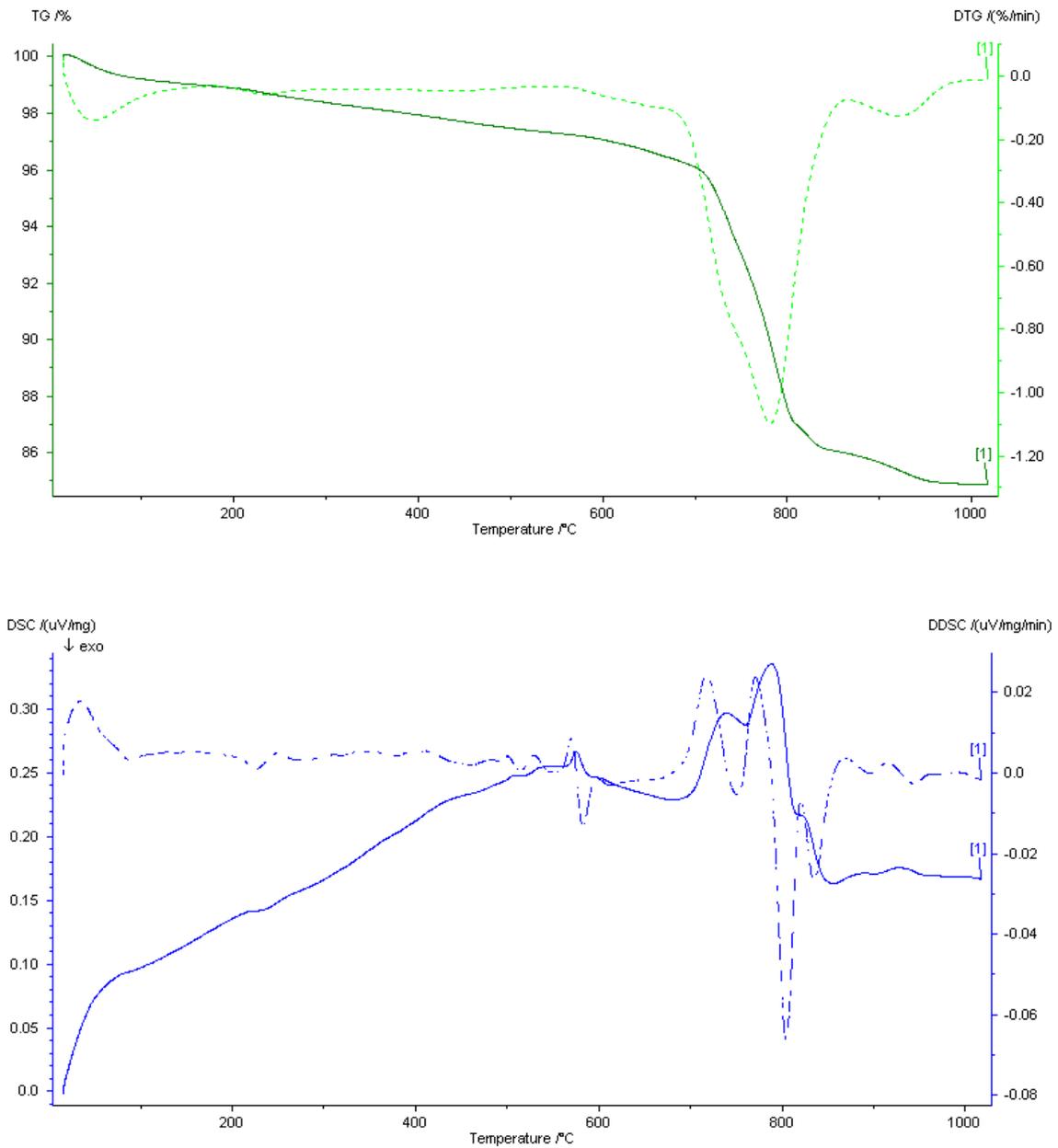


Fig. 5. 26 Análises térmicas da amostra TR 5

a) Análise termogravimetrica b) Análise calorimétrica diferencial

A argamassa TR 5 é composta por agregado silicioso e ligante calcário/dolomítico. A perda de massa inicial de 2% (intervalo até aos 200°C), na análise termogravimétrica, resulta da libertação da água adsorvida, enquanto a perda até aos 580°C se deve à libertação de água de hidratação e desidroxilação de minerais argilosos e, possivelmente, à libertação de água de hidratação de compostos hidráulicos. A cerca de 580°C está patente, na análise DSC, o pico endotérmico correspondente à transformação de fase de α para β do quartzo. A perda verificada entre 580°C e 860°C deve-se à descarbonatação de calcite e dolomite do ligante, sendo visíveis os picos

diferenciados dos dois minerais na análise DSC. A perda final, entre os 860°C e os 1000°C poderá dever-se à segunda reacção de descarbonatação da dolomite, correspondente à descarbonatação do carbonato de cálcio, dado não existir agregado calcário na amostra.

Estas duas análises térmicas são representativas das análises efectuadas às amostras retiradas da Estação Arqueológica de Tróia. As diferenças situam-se principalmente ao nível das perdas produzidas pelos carbonatos, devido à existência de agregado dolomítico em algumas amostras e silicioso em outras. As perdas de água de adsorção dão-se até aos 200°C e são baixas, situando-se entre 1% e 2,5% (TR1, representada no Anexo 1), enquanto que as perdas por libertação de água de hidratação e por desidroxilação se encontram entre os 3% (TR5) e os 6,5% (TR1).

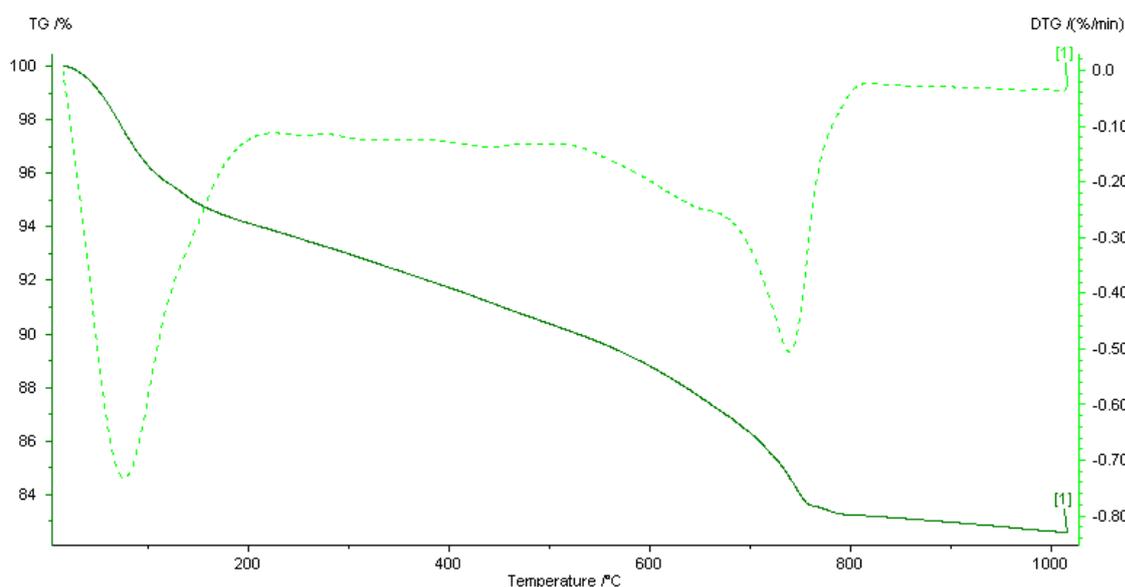


Fig. 5. 27 Análise termogravimétrica da amostra SM 1

Para a amostra SM 1 (Fundição), as perdas de massa associadas à água de adsorção, até aos 200°C, são elevadas, de 6%; consideradas entre as temperaturas de 200°C e de 500°C, as perdas associadas à desidroxilação e perda de água de hidratação são de 3,3%. O pico alargado, com início a 500°C e temperatura de pico a 750°C, foi considerado como englobando a descarbonatação da calcite e da magnesite; contudo, pela gama de temperaturas que engloba e pela sua forma, é possível que sugira a existência de cal contendo compostos hidráulicos [140]. As perdas devido à descarbonatação são de 7,2%. Existe uma perda final, a partir dos 800°C, de 1%.

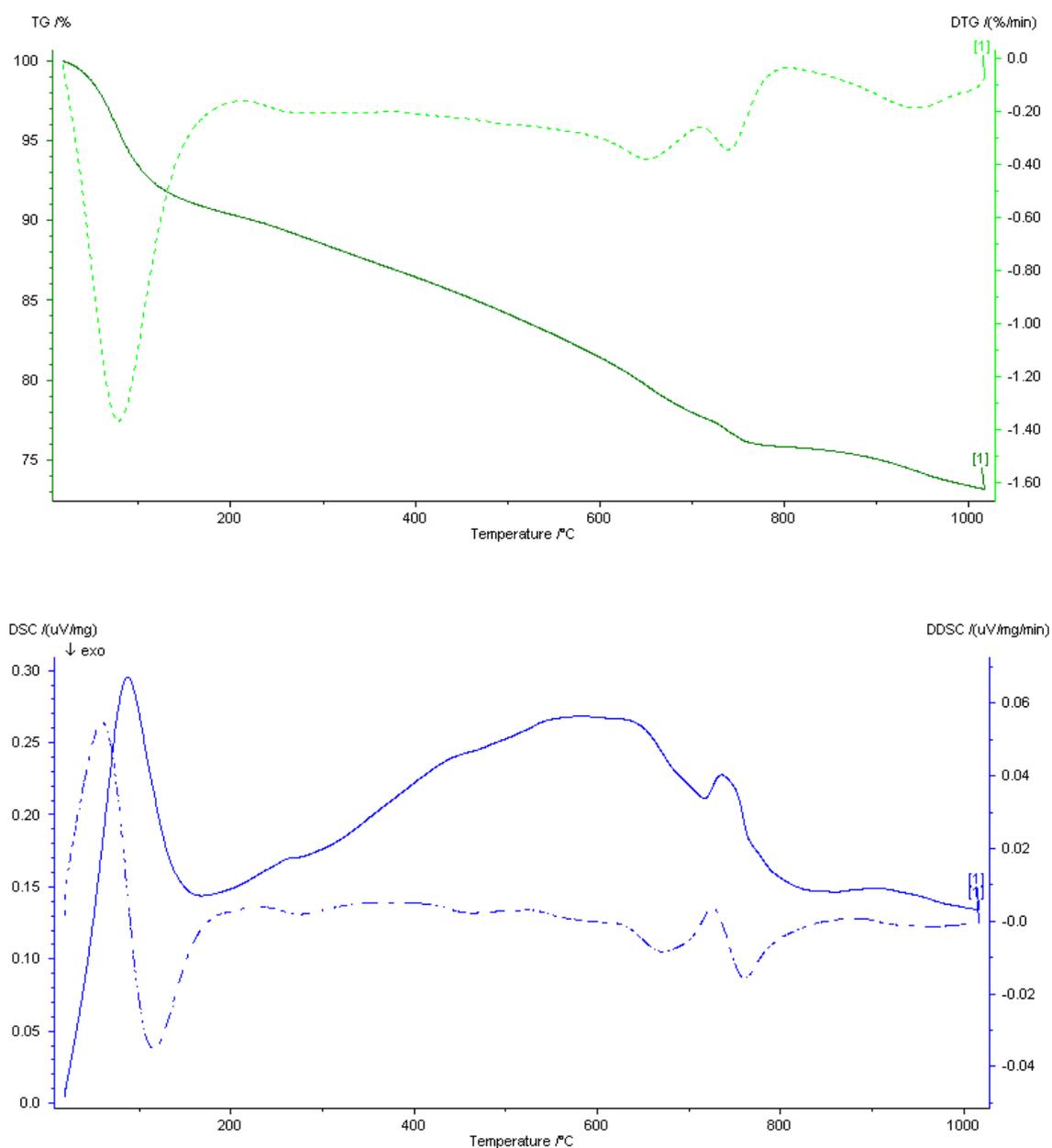


Fig. 5. 28 Análises térmicas da amostra SM 2

a) Análise termogravimétrica

b) Análise calorimétrica diferencial

A amostra SM 2 (moradia, Ponta Delgada) revela semelhanças com SM 1 nas perdas de água de adsorção (9,7%) e de hidratação e desidroxilação, neste caso contabilizadas até aos 600°C (8,3%). A sua particularidade reside nos picos a 650°C e a 740°C, atribuíveis a perdas de peso por parte da calcite e magnesite; a perda total da descarbonatação é de 7,0% (4,8% para a calcite e 2,2% para a magnesite). A perda correspondente ao pico final, situado a 940°C poderá dever-se a transformações de materiais pozolânicos. A análise DSC mostra ganhos térmicos entre os 400°C e 700°C, atribuíveis à presença de matéria orgânica na amostra [94, 126].

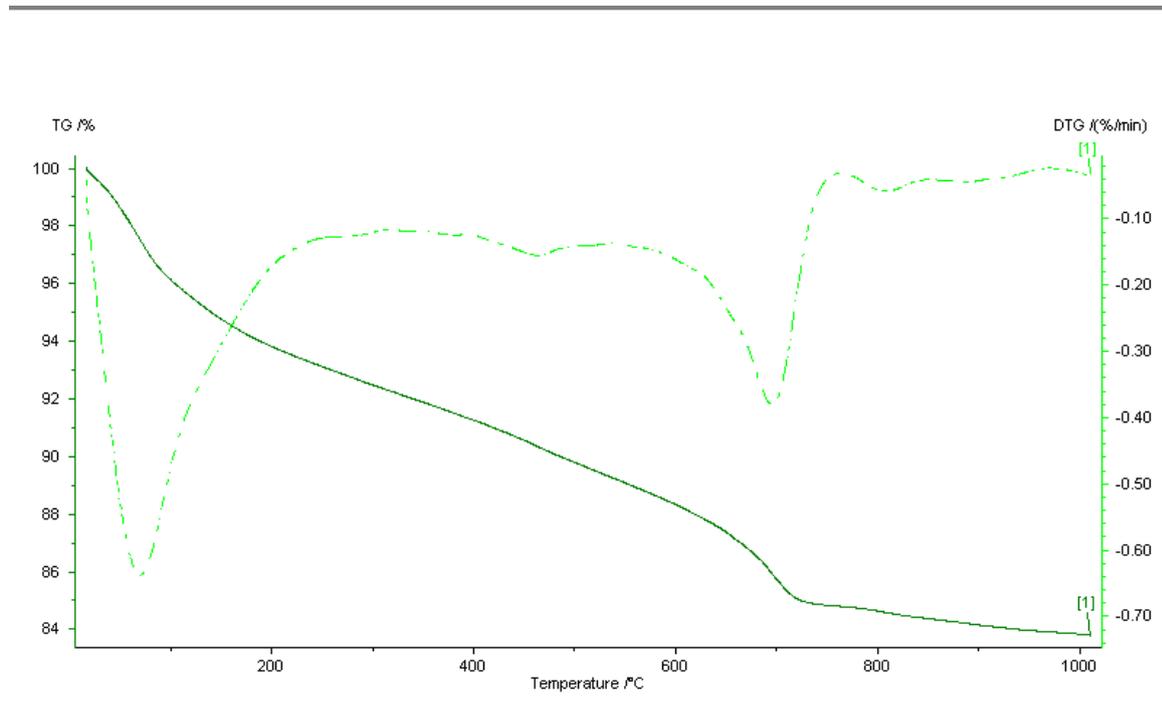


Fig. 5. 29 Análise termogravimétrica da amostra SM 8

A análise térmica da amostra SM 8 (Forte de S. Brás), embora tenha semelhanças com as anteriores, apresenta um pico na zona dos 460°C, possivelmente devido à presença de aluminossilicatos hidratados [140]. O pico a 700°C deve-se à presença de calcite do ligante, provavelmente ligada a compostos hidráulicos. As perdas a temperaturas superiores a 770°C são de 1%.

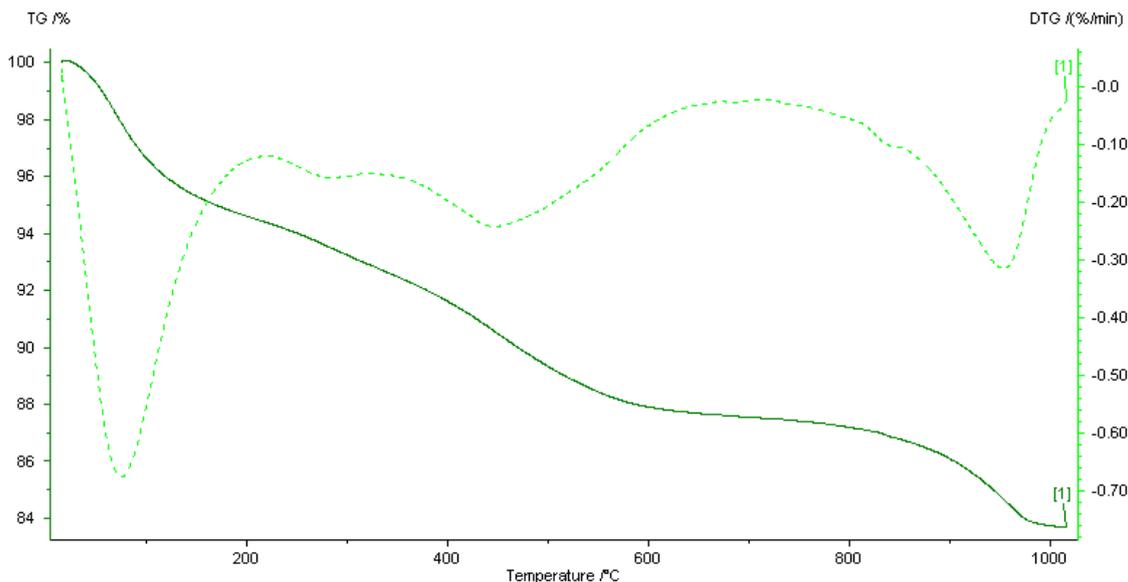


Fig. 5. 30 Análise termogravimétrica da amostra SM 12

Pertencente ao reboco interior da Fundição de Ferro, a amostra SM 12, apresenta dois picos na zona entre os 200°C e os 600°C, um a 280°C e outro a 450°C, ambos característicos da presença de aluminossilicatos de cálcio hidratados. As perdas entre 700°C e 1000°C, podem ser provenientes da calcite e magnesite do ligante (pico a 830°C) e do agregado (pico a 960°C).

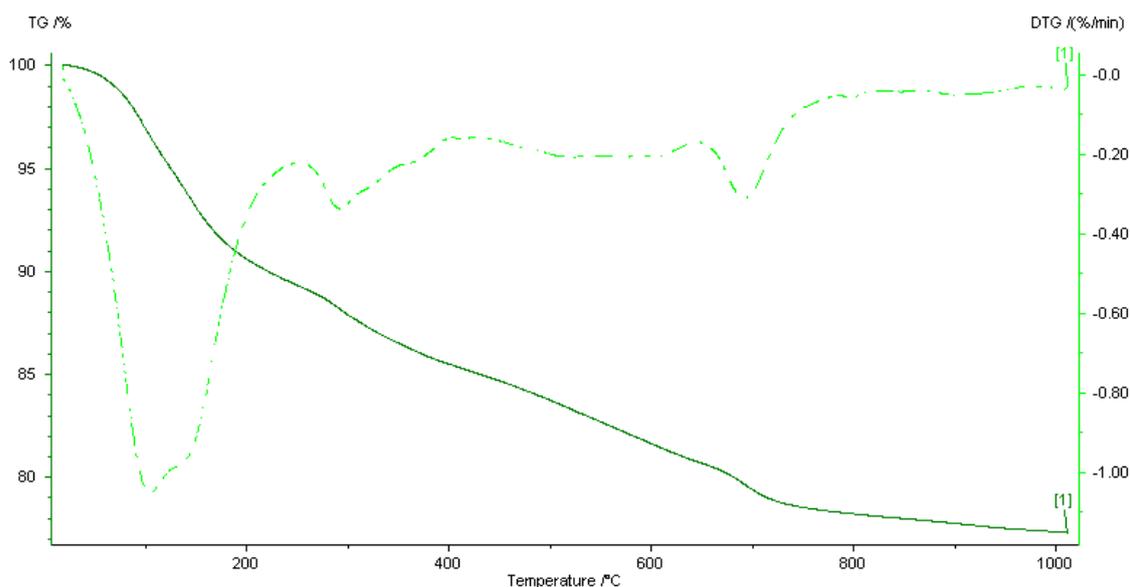


Fig. 5. 31 Análise termogravimétrica da amostra SM 15

A análise termogravimétrica diferencial da amostra SM 15 (Doca de Ponta Delgada) apresenta um pico na zona dos 300°C, atribuível à saída de água de hidratação dos aluminatos de cálcio hidratados [61] e um pequeno pico devido à descarbonatação de calcite a 700°C.

As amostras provenientes dos Açores revelam invariavelmente elevados conteúdos de água de adsorção (3,8% a 11%), excepto algumas amostras provenientes das Furnas e SM 3. As perdas de massa atribuíveis à saída de água de hidratação ou à desidroxilação correspondem a valores entre 3,8% e 10% (exceptuando, novamente, algumas amostras provenientes das Furnas, com valores menores). Neste intervalo, são por vezes evidentes picos que apontam para a existência de aluminossilicatos de cálcio hidratados. A descarbonatação de calcite e/ou magnesite representa perdas entre 3% e 4%. As argamassas das Furnas têm características particulares, geralmente com menores perdas de massa iniciais (excepto SM13, camada interior, com perda inicial de 4,8%) e maiores perdas relacionadas com a decomposição de carbonatos. A argamassa retirada do Forte do Pópulo (SM16) tem uma perda elevada (18,8%) devido à descarbonatação dos carbonatos, maior do que as verificadas nas argamassas provenientes de S. Miguel.

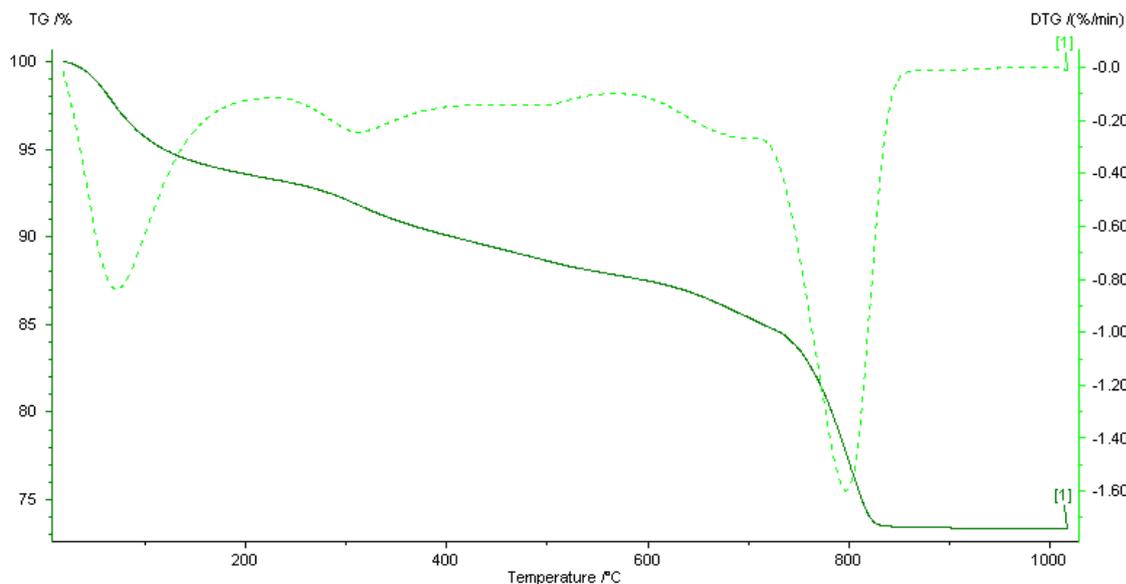


Fig. 5.32 Análise termogravimétrica da amostra CON 3

A análise à argamassa CON 3 (Fig. 5.32) resultou numa curva com uma perda inicial de 6,5%, até aos 200°C e de 6% entre os 200°C e os 600°C, verificando-se um pico na zona dos 320°C, atribuível à saída da água de hidratação de aluminatos de cálcio hidratados [61]. O seu conteúdo em calcite e dolomite, como minerais pertencentes ao ligante, é responsável pelo pico verificado na zona dos 700°C.

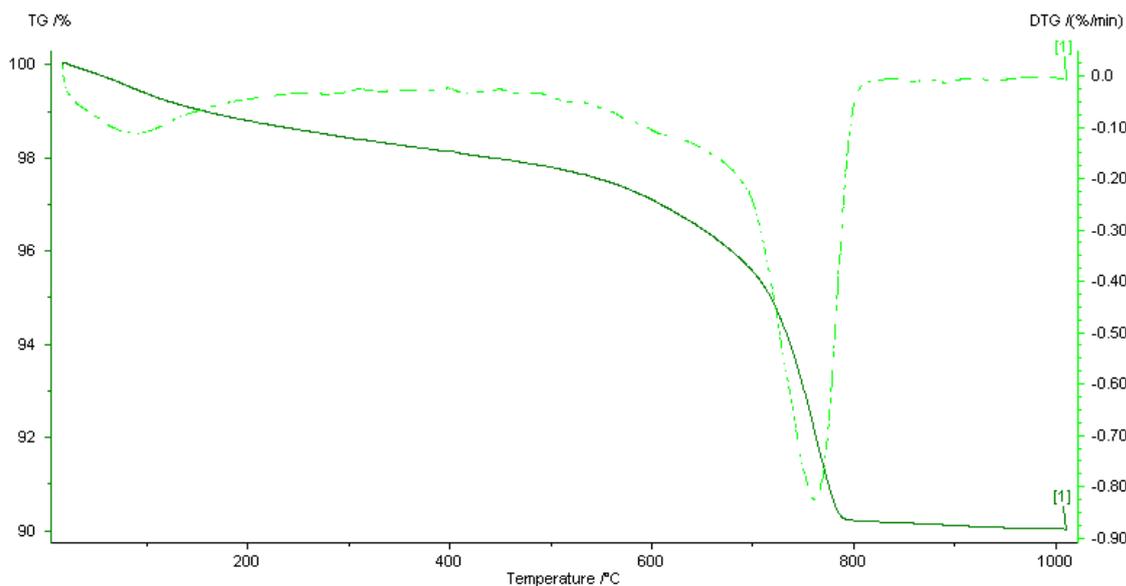


Fig. 5.33 Análise termogravimétrica CON 6, camada interior

A camada interior da amostra CON 6 é representativa de uma 'típica' argamassa de cal com agregado silicioso. As perdas iniciais devido à saída de água adsorvida, de hidratação e de hidroxilação são muito baixas, totalizando 2,3%, enquanto que a perda associada à saída de carbonatos da calcite e magnesite é de 7,7%.

As argamassas do tipo *opus signinum* provenientes de Conímbriga revelam geralmente elevadas perdas de massa aos 600°C, que, entre os 200°C e 600°C estão compreendidas entre 3,0 e 6,7%. As perdas devidas à descarbonatação da calcite, magnesite e/ou dolomite são variáveis, entre 7,7% e 14,5% e de 21,9% para CON 1, que contém um barramento de cal. A argamassa utilizada para o pavimento, CON12 diferencia-se por perdas de massa de 5,5% até aos 200°C e de 2,0% entre os 200°C e os 600°C. As argamassas de cal (CON 6, camada branca, interior, CON 13, CON 14 e CON 15) têm perdas iniciais mais pequenas e entre os 200°C e os 600°C as perdas de massa variam entre 1,1% e 3,0%; as perdas associadas à descarbonatação variam consoante a quantidade de ligante existente.

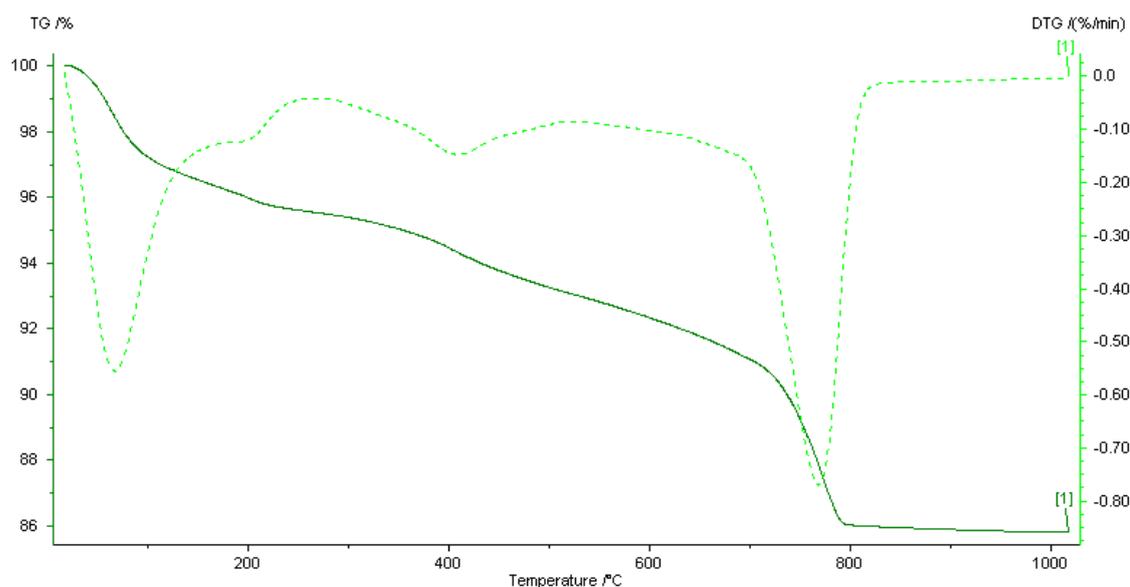


Fig. 5. 34 Análise termogravimétrica da amostra CSC 1

A argamassa constituinte do reboco amostrado no Convento de Santa Cruz (CSC 1, Fig. 5. 34), tem perdas de massa iniciais (até aos 250°C) de 4,5% e um pico a 410°C atribuível à saída de água de hidratação de aluminossilicatos. A saída de dióxido de carbono da calcite corresponde a perdas de 6,3%.

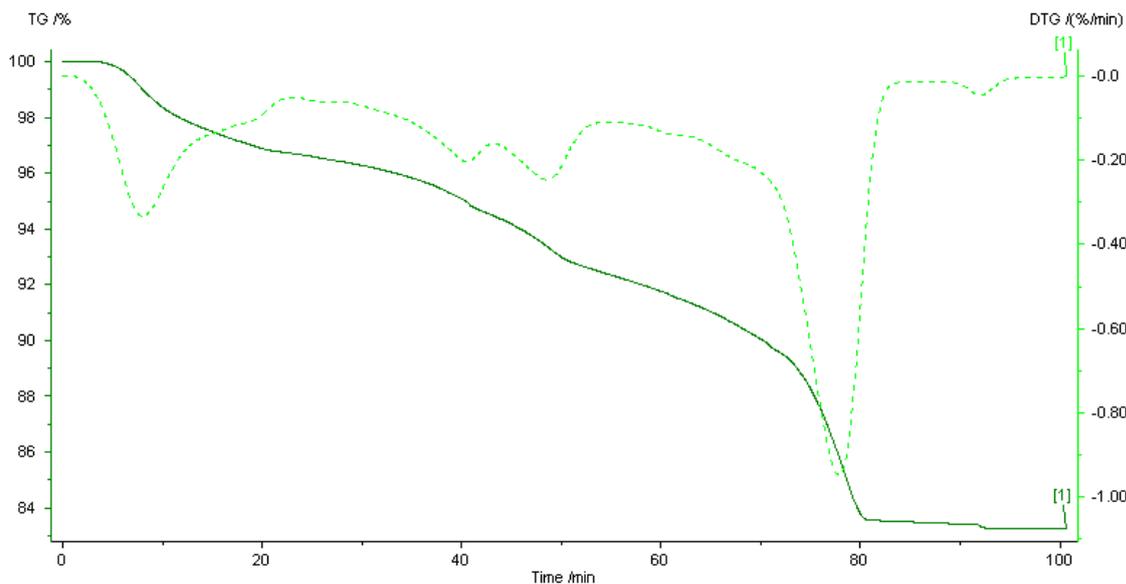


Fig. 5.35 Análise termogravimétrica da amostra CSC 2

Na argamassa de junta da mesma parede (CSC 2, Fig. 5. 35) foram detectados por DRX os minerais pirite e dolomite. O pico existente a 480°C pode estar relacionado com a existência de aluminossilicatos de cálcio hidratados [140] e/ou com a presença de pirite [77]. O pico a 920°C pode estar associado a alguma transformação relacionada com as pozolanas ou à presença de dolomite ou agregado calcário (que tenha sido dissolvido por ataque ácido).

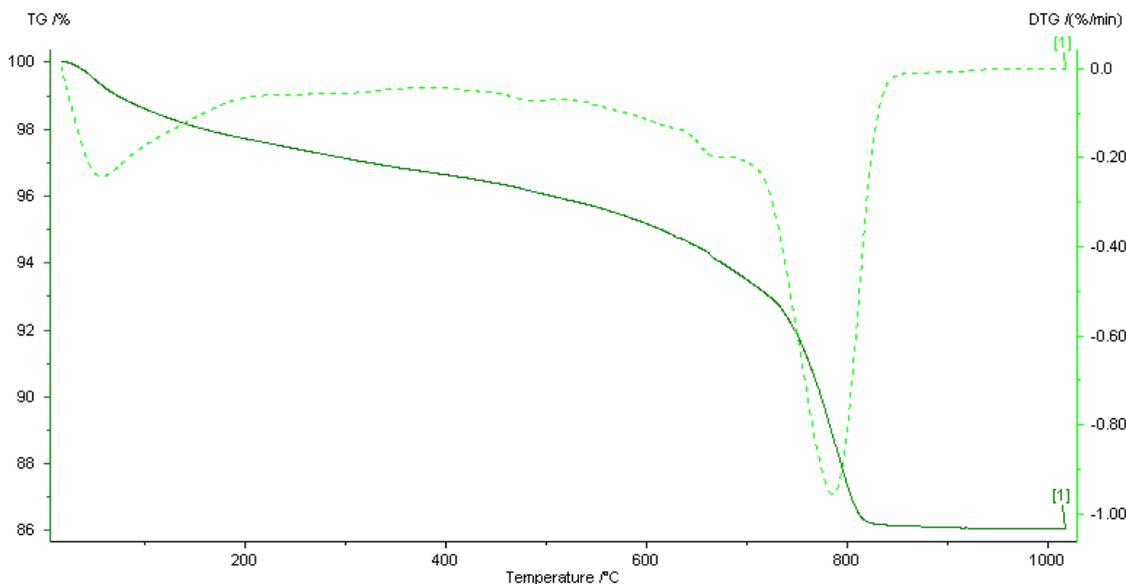


Fig. 5.36 Análise termogravimétrica da amostra FR 1

Relativamente à amostra FR 1 (Fig. 5. 36), de Frielas, as perdas iniciais (0-200°C e 200-600°C) são relativamente baixas (2,3% e 2,5%, respectivamente). As perdas entre 600°C e 1000°C são devidas à presença de dolomite e calcite do ligante.

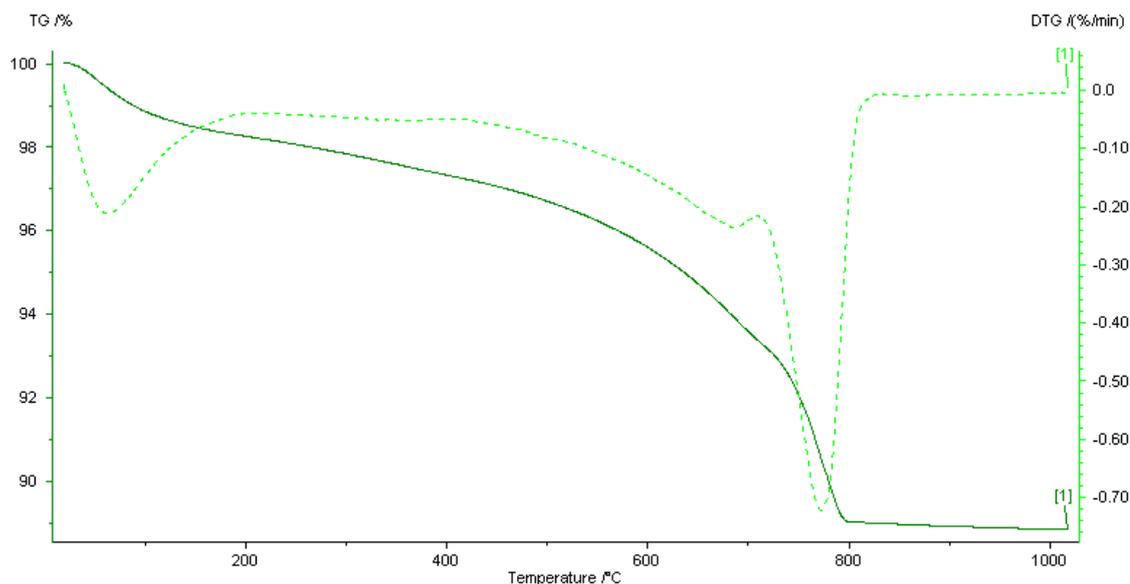


Fig. 5. 37 Análise termogravimétrica da amostra MC 3

A amostra MC 3 (Fig. 5. 37), muito siliciosa, proveniente do reboco do *criptopórtico* do Museu Machado de Castro tem perdas de massa baixas iniciais, totalizando 4,4% e um pico duplo da calcite e dolomite, correspondendo a uma perda de 6,5%.

As amostras analisadas revelam as suas diferenças, principalmente na manifestação de picos na zona entre os 200°C e os 600°C e na individualização ou não de picos devidos à descarbonatação de diversos carbonatos. Contudo, as perdas até aos 200°C variam pouco, entre 1,0% e 2,3% e as perdas entre os 200°C e os 600°C variam entre 2,5% e 3,0%.

5.3.2.7 Resistência à compressão

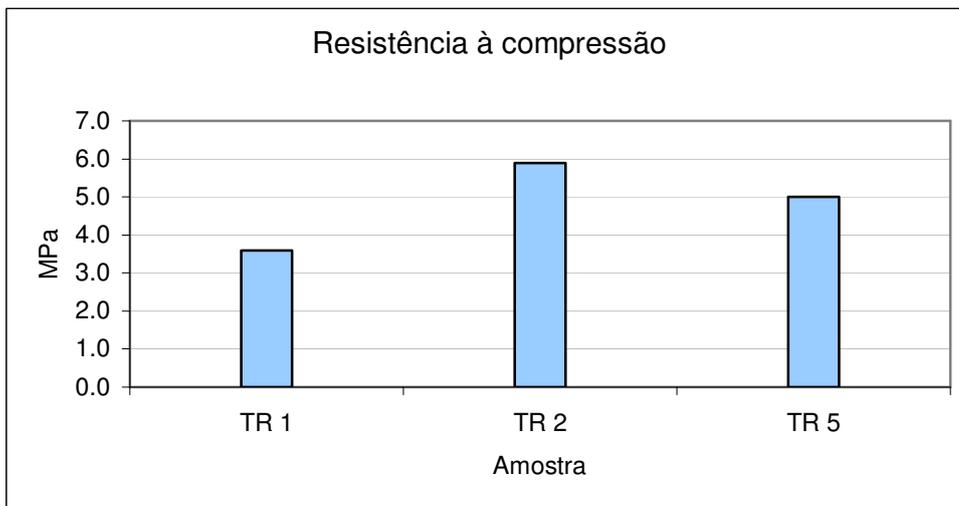


Fig. 5.38 Resistência à compressão das argamassas de Tróia

Dos valores de resistência à compressão obtidos para as três argamassas ensaiadas, TR 2, contendo agregado grosso dolomítico apresenta resistência superior, seguida por TR 5, argamassa com agregado silicioso, contendo menos ligante e menor quantidade de fragmentos cerâmicos. A menor resistência à compressão é protagonizada pela argamassa TR 1, cujo agregado é silicioso, mas que contém a maior quantidade de fragmentos cerâmicos. Os valores atingidos pelas três argamassas são, contudo, elevados, entre os 3,6MPa e os 5,8MPa.

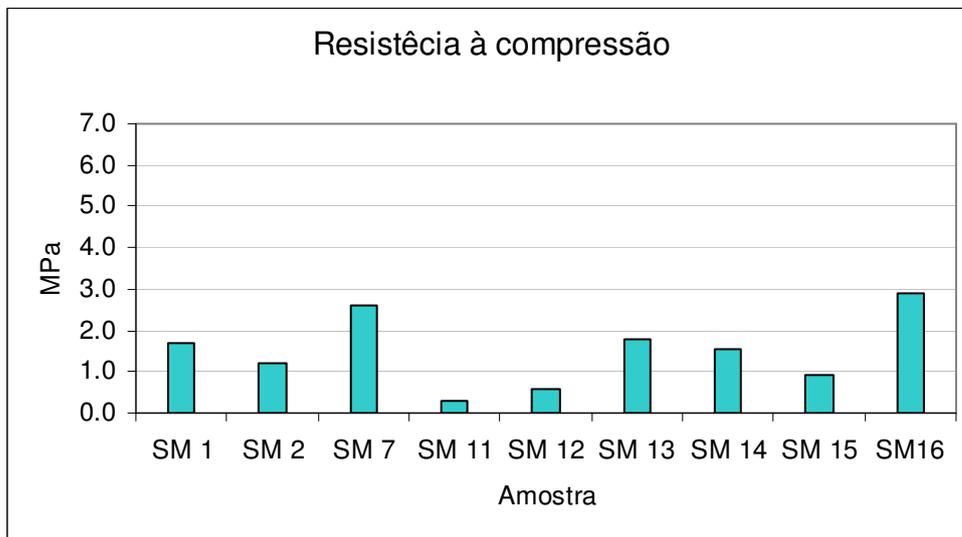


Fig. 5.39 Resistência à compressão das argamassas de S. Miguel

O ensaio de resistência à compressão nas argamassas provenientes de S. Miguel resultou por vezes em valores bastante baixos de resistência (comparativamente com as restantes amostras

analisadas) especialmente evidentes nas amostras designadas por SM 11 (0,3 MPa) e SM 12 (0,6MPa), provenientes do reboco interior da Fundação de Ferro e caracterizadas como apresentando um mau estado de conservação. A maioria das amostras produziu resultados entre 1MPa e 2MPa, excepto SM7 (Forte de S. Brás) e SM16 (Forte do Pópulo), ambas com maior quantidade de ligante. A análise a argamassas mais coesas e em bom estado de conservação como SM 13 (Furnas) e SM 15 (Docas de Ponta Delgada) produziu valores semelhantes aos restantes. A algumas argamassas coesas e potencialmente mais resistentes, como a argamassas SM 3 (Forte de S. Brás), não foi possível efectuar este ensaio devido à dimensão reduzida da amostra.

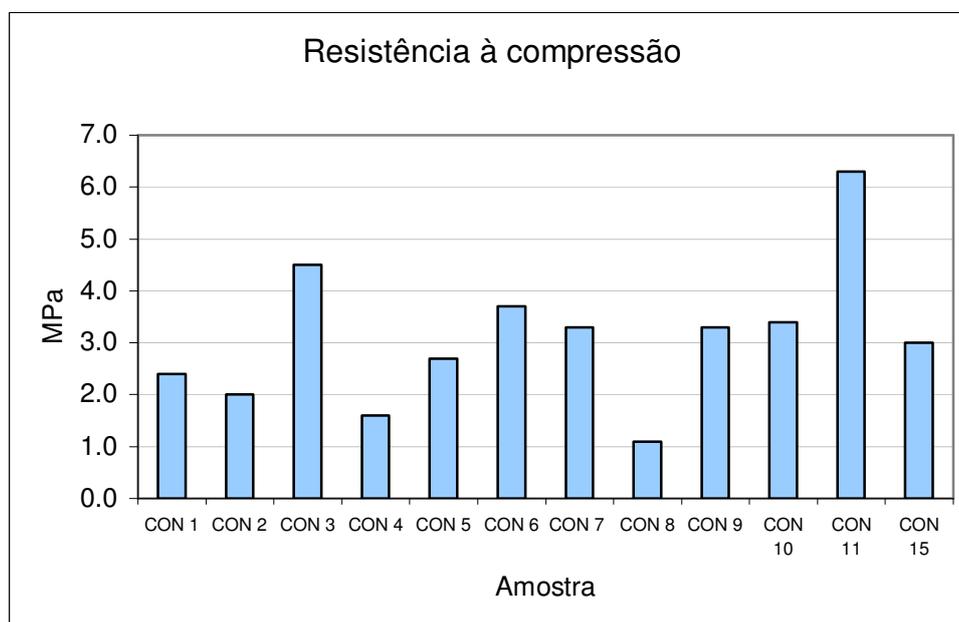


Fig. 5. 40 Resistência à compressão das argamassas de Conímbriga

Os resultados obtidos através da aplicação do ensaio de resistência à compressão às amostras retiradas de Conímbriga são extremamente variáveis, com uma resistência mínima registada por CON 8 (1,1 MPa), argamassa do tipo *Opus Signinum*. Contudo, todos os valores se situam acima de 1MPa e a maioria encontra-se no intervalo de 2MPa a 4MPa. Apenas as amostras CON 3 e CON 11 registam valores superiores (4,5MPa e 6,3MPa, respectivamente).

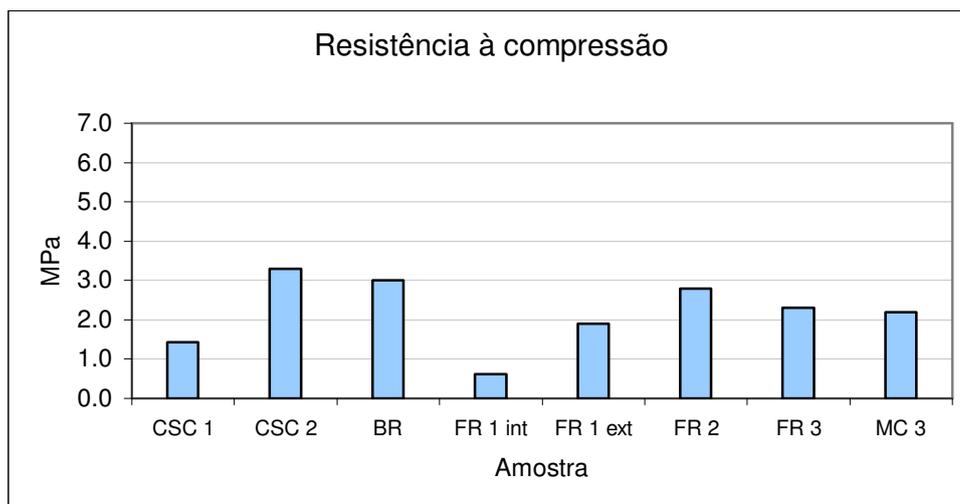


Fig. 5. 41 Resistência à compressão de várias argamassas (Convento de Santa Cruz, Betão Romano, Frielas e Machado de Castro)

As argamassas provenientes do Convento de Santa Cruz caracterizam-se por resistências à compressão muito diferentes: 1,4MPa para CSC 1 (reboco) e 3,3MPa para CSC 2 (junta), resultados que indicam uma adequada resistência de acordo com a função que desempenham.

A argamassa designada por BR, proveniente de uma camada de pavimento apresenta uma resistência de 3,0MPa, que se enquadra dentro dos valores obtidos para argamassas do tipo *Opus Signinum* neste estudo.

Os resultados produzidos pelas argamassas de Frielas apresentam alguma variabilidade. As argamassas FR1 e FR3 têm constituição semelhante e cumprem a mesma função de impermeabilização de um canal de água; os valores obtidos para estas argamassas são semelhantes (1,9MPa e 2,3MPa, respectivamente), com a particularidade da camada interior de FR 1, constituída por argamassa de cal ter fissurado primeiro. A amostra FR 2, pertencente ao reboco de um peristilo e formada por uma única camada, revelou uma resistência ligeiramente superior (2,8MPa).

Efectuando uma análise geral aos resultados obtidos, os valores de resistência à compressão encontram-se na gama de 2MPa a 4MPa, com excepção das argamassas açorianas que apresentaram resultados usualmente entre 1MPa e 2MPa. Poucas amostras obtiveram valores superiores ou inferiores a estes. Segundo Papayianni [98], a maioria das argamassas antigas apresenta baixos valores de resistência à compressão, usualmente abaixo dos 5MPa. Moropoulou [22] obteve resultados entre 3MPa e 4MPa para argamassas Romanas de cal e entre 4,5MPa e 5MPa para argamassas contendo pozolana e 'pó de tijolo', todas com uma função estrutural, exigindo portanto uma prestação superior neste campo, relativamente às argamassas de reboco.

5.3.2.8 Absorção de água por capilaridade

O ensaio de absorção de água por capilaridade foi aplicado às diversas amostras com dimensão significativa, excluindo-se as que se apresentavam demasiado frágeis. Todos os ensaios foram executados simulando a absorção a partir da superfície exterior e, em alguns casos, foi adicionalmente verificada a absorção a partir da superfície interior (camada interior do reboco). Foram registados os valores de absorção capilar que figuram nos gráficos no Anexo 1. Foram adicionalmente calculados os coeficientes de capilaridade e a absorção máxima (absorção às 24h) para as várias amostras ensaiadas, expressos nos gráficos seguintes.

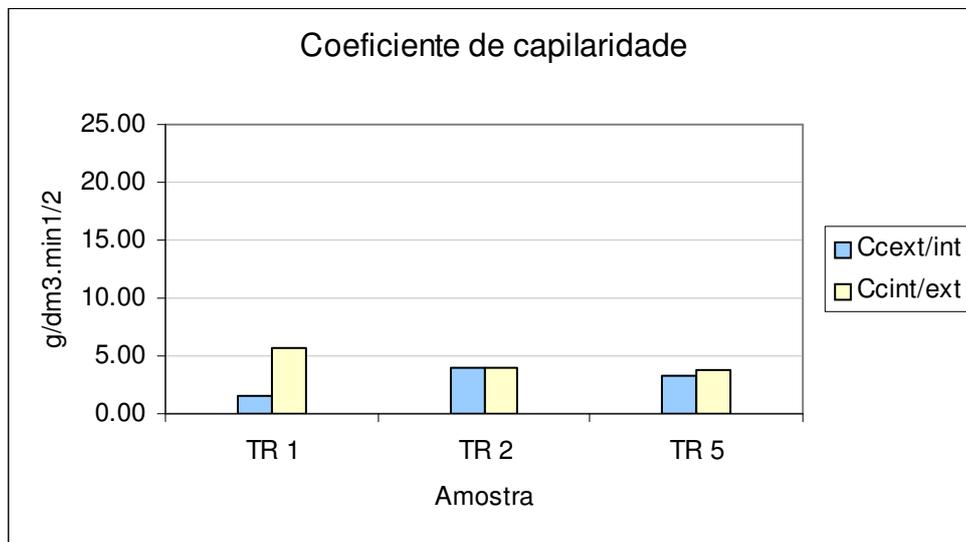


Fig. 5. 42 Coeficiente de capilaridade das argamassas de Tróia

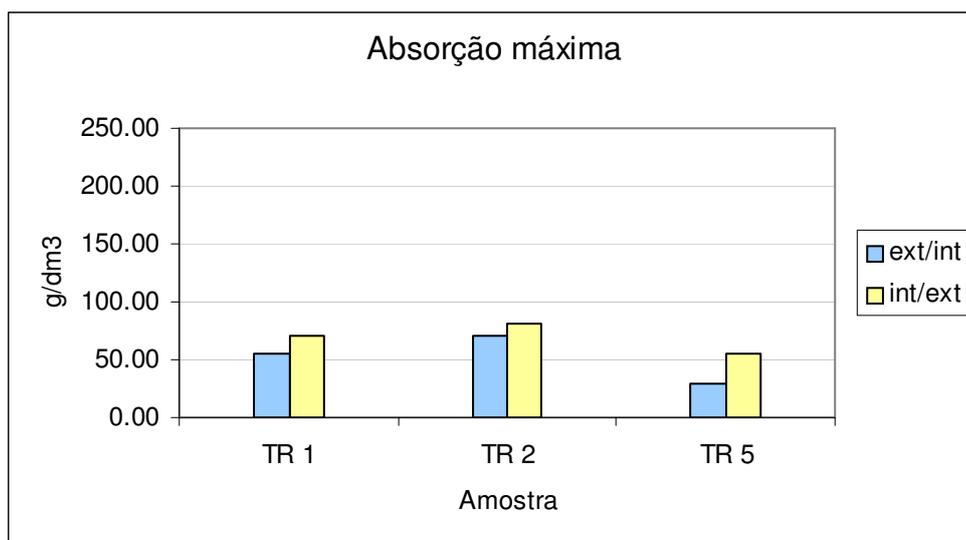


Fig. 5. 43 Absorção máxima das argamassas de Tróia

Os dados obtidos para as argamassas de Tróia indicam, invariavelmente, baixos coeficientes de capilaridade associados a baixas absorções máximas de água. Existe uma relação, embora não proporcional, entre os coeficientes de capilaridade e a absorção máxima. Conforme era expectável, tanto o coeficiente de capilaridade como a absorção total aumentaram quando a absorção foi efectuada pela camada interior das argamassas.

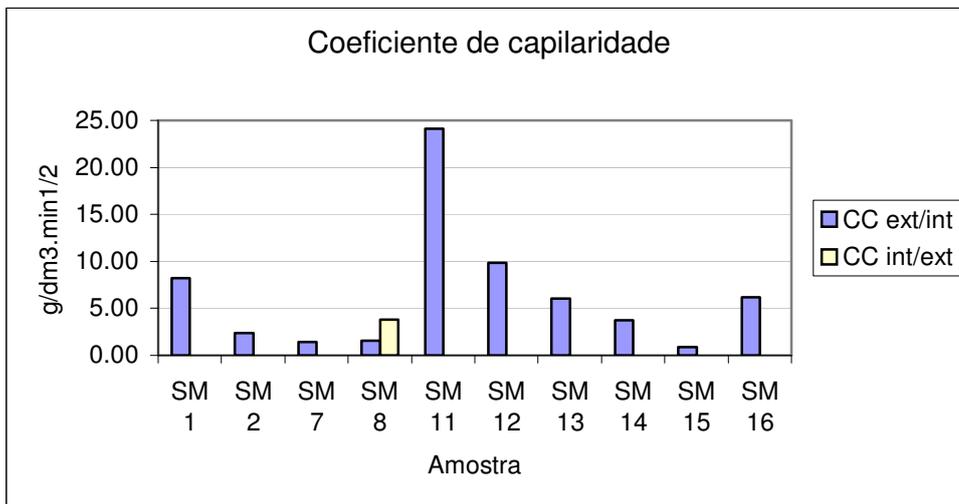


Fig. 5.44 Coeficiente de capilaridade das argamassas de S. Miguel

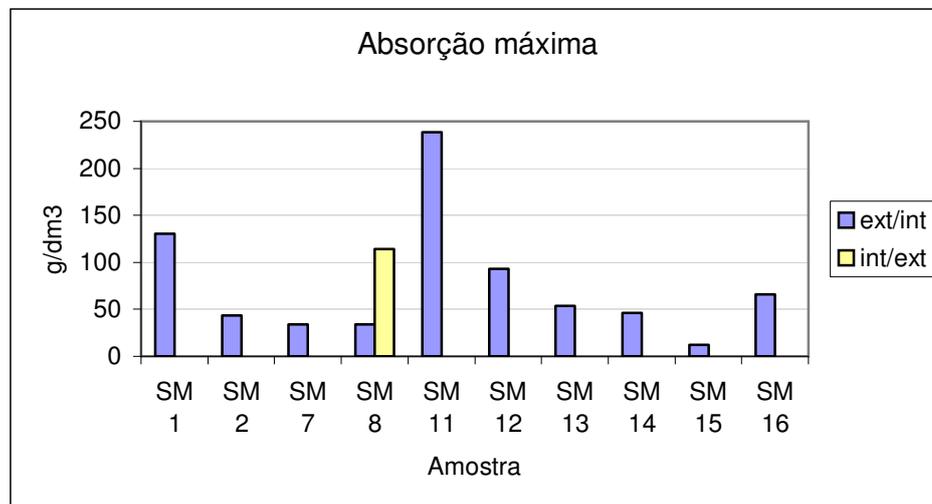


Fig. 5.45 Absorção máxima das argamassas de S. Miguel

As amostras provenientes de S. Miguel apresentam regra geral, baixos coeficientes de capilaridade e uma absorção máxima também reduzida, facto especialmente visível na amostra designada por SM 15, proveniente de argamassa de junta da Doca de Ponta Delgada. As amostras retiradas da Fundação de Ferro (SM 1, SM 11 e SM 12) têm os coeficientes de capilaridade mais altos e a absorção máxima mais elevada, efeito particularmente visível na

amostra retirada de reboco interior (SM 11) onde esta característica não se reveste da mesma importância.

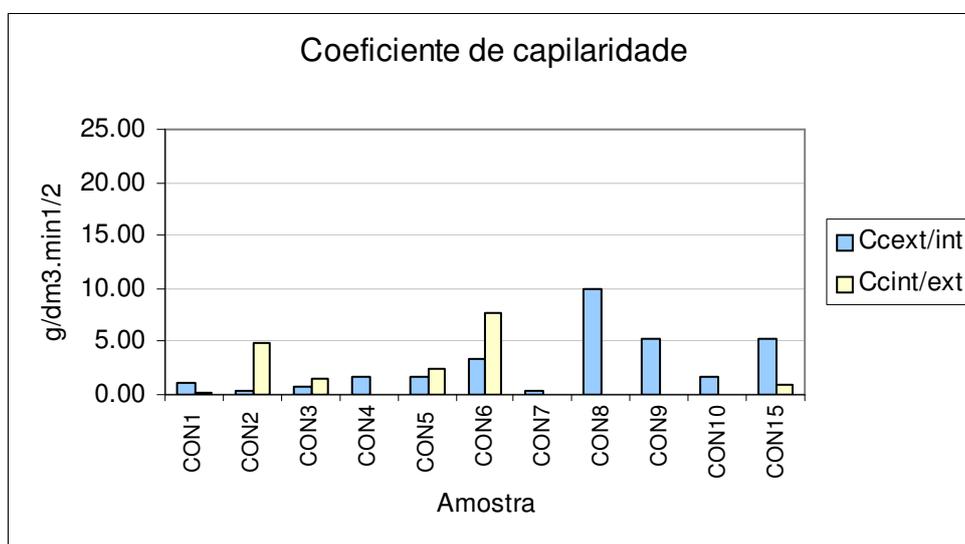


Fig. 5. 46 Coeficiente de capilaridade das argamassas de Conímbriga

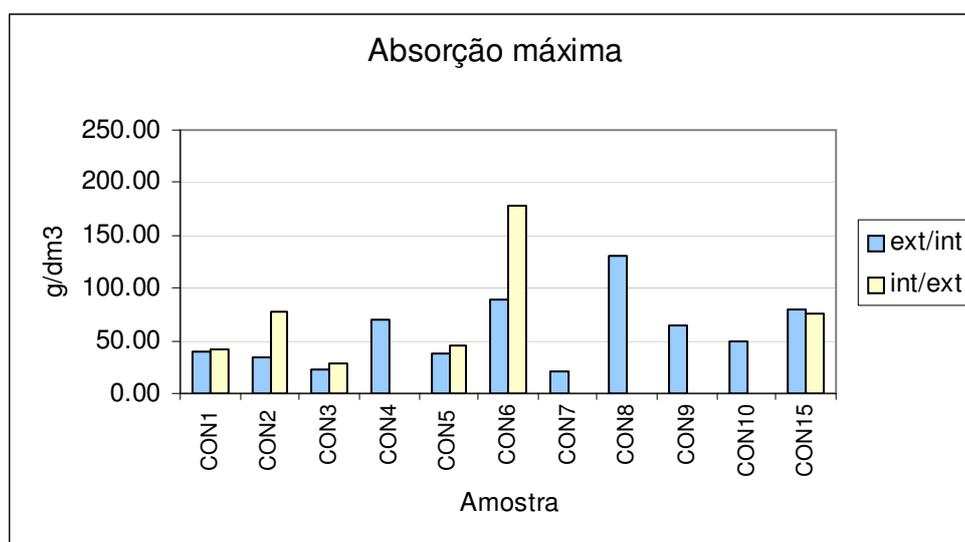


Fig. 5. 47 Absorção máxima das argamassas de Conímbriga

Da mesma forma que as restantes amostras analisadas, as amostras provenientes de Conímbriga revelam coeficientes de capilaridade abaixo dos $10\text{g/dm}^3\cdot\text{min}^{1/2}$. A amostra CON 8, que demonstrou ter a menor capacidade resistente, apresenta o maior coeficiente de capilaridade e a maior absorção de água dentro das argamassas *Opus Signinum*. A elevada absorção verificada pela argamassa CON 6, quando o ensaio é efectuado colocando a camada interior em contacto com a água, deve-se ao facto desta camada ser constituída por uma argamassa de cal aérea e areia siliciosa. O comportamento anómalo da argamassa CON 15, resultando num coeficiente de

capilaridade muito superior quando a absorção é efectuada do exterior para o interior, pode ser explicado pelo patamar observado no gráfico de absorção (Fig. 5. 48), após uma absorção inicial mais rápida (interior/exterior), enquanto a absorção do exterior para o interior se processa de forma sempre gradual.

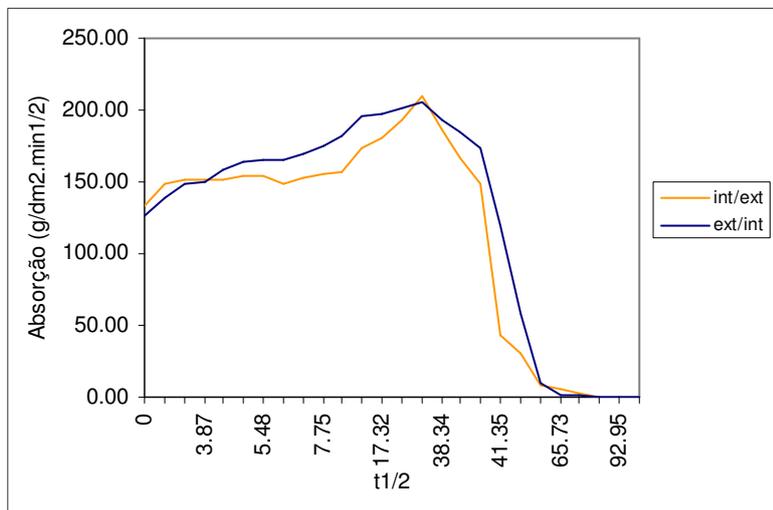


Fig. 5. 48 Absorção capilar da amostra CON 15

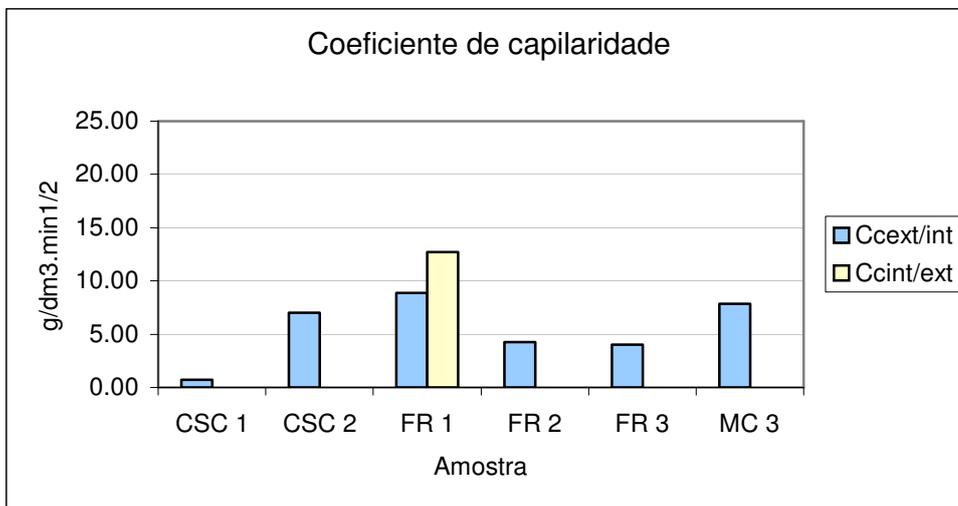


Fig. 5. 49 Coeficiente de capilaridade de várias argamassas (Convento de Santa Cruz, Frielas, Museu Machado de Castro)

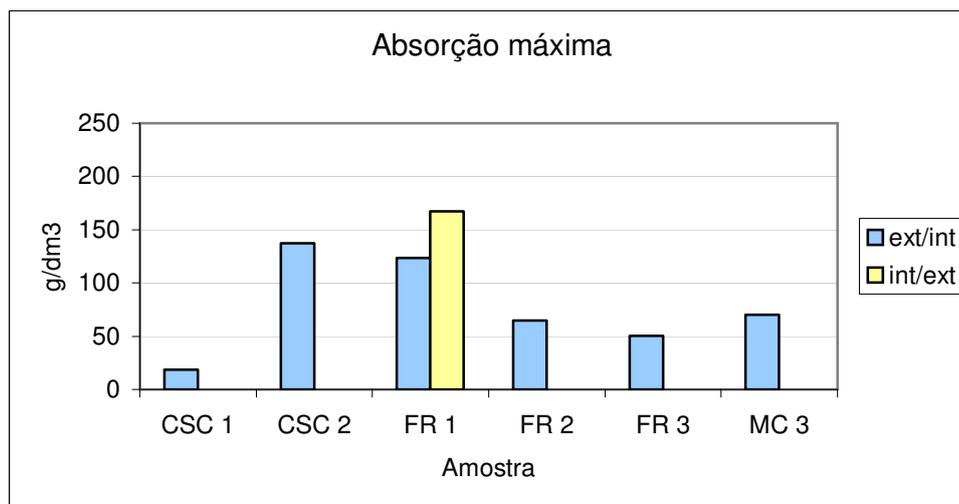


Fig. 5. 50 Absorção máxima de várias argamassas (Convento de Santa Cruz, Frielas, Museu Machado de Castro)

Conforme seria desejável, a amostra do Convento de Santa Cruz proveniente da camada de reboco (CSC 1) tem baixo coeficiente de capilaridade associada a uma baixa absorção de água, embora os valores para estes parâmetros não sejam elevados para a argamassa de junta (CSC 2). Embora dentro de limites perfeitamente aceitáveis, o desempenho da argamassa FR 1 (Frielas, canal de água) causa alguma estranheza, dado esta amostra ser muito semelhante a FR 3 (Frielas, canal de água) e desempenhar a função de argamassa de impermeabilização. O valor mais alto de absorção do interior para o exterior obtido pela argamassa FR 1, prende-se como facto da camada interior ser constituída por uma argamassa de cal aérea e areia siliciosa. Embora seja uma argamassa de reboco interior, a amostra MC 3 (Criptopórtico do Museu Machado de Castro) revela baixos valores de coeficiente de capilaridade e absorção máxima.

De uma forma geral as argamassas analisadas apresentam baixos coeficientes de capilaridade e reduzida absorção máxima de água. São excepção argamassas de reboco interior ou camadas interiores de argamassas, constituídas por cal e agregado silicioso. Adicionalmente, é claro um relacionamento entre o coeficiente de capilaridade e a absorção máxima. O tempo de secagem das argamassas é usualmente rápido, conforme é possível verificar nos gráficos de absorção capilar e secagem presentes no Anexo 1.

5.3.2.9 Visualização ao microscópio electrónico de varrimento (MEV/EDS)

A utilização do MEV associado ao EDS permitiu a visualização da micro-estrutura das argamassas, dos agregados e das zonas de interacção argamassa/agregado. Com o auxílio do EDS, foram efectuadas análises qualitativas e quantitativas relativas aos elementos constituintes dos materiais.

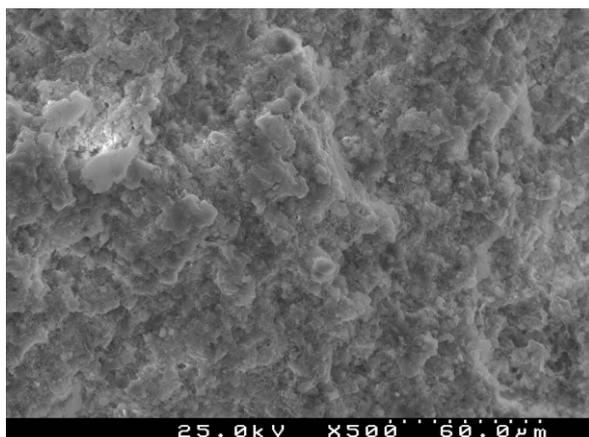


Fig. 5. 51 Micro-estrutura da argamassa CON 5

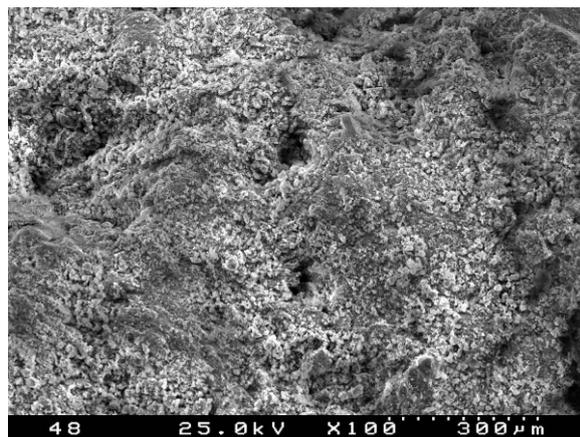


Fig. 5. 52 Micro-estrutura da argamassa SM 12

Foi efectuada a análise da micro-estrutura das várias argamassas, sendo comum o aspecto visível na Fig. 5. 51, correspondente à argamassa CON 5 e típico de uma argamassa de cal aérea. Em algumas amostras foi particularmente notória a porosidade, particularmente nas argamassas provenientes de S. Miguel, como é o caso da amostra SM 12 (Fig. 5. 52).

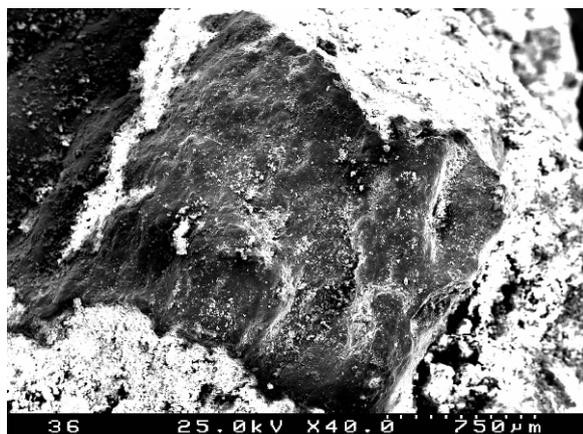


Fig. 5. 53 Agregado da argamassa SM 1

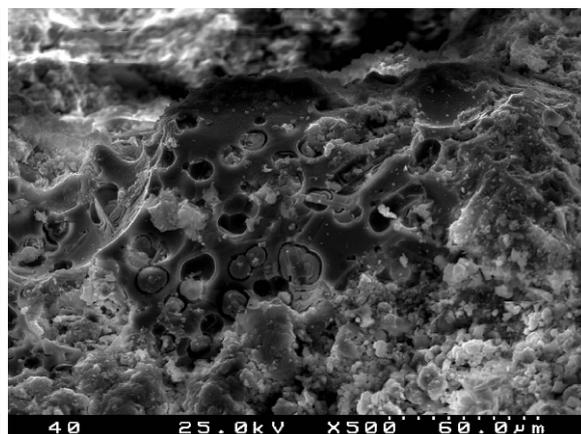


Fig. 5. 54 Agregado na argamassa SM 5

Entre os agregados, a distinção entre agregados basalto-traquíticos presentes na amostra SM 1 (Fig. 5. 53) e agregados vítreos de origem vulcânica existentes na amostra SM 5 (Fig. 5. 54) tornou-se evidente através do recurso à visualização das amostras no MEV. Da mesma forma, foi possível verificar a interligação entre ligante e agregado. A existência de descontinuidades entre o agregado cerâmico e o ligante é visível na Fig. 5. 55, fenómeno frequentemente visualizado durante a análise das diversas amostras *opus signinum*, independentemente da sua origem. Também se revelou frequente a micro-fissuração da argamassa, conforme se visualiza na Fig. 5. 56.

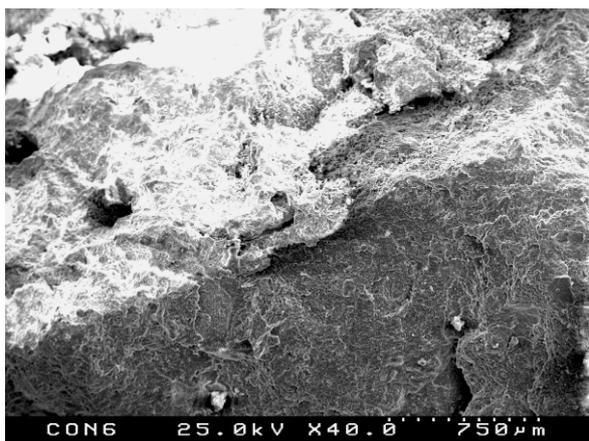


Fig. 5. 55 Interface cerâmico moído/ligante (CON 6)

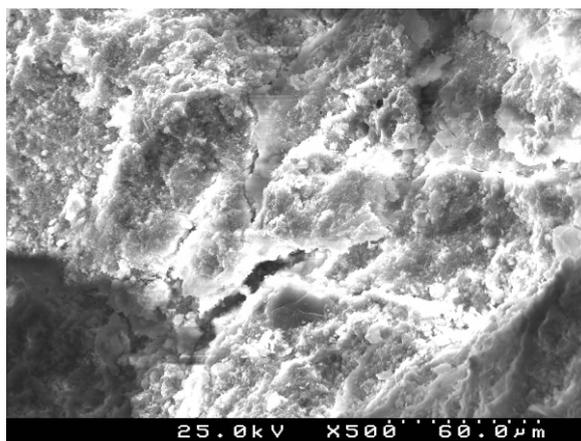


Fig. 5. 56 Fissuração argamassa CON 10

De uma forma geral, o conteúdo em sais das argamassas, conforme análise por DRX, revelou-se particularmente incidente sobre o cloreto de sódio (halite), presença usualmente confirmada (Fig. 5. 57).

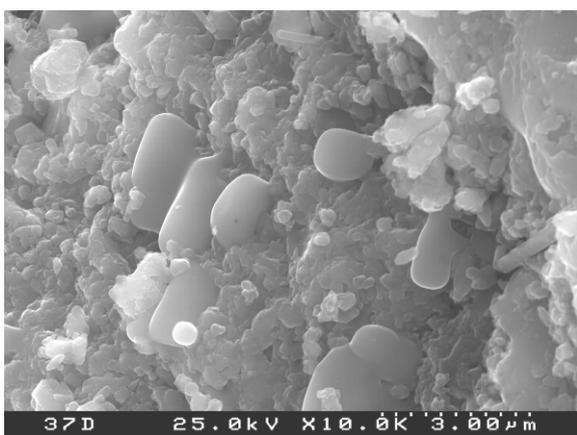


Fig. 5. 57 Presença de halite na amostra SM 2



Fig. 5. 58 Preenchimento fissuras com calcite (CON 9)

Sendo frequentes os fenômenos de discontinuidades entre agregado ligante e de microfissuração, foi verificado, em algumas amostras, o preenchimento destas zonas com calcite (Fig. 5. 58), resultante de processos de dissolução e re-cristalização e proporcionando uma maior coesão das argamassas através do preenchimento de vazios. Situações similares foram observadas em argamassas Romanas em outros locais [167].

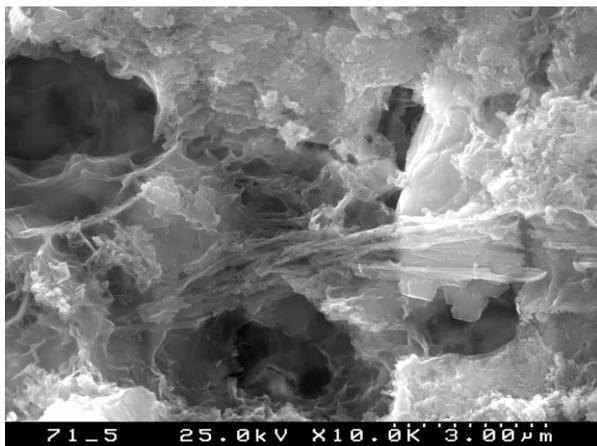


Fig. 5. 59 Aluminosilicatos de cálcio (FR 2)

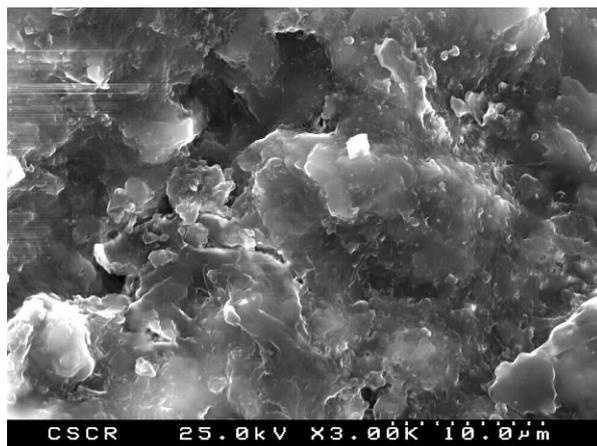


Fig. 5. 60 Presença de gel (CSC 1)

A existência de produtos resultantes da reacção pozolânica provou-se de mais difícil detecção. Contudo, em algumas amostras foram observados aluminosilicatos de cálcio, potencialmente derivados de reacções pozolânicas (Fig. 5. 59); a existência de gel constituído fundamentalmente por cálcio e silício, conforme confirmação por EDS, foi analogamente observada em certas argamassas (Fig. 5. 60).

5.3.2.10 Análise da micro-morfologia

A execução de lâminas delgadas e a sua visualização no microscópio óptico constituiu um complemento para a análise das argamassas amostradas. Devido à heterogeneidade dos materiais existentes nas argamassas (ligante, agregado silicioso ou dolomítico, partículas cerâmicas), a impregnação de argamassas e o processo de execução de lâminas revelou-se particularmente difícil nas argamassas do tipo *opus signinum*.

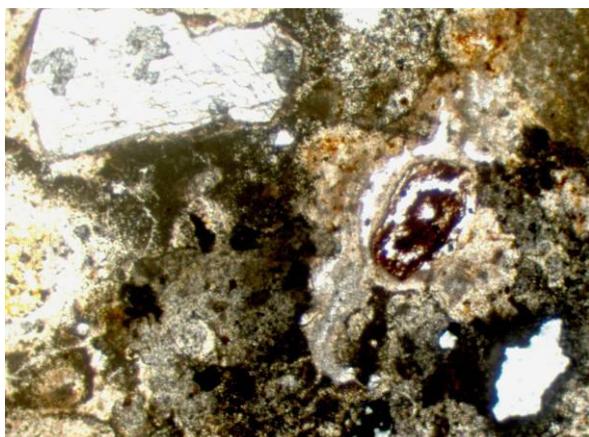


Fig. 5. 61 Quartzo, microcline (felds. potássico), nódulo de óxido de ferro (CON 3)



Fig. 5. 62 Quartzo e minerais micáceos em matriz calcítica (CSC 2)

A composição diversificada das argamassas e dos fragmentos cerâmicos presentes encontra-se patente nas Fig. 5. 61 a Fig. 5. 64. Enquanto na Fig. 5. 61, relativa a argamassa do tipo *opus signinum*, de Conímbriga são visíveis minerais como a microcline, a hematite (nódulo) e o quartzo, a observação da lâmina relativa à argamassa de junta da parede do Convento de Santa Cruz permitiu a visualização de minerais micáceos, inseridos na matriz calcítica (Fig. 5. 62). A matriz cerâmica apresentou usualmente heterogeneidades, provavelmente devido à utilização de métodos de cozedura artesanais, com grandes diferenciais de temperatura, apresentando por vezes grãos de quartzo fissurados (Fig. 5. 63), situação decorrente de arrefecimento rápido. A observação da lâmina efectuada a partir da amostra FR 3 possibilitou a detecção de grãos de quartzo e mica em fragmentos cerâmicos (Fig. 5. 64).

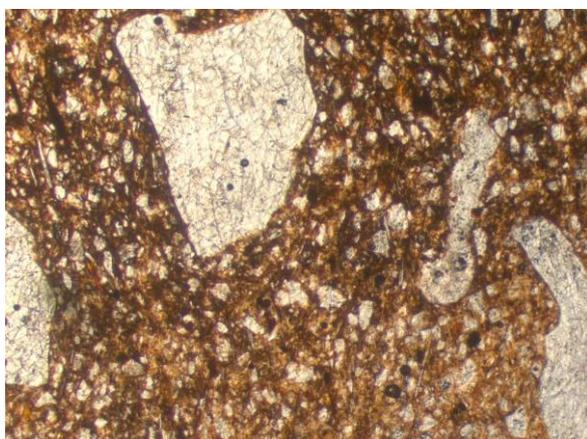


Fig. 5. 63 Cerâmico com grãos de quartzo fissurados (CON 9)

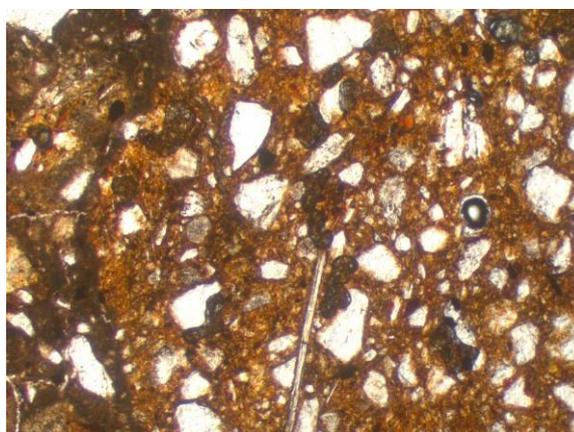


Fig. 5. 64 Cerâmico com grãos de quartzo e mica (FR 3)

O preenchimento de descontinuidades devidas a micro-fissuração (Fig. 5. 65), à possível dissolução de componentes na interface entre agregado cerâmico e matriz calcítica (Fig. 5. 66), porosidade (Fig. 5. 67) ou potencialmente provocada por comportamento diferencial de materiais (agregado/ligante, Fig. 5. 68) foi, principalmente no caso das argamassas de Conímbriga, preenchida por calcite, que após dissolução, voltou a cristalizar em zonas ‘vazias’.

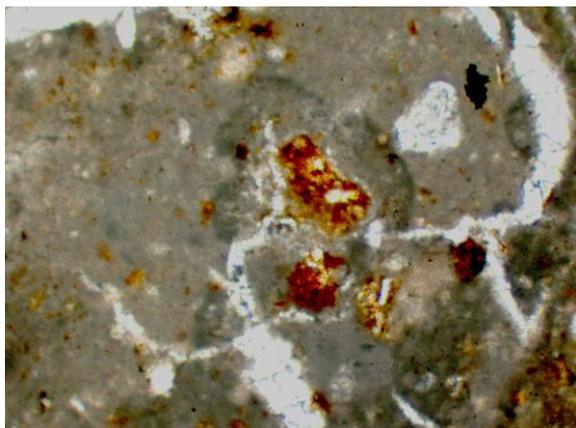


Fig. 5. 65 Fissuração preenchida com calcite espática (CON 3)

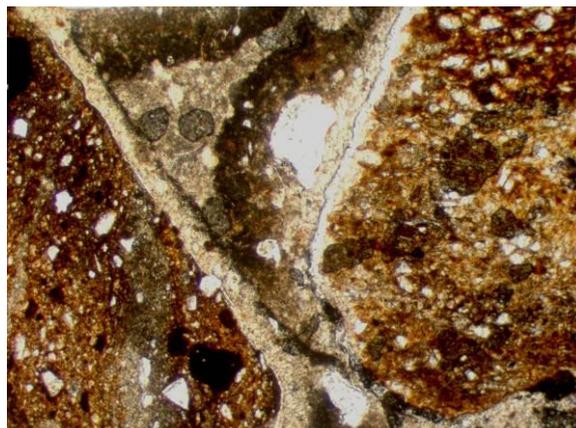


Fig. 5. 66 Interface entre cerâmico e matriz preenchida com calcite (CON 1)

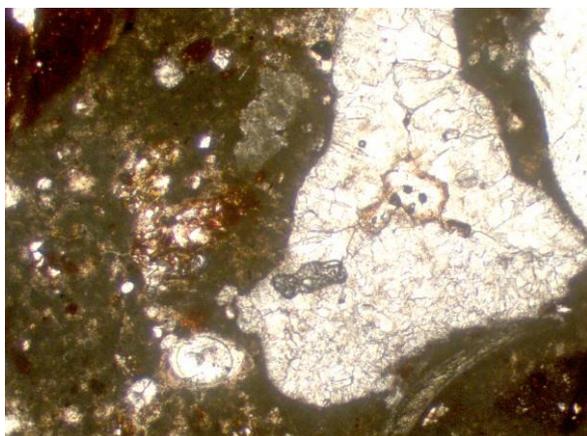


Fig. 5. 67 Poro preenchido com calcite (CON 9)



Fig. 5. 68 Precipitação de calcite microcristalina à volta de grão de quartzo (CON 9)

5.3.2.11 Produtos da reacção pozolânica nas argamassas

As adições pozolânicas, quer naturais, quer artificiais (cerâmico moído), incorporadas na maioria das argamassas analisadas, reagiram com o ligante produzindo compostos como silicatos, aluminatos e aluminosilicatos de cálcio hidratados. É expectável que vestígios dessas reacções sejam encontrados nas amostras analisadas, embora a idade de algumas amostras (especificamente, das amostras retiradas das estações arqueológicas Romanas) justifique transformações que englobem o desaparecimento desses componentes. A detecção de compostos resultantes da reacção pozolânica foi efectuada através das técnicas utilizadas neste estudo, nomeadamente DRX, ATG/DSC e SEM/EDS. Adicionalmente, foi aplicada uma

metodologia desenvolvida por Moropoulou [138, 140, 142], baseada nas análises termogravimétricas, que classifica as argamassas segundo o seu grau de 'hidraulicidade'.

Visualmente, foram detectadas bandas de reacção nos fragmentos cerâmicos das argamassas (Fig. 5. 69), evidência da existência de reacção pozolânica deste material com o ligante circundante [142].

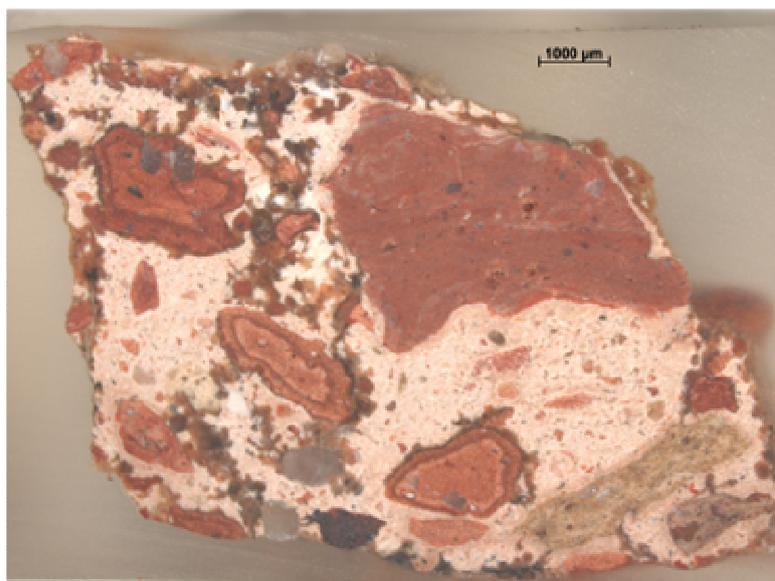


Fig. 5. 69 Corte de amostra de argamassa de Conímbriga, com visualização de bandas de reacção do tijolo

A detecção de zeólitos, efectuada por DRX, nas amostras TR 2, TR 3, CSC 1 e FR 3 é um possível indicador de reacção pozolânica; embora possam pertencer ao agregado, também que a formação de zeólitos seja derivada de uma reacção pozolânica. A presença de piroxenas, opala ou a existência abundante de feldspatos, pode ser encarada como a existência de indicadores pozolânicos, ou seja, de substâncias que produzirão uma reacção pozolânica. Estes minerais estão presentes principalmente nas argamassas provenientes dos Açores e no caso da opala, em TR 2 e TR 3. Também neste grupo de amostras, o arredondamento basal verificado entre os 20 e 40° (2θ), denota a presença de material vítreo (Fig. 5. 70, Fig. 5. 71), que pode ser derivado da existência de agregados vulcânicos vítreos ou de compostos resultantes de uma reacção pozolânica. Não foram detectados por DRX silicatos, aluminatos ou aluminosilicatos de cálcio hidratados [148, 242].

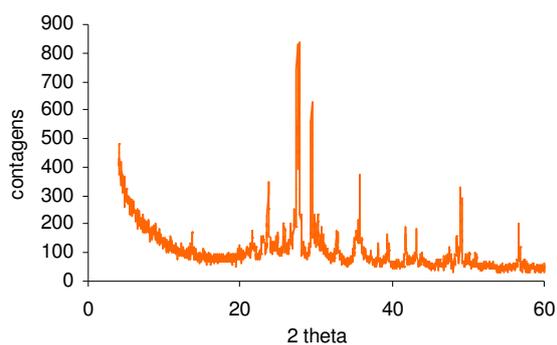


Fig. 5. 70 DRX amostra SM 9

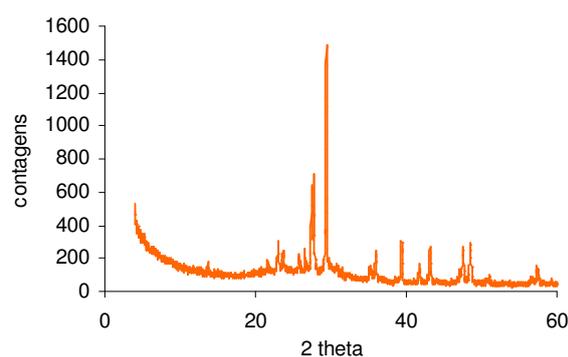


Fig. 5. 71 DRX amostra SM 13

Através das análises térmicas, a presença de silicatos, aluminatos e aluminosilicatos de cálcio hidratados pode ser detectada por picos na ATD na zona entre os 200°C e 600°C, conforme relatado no ponto 5.3.2.6 e visível nas figuras Fig. 5. 30 e Fig. 5. 32.

A observação no MEV, associada a quantificação elemental EDS, permitiu fundamentalmente a detecção de geles com cálcio e silício e/ou alumínio como componentes principais, conforme explicitado em 5.3.2.9.

A metodologia desenvolvida por Moropoulou [138, 140, 142] para classificação da hidraulicidade das argamassas utilizando as análises termogravimétricas baseia-se no pressuposto de que as perdas de massa entre os 200°C e os 600°C se devem à saída de água de hidratação de compostos hidráulicos e que as perdas de massa a partir dos 600°C se devem à decomposição dos carbonatos (saída de CO₂). Tendo em conta os conteúdos em CO₂ e a relação CO₂ sobre água hidráulica, são estabelecidas classificações quanto à hidraulicidade das argamassas. Das amostras recolhidas, foi efectuada a quantificação de CO₂ e de CO₂/água hidráulica, conforme se constata na Fig. 5. 72.

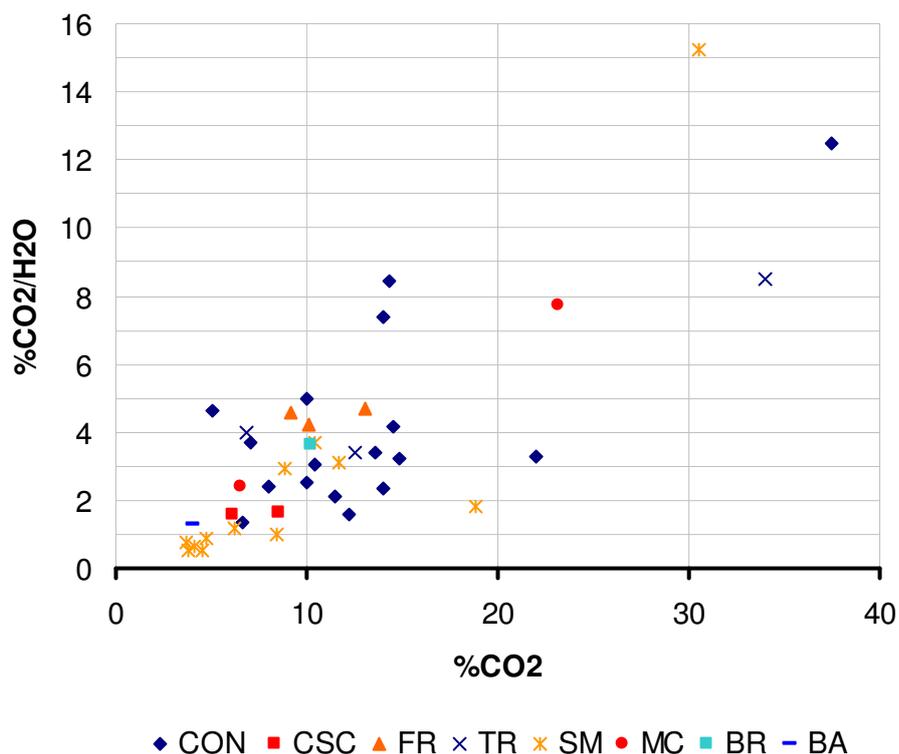


Fig. 5.72 Hidraulicidade das amostras

As argamassas que se encontram no sector com conteúdo de CO₂ entre 30% e 40% são TR 2 e SM 3br e CON 15, todas argamassas de cal aérea. Os resultados das amostras MC 4 e CON 1 colocam-nas na faixa entre os 20% e os 30% de CO₂, revelando alto conteúdo em ligante. Embora MC 4 possa ser classificada como uma argamassa 'típica' de cal e agregado silicioso, CON 1 é uma argamassa do tipo *opus signinum*, bastante rica em ligante e contendo um barramento de cal. As argamassas CON 13 e CON 7, camada branca encontram-se no espaço correspondente a 10% a 20% de conteúdo em CO₂, e têm valores de %CO₂/H₂O entre 7% e 9%. As restantes argamassas agrupam-se no espaço delimitado por valores de CO₂ inferiores a 15% e percentagem de CO₂/H₂O inferiores a 5%. Todas apresentam baixos teores em ligante e comparativamente a esses teores, quantidade de água hidráulica que as classifica como argamassas hidráulicas. Curiosa é a associação das argamassas de Frielas (FR) e do Convento de Santa Cruz (CSC), que apresentam níveis de CO₂/H₂O muito semelhantes. As argamassas provenientes dos Açores (exceptuando SM 3br) são todas classificadas como bastante hidráulicas, dado a sua baixa percentagem de CO₂/H₂O. É provável que as amostra proveniente da Barragem de Álamo e MC3, do Museu Machado de Castro, contenham pozolanas naturais dado o seu posicionamento na Fig. 5.72 e a sua composição mineralógica.

5.4 Análise de Resultados

A composição das argamassas analisadas permite retirar algumas conclusões. As argamassas da Época Romana têm uma composição variada, dependendo fundamentalmente do local de extração; contudo, e principalmente no caso das argamassas de Tróia, esta composição varia dentro da própria estação arqueológica, possivelmente relacionada com a execução de argamassas em diferentes épocas. Como ligante para estas argamassas foi utilizada cal aérea, por vezes contendo dolomite e/ou magnesite, sugerindo a utilização de diferentes matérias-primas na produção da cal. Na ausência de pozolanas naturais, foi utilizado cerâmico moído para cumprir a função de pozolana nas argamassas; as argamassas que poderão ter pozolanas naturais são as provenientes da Barragem de Álamo e do Museu Machado de Castro (MC3). Ao nível granulométrico, verificou-se grande variabilidade, embora nas argamassas de Conímbriga fosse possível estabelecer um fuso granulométrico predominante. As argamassas dos Açores têm grande quantidade de feldspatos e frequentemente piroxenas devido à matéria-prima local; apresentam quantidades variáveis de ligante, embora estas sejam usualmente baixas.

Conforme é possível verificar na Tab.5.15, a resistência das argamassas analisadas tem elevada variabilidade e as que apresentam resistência mais alta são as argamassas provenientes de Tróia. Embora algumas das argamassas de Conímbriga tenham resistência elevada, a média situa-se nos 3,1MPa, similar à resistência do Betão Romano. As restantes argamassas da Época Romana revelaram resistências médias situadas entre 1,8MPa e 2,4MPa. A resistência média inferior é protagonizada pelas argamassas açorianas (1,5MPa).

Tab.5.15 Resistência mecânica de argamassas (Média e Desvio Padrão), MPa

	TR	CON	CSC	BR	FR	MC	SM
Média	4.8	3.1	2.4	3.0	1.8	2.2	1.5
Desvio Padrão	1.16	1.44	1.33	-	1.10	-	0.87

O comportamento capilar das diversas argamassas analisadas revela menores valores médios do coeficiente de capilaridade e da absorção máxima nas argamassas de Conímbriga. As argamassas com maior variabilidade destes parâmetros são as argamassas dos Açores, que detêm o valor máximo (SM11 com coeficiente de capilaridade de 24,15 g/dm².min^{1/2} e absorção máxima de 238,62 g/dm²) e o valor mínimo (SM15 com coeficiente de capilaridade de 0,88 g/dm².min^{1/2} e absorção máxima de 12,15 g/dm²).

Tab.5.16 Valores médio do coeficiente de capilaridade (g/dm².min^{1/2}) e da absorção máxima (g/dm²)

	TR	CON	CSC	FR	MC	SM
Coeficiente Capilaridade	2.91	2.86	3.86	5.73	7.85	6.44
Absorção Máxima	69.03	57.89	77.69	61.84	70.40	75.10

Utilizando a metodologia definida por alguns autores [10,24,31,241] foi determinada a composição média das argamassas de Conímbriga e dos Açores. Relativamente às argamassas de Conímbriga, concluiu-se que a sua composição foi efectuada utilizando cerca de 75% de agregado (areia siliciosa e cerâmico moído), em peso, e 25% de ligante, também em peso. Relativamente às argamassas dos Açores, parte do material pozolânico foi dissolvido pelo ácido; contudo, foi determinada a quantidade média de ligante utilizado, cerca de 11%, em peso, sendo em alguns casos utilizadas quantidades de apenas 5% a 6% de ligante.

Analisando a hidraulicidade das argamassas (Fig. 5. 72) e efectuando um cruzamento com os dados obtidos relativos à resistência mecânica das amostras (5.3.2.7), não é possível obter uma correlação entre argamassas mais hidráulicas e argamassas mais resistentes. As argamassas com maiores indicadores de hidraulicidade são as açorianas, provavelmente devido ao material pozolânico, vítreo, utilizado na sua composição. Contudo, a sua resistência mecânica, de uma forma geral, é menor do que a das demais argamassas. Para este efeito contribuem os baixos teores em cal da maioria das argamassas, já que a argamassa SM16, situada próxima da linha de 20% de CO₂ na Fig. 5. 72, tem valores de resistência mecânica mais elevados do que as argamassas com menor teor em ligante. Como não existiu produção de cal na ilha de S. Miguel, as argamassas eram efectuadas utilizando pouco ligante, exceptuando casos em que existia a possibilidade de compra de cal vinda das outras ilhas ou do continente. Por este motivo, algumas argamassas empregues nos fortes têm maiores quantidades de ligante do que as restantes.

O papel das pozolanas, quando utilizadas conjuntamente com a cal aérea, tem efeitos importantes nas diversas propriedades das argamassas e, particularmente, na sua resistência, principalmente em argamassas 'jovens'. Contudo, em argamassas antigas, e particularmente no caso das argamassas Romanas, com centenas de anos, outros fenómenos, como a re-cristalização de calcite, visualizada por microscopia óptica e MEV, poderão ter contribuído para a manutenção das suas excelentes propriedades [233].

6 Argamassas Novas de Cal com Adições Pozolânicas

6.1 Escolha e Análise de Materiais

De forma a possibilitar a ampliação do conhecimento relativo à influência de materiais pozolânicos nas propriedades de argamassas de cal aérea, foram incorporados em argamassas diversos materiais com propriedades pozolânicas de origem natural e artificial. Para além dos materiais pozolânicos, foi utilizada cal aérea hidratada em pó comercializada em Portugal e areia de rio, siliciosa. A cal aérea em pasta foi utilizada numa composição.

As pozolanas naturais escolhidas foram:

- Pozolana de Cabo Verde (PCV)
- Pozolana dos Açores (PA)

A pozolana proveniente da ilha de Santo Antão, em Cabo Verde (PCV), à data, encontrava-se disponível comercialmente no nosso país e a pozolana da ilha de S. Miguel nos Açores (PA), é utilizada no fabrico de cimento com pozolana na Cimentação.

Como pozolanas artificiais foram estudados para utilização nas argamassas os seguintes produtos:

- Cinzas Volantes (CV)
- Resíduo de Argila Expandida (RAE)
- Cinzas de Papel (CP)
- Metacaulino (MCA e MCI)
- Argila Cozida (PT).

A proveniência das Cinzas Volantes é da Central Termoelétrica do Pego. O Resíduo de Argila Expandida é um subproduto fino da produção de argila expandida, resultante da homogeneização de argilas e da sua cozedura a cerca de 1200°C. As Cinzas de Papel são um resíduo da produção do papel, resultando da queima das cascas de árvores. Estes materiais foram utilizados conforme a recolha, enquanto que o Metacaulino, proveniente da exploração de Alvarães (MCA) e a argila cozida (Pó de Tijolo, designado por PT) foram produzidos especificamente para este estudo. O Pó de Tijolo foi também preparado com uma granulometria específica, de forma a ser utilizado em argamassas de reparação, na Estação Arqueológica de Conímbriga, sendo a designação

adaptada para este material PTCON. Paralelamente, foi utilizado um metacaulino de produção industrial comercializado em Portugal e designado por Metacaulino Industrial (MCI).

Os materiais que não apresentavam a finura desejada, foram passados pelo peneiro de 75 μ m, caso da Pozolana dos Açores (PA), Metacaulino de Alvarães (MCA) e Pó de Tijolo (PT). A caracterização composicional dos materiais compreendeu a utilização de técnicas de análise maioritariamente descritas no Capítulo 5:

- análise granulométrica através de peneiração a seco e por sedimentação na fracção inferior a 0.063mm,
- fluorescência de raios X (FRX) para determinação da composição química
- difracção de raios X (DRX) para determinação da composição mineral
- microscopia electrónica de varrimento (MEV/EDS) para visualização, identificação da textura e determinação da composição das várias fases presentes

Foi também efectuada a análise da reactividade pozolânica através da aplicação de vários ensaios (RBLH, ASTM C593-95, condutividade, NP EN 196-5)

O processo de selecção dos materiais Pozolana dos Açores, Metacaulino e Pó de Tijolo necessitou de uma análise prévia, que será descrita nos pontos seguintes.

6.1.1.1 Análise Prévia - Pozolana dos Açores (S. Miguel)

Actualmente, o local de extracção situa-se em Água de Pau, Pisão, onde é possível verificar a existência de vários níveis diferenciados contendo materiais potencialmente com características diversas e, conseqüentemente, diferentes graus de reactividade pozolânica.



Fig. 6.1 Escavação em Água de Pisão com visualização dos vários níveis



Fig. 6.2 Local de escavação englobando os vários níveis

Foi efectuada uma amostragem, para análise, em dois níveis diferentes, localizados a profundidades de 5m (PA1) e de 12m (PA2) relativamente à superfície. Adicionalmente foi utilizado material proveniente directamente da escavação englobando todos os estratos (PAT), obtido na central de produção de cimento. Este último material foi sujeito a uma homogeneização seguida de britagem e secagem a 700°C.

Tab.6.1 Análise química por FRX de diferentes estratos de pozolana dos Açores

Composição Química (%)	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	Na ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	PR
PA1	1.85	53.39	19.76	6.70	4.01	1.16	3.58	1.63	0.17	0.20	6.90
PA2	1.93	55.76	18.21	5.68	4.51	2.01	4.50	1.11	0.15	0.22	4.70
PAT	1.69	56.30	18.18	5.43	4.82	1.16	4.95	1.02	0.16	0.21	5.30

A análise química, expressa na Tab.6.1 revela grande semelhança composicional entre o material retirado dos dois níveis e igualmente destes com a amostra englobando os vários níveis. Denota-se uma preponderância de silicatos, aluminatos e óxidos de ferro e uma presença também considerável de compostos alcalinos sob a forma de óxidos de potássio e sódio.

Foram efectuados ensaios de Reactividade Pozolânica ao material proveniente de diversos extractos, após secagem e peneiração (peneiro 75µm) segundo o Caderno de Encargos para Fornecimento e Recepção de Pozolanas, anexo do Regulamento para Betões e Ligantes Hidráulicos [166], conforme descrito no ponto 6.1.3.1. Da análise destes resultados, verifica-se que a amostra proveniente da fábrica (PAT) possui a maior reactividade

Tab.6.2 Resultados do ensaio de Reactividade Pozolânica às amostras de Pozolana dos Açores (CEFRP/RBLH)

Material	Resistência à flexão 28d (MPa)	Resistência à compressão 28d (MPa)
Pozolana S. Miguel – profundidade 7m (PA1)	0,55	1,58
Pozolana S. Miguel – profundidade 12m (PA2)	0,63	2,46
Pozolana S. Miguel – amostra total (PAT)	1,35	2,88

Tendo em conta os dados relativos à composição química e da reactividade pozolânica das pozolanas dos Açores, foi feita a opção de utilizar o material PAT, resultante da extracção de diversas camadas, conforme utilizada na fábrica da Cimentação.

6.1.1.2 Análise Prévia - Pó de Tijolo

A designação 'pó de tijolo' foi utilizada quer para o material moído a partir de materiais cerâmicos de uso corrente, quer para matéria-prima argilosa transformada para o efeito. Uma das questões fulcrais na escolha deste material foi a sua temperatura de cozedura, que influi directamente na sua reactividade [9, 51, 209]. Os fornos tradicionais, utilizados na antiguidade coziam a baixa temperatura [5, 56], motivo pelo qual é considerado que os fragmentos cerâmicos utilizados em argamassas de cal desenvolviam reacções pozolânicas. De forma a aferir a temperatura mais adequada para este fim foram efectuados ensaios preliminares com tijolos crus de produção nacional, cozidos a diversas temperaturas, moídos e passados pelo peneiro de 75µm, seguindo recomendações de alguns autores [9, 209]. Estes ensaios consistiram na preparação de provetes condicionados à temperatura de 23±2°C e humidade relativa de 50±5%, e realização de um conjunto de ensaios mecânicos e físicos. Nesta fase, foram testadas as temperaturas de 750°C (temperatura estimada em processos de cozedura em fornos antigos), 950°C (temperatura máxima de cozedura recomendada em alguma bibliografia [9, 209]) e 1100°C (temperatura habitualmente utilizada na fábrica de recolha dos tijolos crus), concluindo-se que a temperatura mais favorável para o desenvolvimento de resistência mecânica é a de 750°C [234].

Posteriormente, e tendo em conta a formulação de argamassas a utilizar para colmatação de faltas de reboco em diversas paredes da Estação Arqueológica de Conímbriga, foram amostrados níveis argilosos em zona de possível extracção na Época Romana [215]. Este material foi alvo de cozedura às temperaturas de 700°C, 800°C, 900°C e 1000°C utilizando um aumento de 2°C/min até à temperatura máxima desejada e com patamar de 120 minutos nessa temperatura. Foi

também realizada uma Análise Termodilatométrica, da argila recolhida, conforme Fig. 6.3. Esta análise reporta a variação dimensional dos materiais com o aumento de temperatura até cerca de 1100°C, devido aos seguintes factores [71]:

- eliminação de alguns constituintes, com a formação de produtos gasosos
- reacções e transformações cristal químicas
- sinterização

Para esta análise foi utilizado um dilatómetro Netzsch STA 409 C com gama de temperatura entre 20°C e 1100°C e ciclo de aquecimento à taxa de 10°C/min..

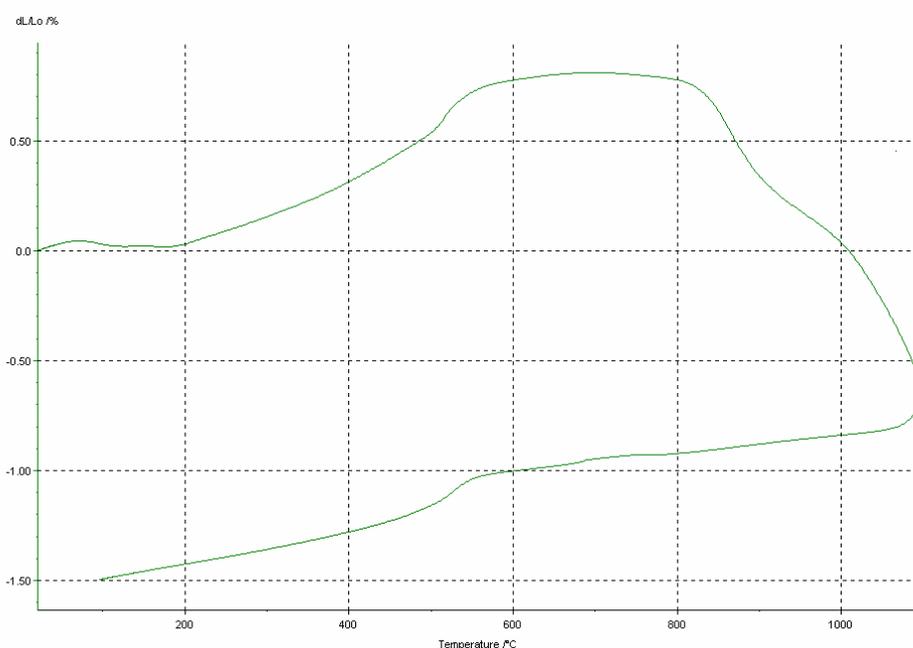


Fig. 6.3 Análise Termodilatométrica da argila de Conímbriga

A interpretação da Análise Termodilatométrica revela uma dilatação inicial, seguida de uma pequena retracção na zona dos 150°C devido à perda de água adsorvida, retomando-se em seguida a dilatação até aos 600°C; o início da sinterização a 800°C que por formação de fase vítrea promove a densificação do corpo cerâmico.

As análises e ensaios realizados às amostras cozidas a várias temperaturas consistiram na realização de DRX, para estudo das fases formadas a cada temperatura de cozedura, e de ensaios de resistência mecânica à flexão e compressão (para medição da Reactividade Pozolânica) após incorporação em provetes de cal, conforme explicitado no Caderno de Encargos para Fornecimento e Recepção de Pozolanas (ver 6.1.3.1).

As análises por DRX denotaram uma composição semelhante de todas as amostras a nível cristalino, não sendo identificável a presença de mulite nas amostras cozidas a temperaturas mais elevadas.

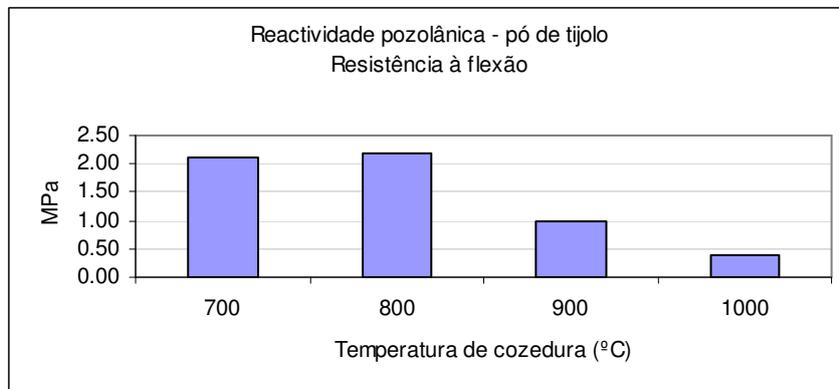


Fig. 6.4 Reactividade pozolânica de Pó de Tijolo cozido a várias temperaturas – resistência à flexão (CEFRP/RBLH)

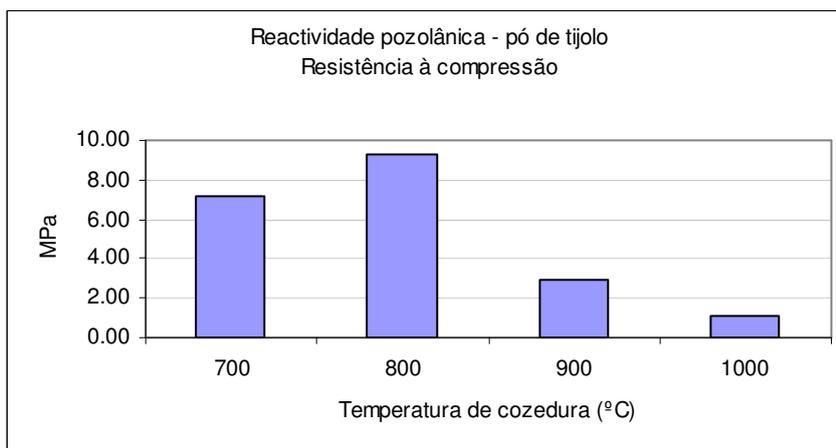


Fig. 6.5 Reactividade pozolânica de Pó de Tijolo cozido a várias temperaturas – resistência à compressão (CEFRP/RBLH)

Os valores obtidos nos ensaios de Reactividade Pozolânica (Fig. 6.4 e Fig. 6.5) indicaram maior reactividade da amostra cozida a 800°C, e decréscimo desta propriedade nas amostras cozidas à temperatura de 900°C e 1000°C.

Face aos resultados obtidos, foi adoptada a temperatura de 800°C como temperatura de cozedura, de forma a obter um material com características francamente pozolânicas.

6.1.1.3 Análise Prévia – Metacaulino de Alvarães

Para além do Metacaulino Industrial (MCI), foi considerado também Metacaulino de Alvarães (MCA), produzido no Centro Tecnológico da Cerâmica e do Vidro através da cozedura de caulinite proveniente da extracção de Alvarães à temperatura 750°C durante 15 minutos [120].

6.1.2 Caracterização dos materiais

6.1.2.1 Análise Visual



Fig. 6.6 Pozolana de Cabo Verde (PCV)



Fig. 6.7 Pozolana de S. Miguel, Açores (PA)



Fig. 6.8 Metacaulino de Alvarães (MCA)



Fig. 6.9 Metacaulino Industrial (MCI)



Fig. 6.10 Pó de Tijolo (PT)



Fig. 6.11 Cinzas Volantes (CV)



Fig. 6.12 Resíduo de Argila Expandida (RAE)



Fig. 6.13 Cinzas de Papel (CP)

Visualmente, os materiais utilizados apresentam uma gama de cores variada; entre os materiais naturais (PCV e PA), ambos apresentam tonalidades claras, entre o cinza e o castanho no caso da Pozolana de Cabo Verde (Fig. 6.6) e castanho claro no caso da Pozolana dos Açores (Fig. 6.7). O Metacaulino de diferentes proveniências tem uma coloração semelhante, branca, embora o Metacaulino Industrial seja de um branco mais vivo (Fig. 6.9) e o Metacaulino de Alvarães de um branco mais suave (Fig. 6.8). O Pó de Tijolo tem uma forte tonalidade laranja (Fig. 6.10), enquanto as restantes pozolanas artificiais se situam entre as cores cinzenta (Cinzas Volantes, Fig. 6.11, Resíduo de Argila Expandida, Fig. 6.12) e negra (Cinzas de Papel, Fig. 6.13).

6.1.2.2 Massa Volúmica

Tab.6.3 Densidade e massa volúmica aparente dos materiais utilizados

Material	Densidade (g/dm ³)	Massa Volúmica Aparente (g/dm ³)
Cal em pó	n.r.	430
Cal em pasta	n.r.	1260
Areia	n.r.	1105
PCV	2260	844
PA	2450	676
MCA	2530	592
MCI	2640	340
PTCON	n.r.	1142
PT	2660	1140
CV	2490	858
RAE	2340	640
CP	2270	181

Determinadas as densidades e massas volúmicas aparentes dos diversos materiais (Tab.6.3), verifica-se que a cal em pasta tem uma massa volúmica cerca de três vezes superior à massa volúmica da cal em pó. Os materiais com massa volúmica mais elevada são a Areia e o Pó de Tijolo, quer passado pelo peneiro de 75 μ m (PT), quer com uma granulometria específica (PTCON). A Pozolana de Cabo Verde (PCV) e as Cinzas Volantes (CV) têm massas volúmicas na ordem dos 850g/dm³, seguidas pela Pozolana dos Açores (PA), Resíduo de Argila Expandida (RAE) e Metacaulino de Alvarães (MCA). Os produtos com menor massa volúmica aparente são o Metacaulino Industrial (MCI) e as Cinzas de Papel (CP).

6.1.2.3 Análise Granulométrica

A análise granulométrica foi determinada utilizando peneiração a seco com a série de peneiros ASTM e por sedimentação na fracção inferior a 63 μ m, utilizando o equipamento Sedigraph 5100 Micromeritics.

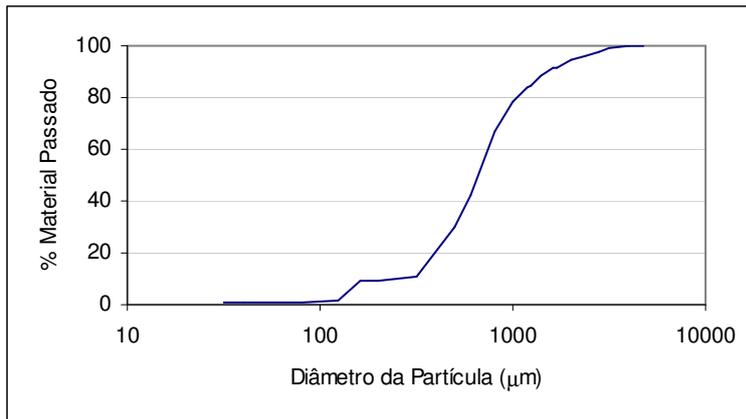


Fig. 6.14 Análise Granulométrica da Areia de Rio

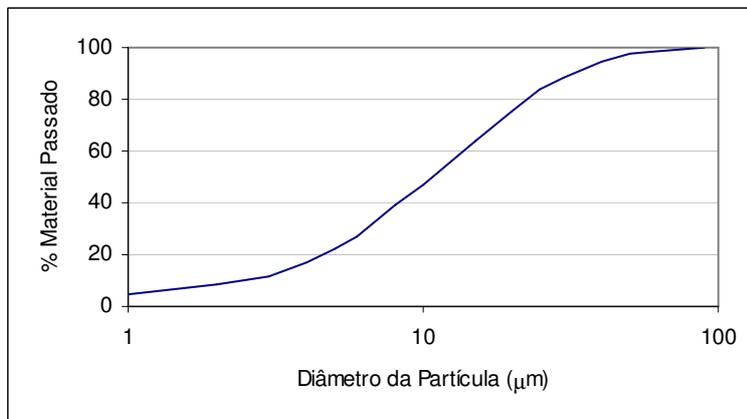


Fig. 6.15 Análise Granulométrica da Pozolana de Cabo Verde (PCV)

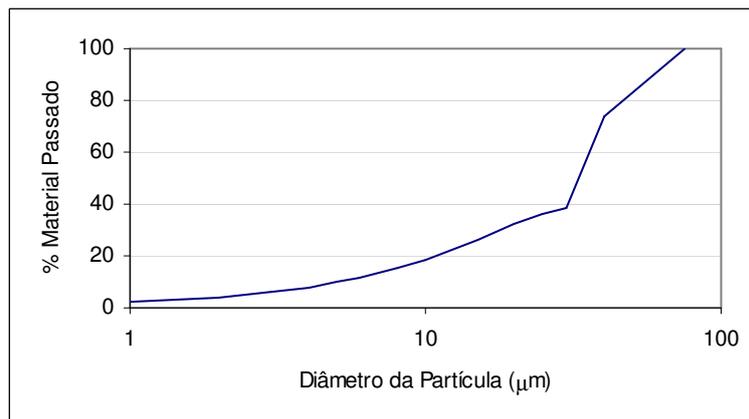


Fig. 6.16 Análise Granulométrica da Pozolana dos Açores (PA)

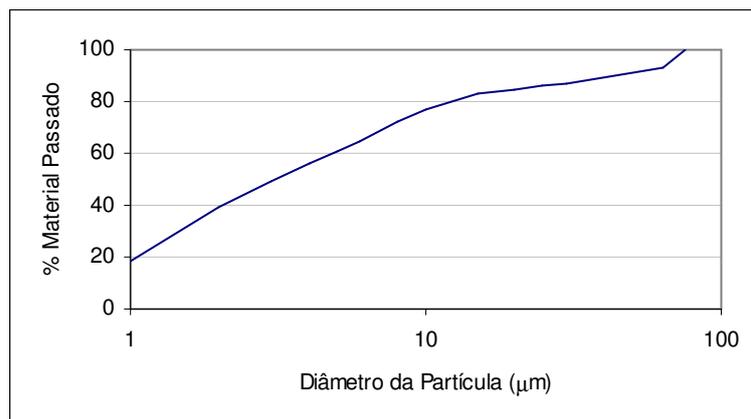


Fig. 6.17 Análise Granulométrica do Metacaulino de Alvarães (MCA)

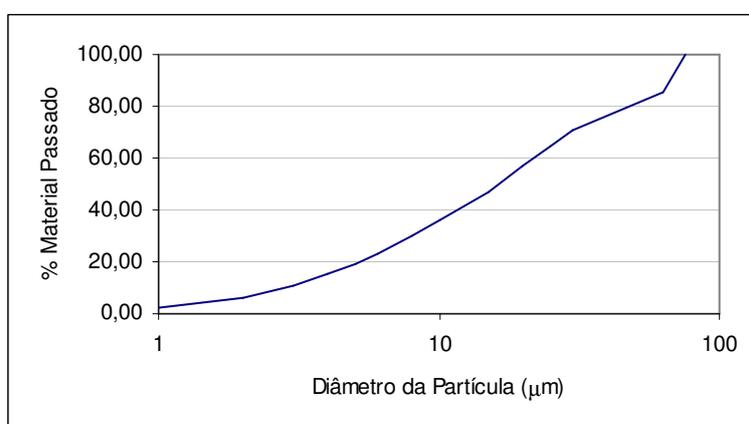


Fig. 6.18 Análise Granulométrica do Pó de Tijolo (PT)

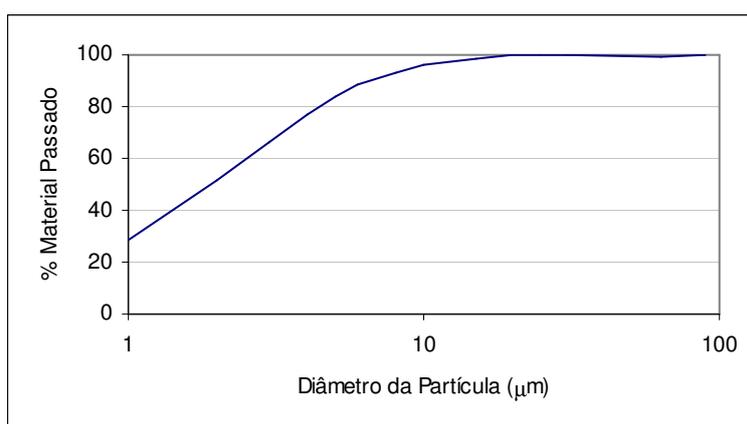


Fig. 6.19 Análise Granulométrica do Metacaulino Industrial (MCI)

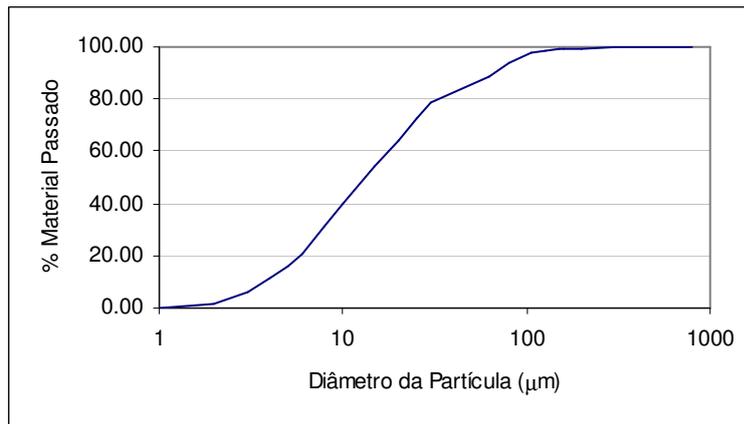


Fig. 6.20 Análise Granulométrica das Cinzas Volantes (CV)

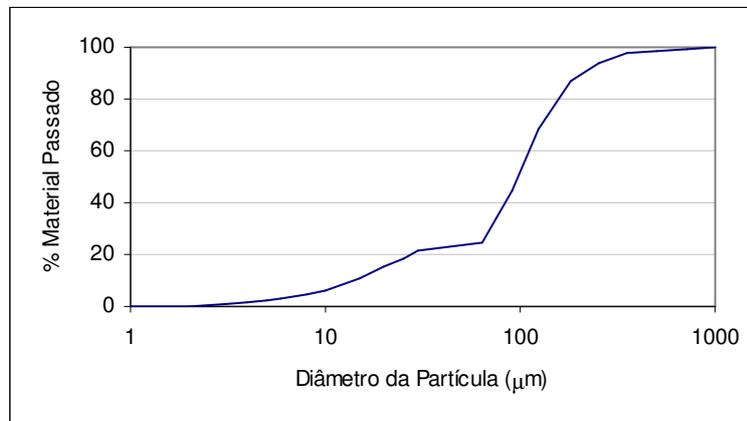


Fig. 6.21 Análise Granulométrica do Resíduo de Argila Expandida

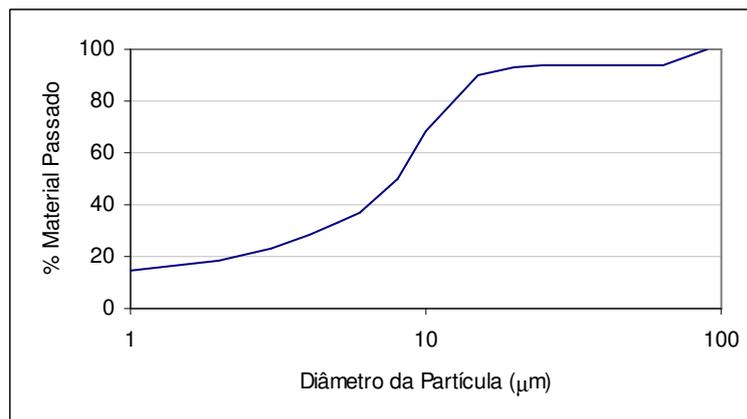


Fig. 6.22 Análise Granulométrica das Cinzas de Papel

Todos os materiais analisados são naturalmente finos ou foram passados pelo peneiro de 75μm. Os materiais com maior percentagem de partículas com dimensão inferior a 1μm.são ambos os Metacaulinos e as Cinzas de Papel.

6.1.2.4 Superfície Específica Blaine

A determinação da Superfície Específica Blaine dos diversos materiais foi determinada pelo Núcleo de Betões do Departamento de Materiais do LNEC, seguindo a norma 'NP EN 196-6, Métodos de ensaio de cimentos. Determinação da finura', utilizando um Permeabilímetro de Blaine.

Tab.6.4 Superfície Específica Blaine dos Materiais

Material	Superfície Específica Blaine (cm ² /g)
PCV	3 250
PA	6 870
MCA	23 460
MCI	29 330
PT	3 160
CV	2 500
RAE	9 100
CP	32 850

As Cinzas de Papel possuem a Superfície Específica mais elevada, seguidas pelo Metacaulino; contudo os valores obtidos para estes materiais são todos extremamente altos. Os Resíduos de Argila Expandida têm uma Superfície Específica muito menor (cerca de três vezes menor) do que os materiais com maior Superfície Específica. Entre os materiais naturais, a Superfície Específica da Pozolana dos Açores é muito superior à da Pozolana de Cabo Verde, que apresenta resultados semelhantes aos materiais Pó de Tijolo e Cinzas Volantes (material com menor Superfície Específica Blaine).

6.1.2.5 Composição Química por Fluorescência de Raios X

Tab.6.5 Composição Química dos Materiais por FRX (%)

Designação	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	Na ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	PR
Cal aérea	63.11	<2ppm	0.01	0.12	0.05	1.23	0.08	0.02	0.04	0.01	35.00
Areia de rio	0.37	84.73	6.87	0.78	4.00	0.33	1.01	0.12	0.09	0.02	0.70
PCV	5.50	48.81	19.51	2.24	5.50	0.14	0.55	0.01	0.07	0.02	6.40
PA	1.69	56.30	18.18	5.43	4.82	1.16	4.95	1.02	0.16	0.21	5.30
PT	4.02	67.49	13.86	4.71	2.24	1.55	0.21	1.04	0.15	0.08	3.20
CV	7.10	47.91	26.89	4.56	0.98	2.19	0.49	1.33	0.87	0.07	6.30
RAE	3.92	56.52	19.50	8.05	4.58	3.97	0.33	0.95	0.18	0.14	0.70
CP	2.09	0.74	0.15	24.43	14.22	2.84	7.20	3.96	5.44	3.42	34.60

Para a execução deste ensaio foi utilizado um Espectómetro de Fluorescência de Raios X Philips PW 1400.

A composição química dos materiais, analisada por FRX, permite concluir que a cal aérea utilizada é fundamentalmente composta por cálcio, com teores em magnésio baixos. A areia de rio é essencialmente siliciosa, e os seus teores em alumínio e potássio são atribuíveis à presença de feldspatos e filossilicatos.

As cinzas de papel revelaram uma elevada perda ao rubro, devido ao material orgânico presente na sua composição, um considerável teor em ferro e em alcalis (K, Na) e baixos teores em silício e alumínio. Dada esta composição, não existe propensão para desenvolvimento de uma reacção pozolânica por parte deste material.

Relativamente aos restantes materiais potencialmente pozolânicos, salientam-se os elevados teores em silício, especialmente evidente no pó de tijolo (PT) e os altos teores em aluminato, muito relevantes no caso das cinzas volante (CV). Os teores em ferro são também relativamente elevados no caso das pozolanas artificiais (PT, CV, RAE) e da Pozolana dos Açores (PA). Esta pozolana natural possui também considerável quantidade de alcalis (K, Na), que só é evidente sob a forma de potássio nos materiais Pozolana de Cabo Verde (PCV) e Resíduo de Argila Expandida (RAE).

6.1.2.6 Composição Mineral por Difracção de Raios X

Após secagem a 40°C, as amostras foram analisadas num Difractómetro de Raios X do tipo X-Pert Pro.

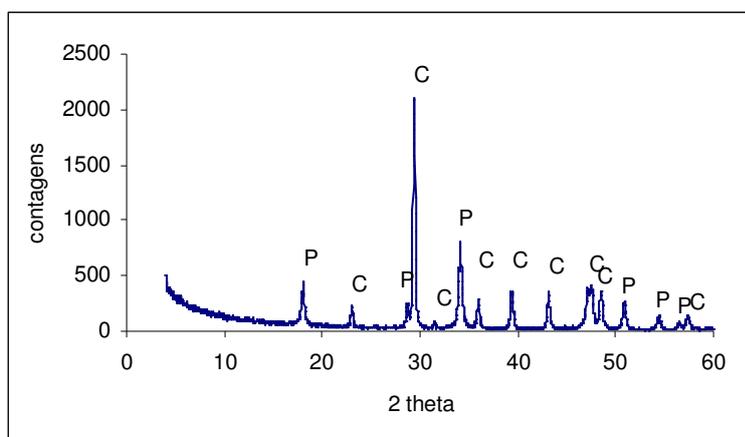


Fig. 6.23 DRX da cal aérea

A cal aérea hidratada utilizada revelou a presença de calcite (C) e portlandite (P).

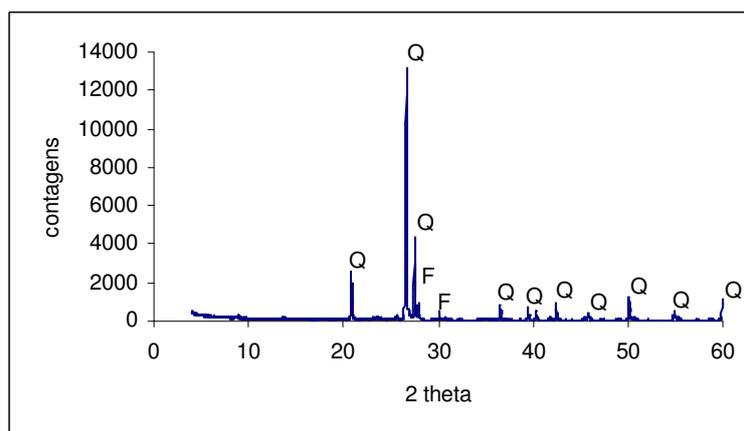


Fig. 6.24 DRX da areia

O quartzo (Q) é o principal constituinte da areia de rio; observa-se também a presença de feldspato (F). Outros minerais como filossilicatos e mica/ilite estão presentes de forma vestígio.

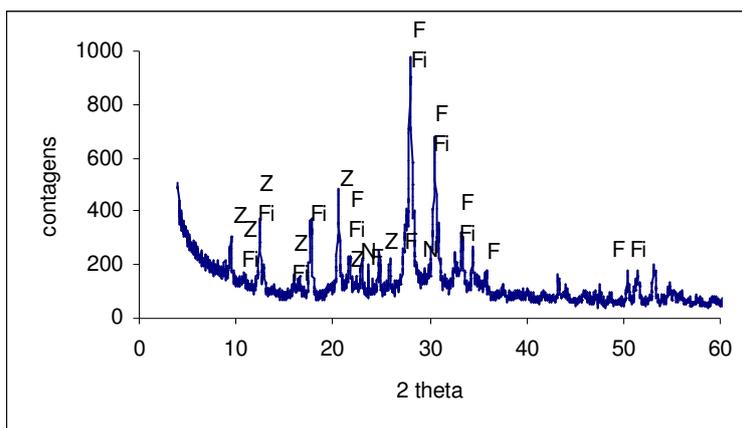


Fig. 6.25 DRX da Pozolana de Cabo Verde (PCV)

A Pozolana de Cabo Verde tem como constituintes principais feldspatos, principalmente plagioclase (F), filipsite (Fi), zeólitos, provavelmente chabazite (Z), e vestígios de nefelina (N). Analisando os resultados da DRX detecta-se uma banda entre os 25° e os 37° (2θ), que indica a presença de material amorfo.

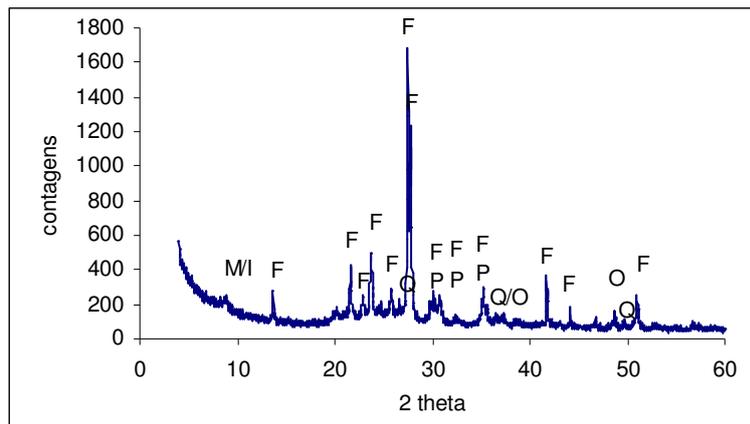


Fig. 6.26 DRX da Pozolana dos Açores (PA)

O difractograma da Pozolana dos Açores revela a presença maioritária de feldspatos, fundamentalmente anortoclase (F), e traços de quartzo (Q), olivina (O) e mica/ilite (M/I). Embora de forma menos acentuada que no caso da Pozolana de Cabo Verde, observa-se também uma banda entre os 20º e os 33º presente indicadora da existência de material amorfo.

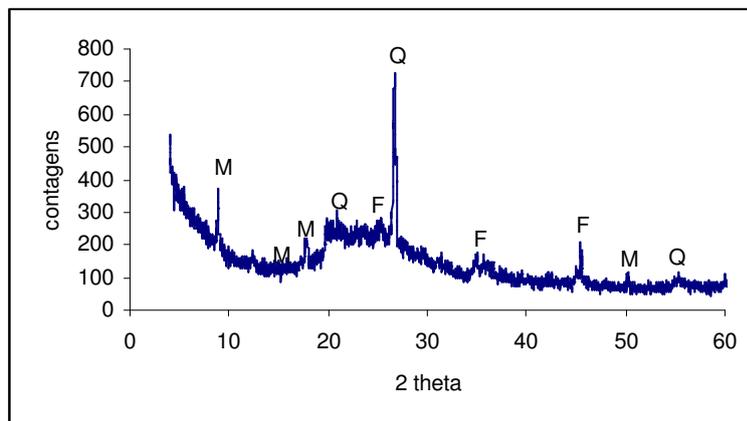


Fig. 6.27 DRX do Metacaulino de Alvarães

O Metacaulino de Alvarães é composto por material amorfo, quartzo (Q), feldspatos (F) e muscovite (M).

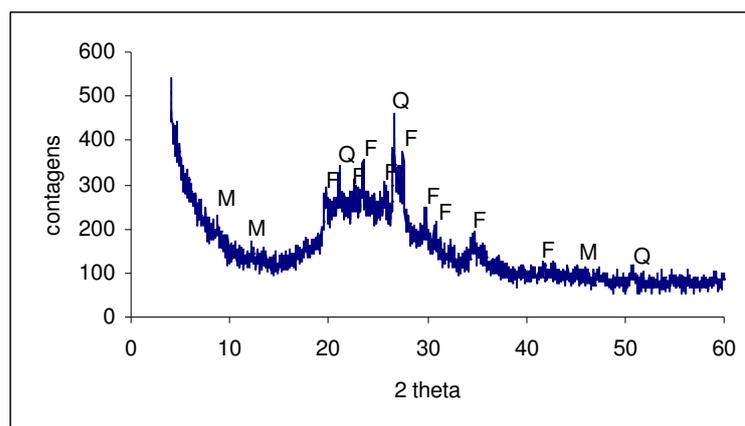


Fig. 6.28 DRX do Metacaulino Industrial

O Metacaulino Industrial é o material onde foi detectada a maior banda, indicativa de presença abundante de material amorfo. Este material é, à semelhança do Metacaulino de Alvarães, composto por feldspatos (F), quartzo (Q) e muscovite (M).

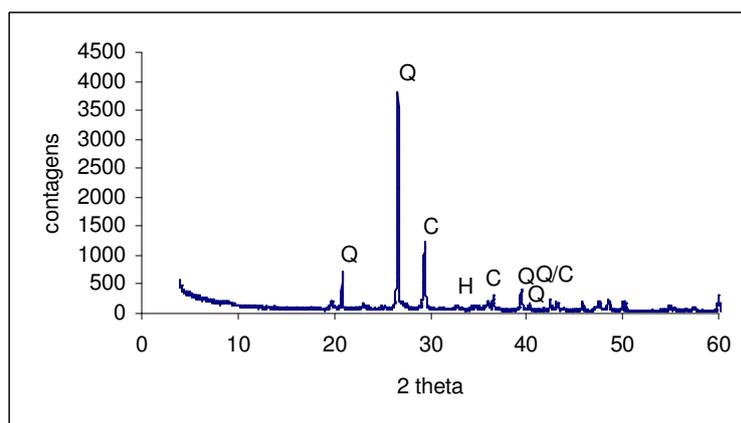


Fig. 6.29 DRX do Pó de Tijolo

Constituído principalmente por quartzo (Q) e calcite (C), contendo adicionalmente vestígios de hematite (H), o Pó de Tijolo é o material que exhibe menor banda indicadora de material amorfo.

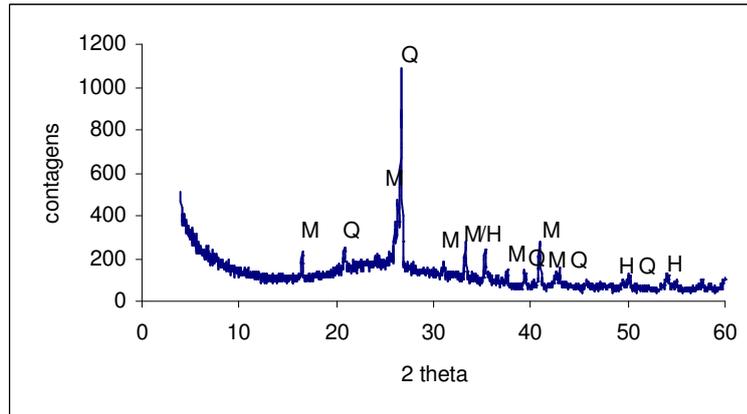


Fig. 6.30 DRX das Cinzas Volantes

Contendo apreciável quantidade de material amorfo, as Cinzas Volantes têm como principais constituintes cristalinos: quartzo (Q), mulite (M) (devido às elevadas temperaturas atingidas durante o processo produtivo) e hematite (H).

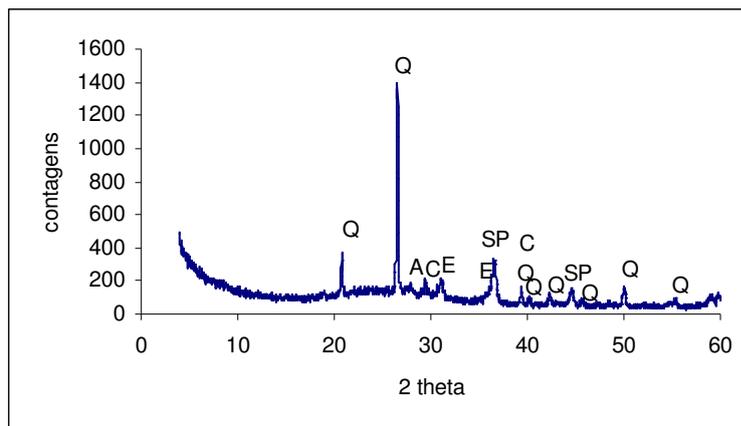


Fig. 6.31 DRX do Resíduo de Argila Expandida

Os constituintes do Resíduo de Argila Expandida são: quartzo (Q), espinela (SP), calcite (C), estantite (E) e anortite (A). É visível uma banda indicativa da existência de material amorfo.

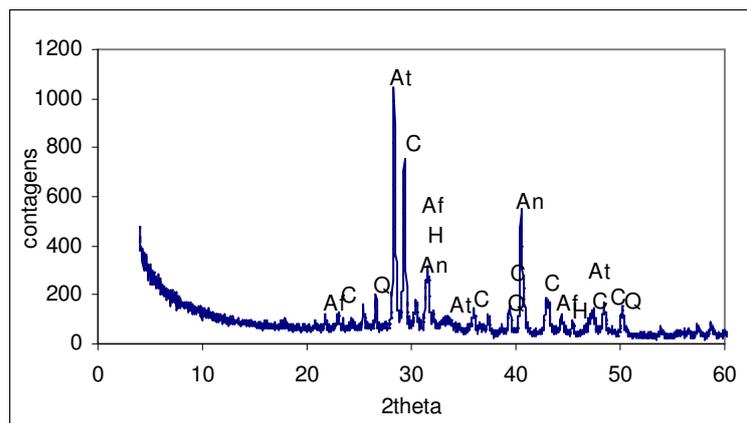


Fig. 6.32 DRX das Cinzas de Papel

A DRX das Cinzas de Papel revela que são compostas por Anortite (At), Calcite (C), Aftitalite (Af), Halite (H), Quartzo (Q) e Anidrite (An). O seu conteúdo em cloretos e sulfatos compromete o seu desempenho enquanto componente de argamassas, sendo por este motivo, o produto Cinzas de Papel retirado como possibilidade de utilização nas argamassas a estudar.

6.1.2.7 Visualização ao MEV

A visualização das amostras foi efectuada no equipamento FEG SEM HITACHI S4100.

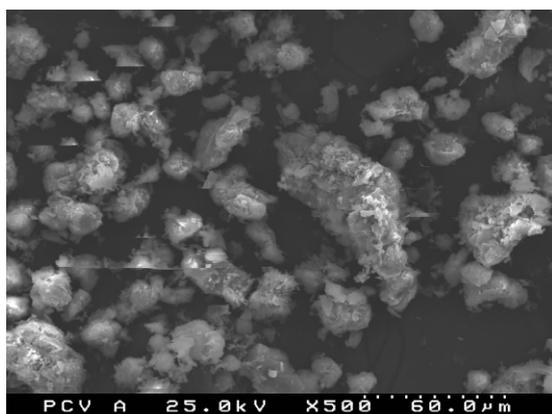


Fig. 6.33 Pozolana de Cabo Verde, ampliada 500x; visualização geral

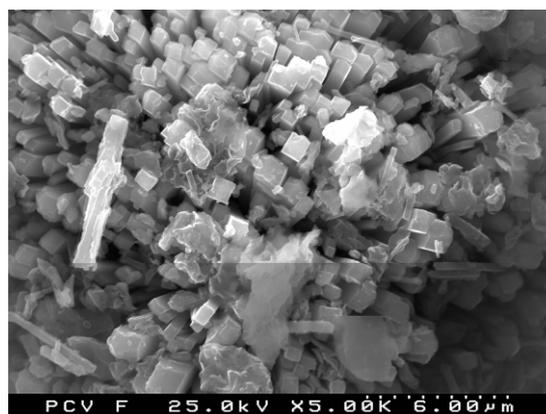


Fig. 6.34 Presença de filipsite na Pozolana de Cabo Verde

A Pozolana de Cabo Verde é constituída por elementos de diferentes dimensões e morfologia (Fig. 6.33), resultantes de uma composição mineralógica variada. Através da associação de EDS à MEV, verifica-se que os elementos predominantes na pozolana de Cabo Verde são silício e

alumínio, seguidos por potássio e sódio, embora a análise por FRX (Tab.6.5) tenha apontado para teores relativamente baixos de sódio e teor em cálcio mais relevante. A presença de filipsite é confirmada através da visualização no MEV (Fig. 6.34) e da determinação da sua composição por EDS (Si, Al, Ca, Na e K).

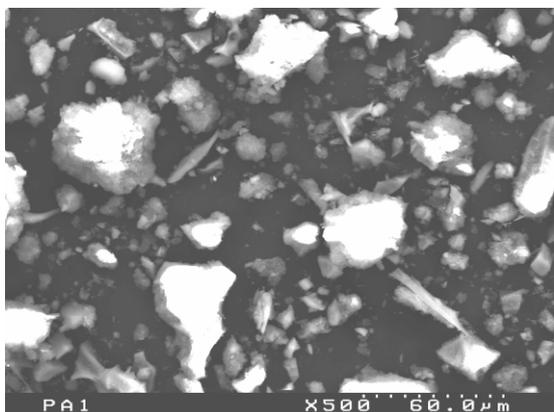


Fig. 6.35 Pozzolana dos Açores, ampliada 500x; visualização geral

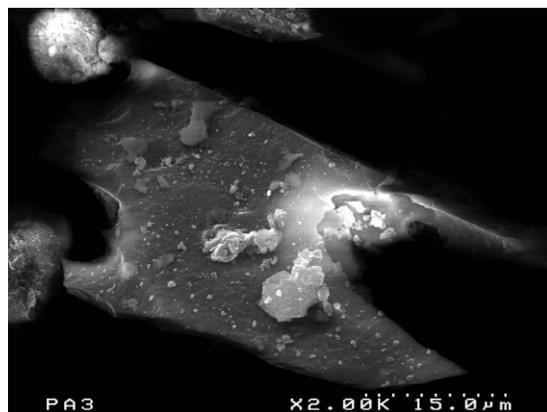


Fig. 6.36 Pozzolana dos Açores, ampliada 2000x

A Pozzolana dos Açores, à semelhança da Pozzolana de Cabo Verde, apresenta grande diversidade dimensional e morfológica das partículas constituintes (Fig. 6.35). A nível composicional, a análise EDS revela que o silício é o elemento principal, seguido pelo alumínio; os teores em potássio, ferro e sódio são muito semelhantes e existem quantidades menores de cálcio, titânio e magnésio. A Fig. 6.36, mostra uma partícula de pozolana com maior ampliação (2000x), sendo visível a sua forma heterogénea.

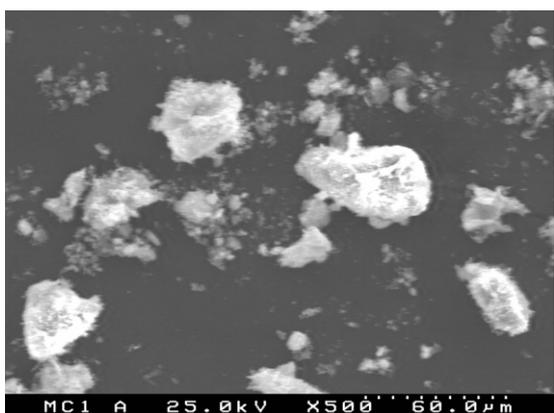


Fig. 6.37 Metacaulino de Alvarães, ampliado 500x; visualização geral

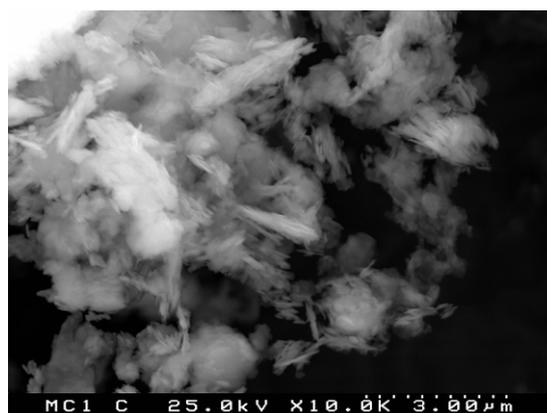


Fig. 6.38 Metacaulino de Alvarães, ampliada 10 000x

Embora com partículas de dimensões variáveis (Fig. 6.37), o Metacaulino de Alvarães apresenta elevada homogeneidade morfológica, visível a grandes ampliações (Fig. 6.38). A análise EDS revelou como fundamentais constituintes o silício e o alumínio.

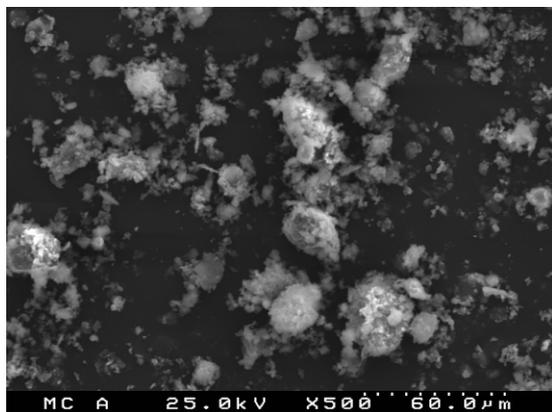


Fig. 6.39 Metacaulino Industrial, ampliado 500x; visualização geral

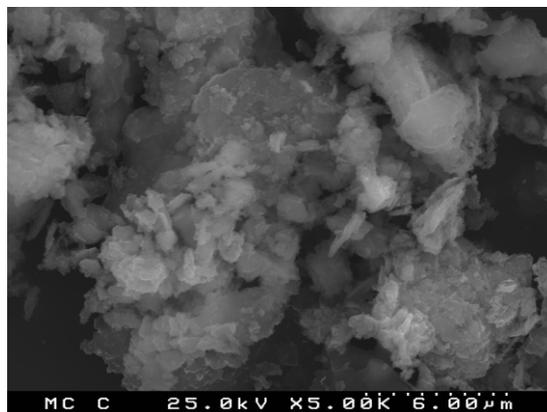


Fig. 6.40 Metacaulino Industrial, ampliação 5000x

A imagem obtida no MEV do Metacaulino Industrial (Fig. 6.39) mostra partículas de dimensão inferior às do Metacaulino de Alvarães, embora exista igualmente alguma heterogeneidade dimensional, devido a aglomeração das partículas muito finas, com a humidade. Uma ampliação de 5000 vezes permite observar algumas zonas amorfas (Fig. 6.40). Com alumínio e silício como principais elementos constituintes, a análise EDS revelou também algum teor em cálcio.

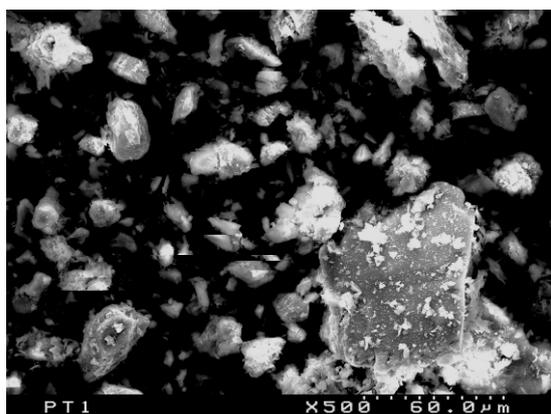


Fig. 6.41 Pó de Tijolo, ampliado 500x; visualização geral

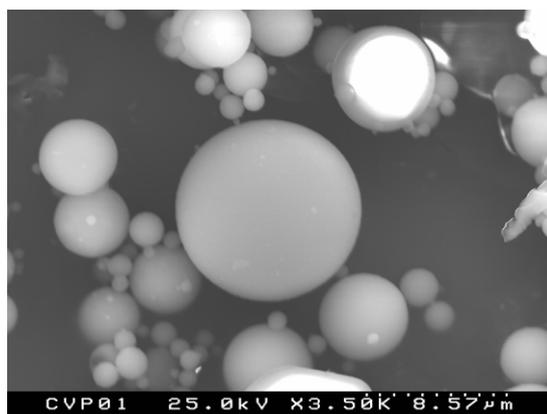


Fig. 6.42 Cinzas Volantes, ampliadas 3500x; visualização geral

O Pó de Tijolo tem grande variabilidade dimensional e morfológica, conforme é visível na Fig. 6.41. A sua composição é constituída pelos seguintes elementos, por ordem percentual decrescente (segundo dados EDS): silício, alumínio, cálcio, ferro, potássio, magnésio.

As Cinzas Volantes apresentam morfologia uniforme e dimensão variável (Fig. 6.42). Os elementos preponderantes são silício e alumínio, seguidos de cálcio, ferro, potássio, sódio, magnésio e titânio (EDS).

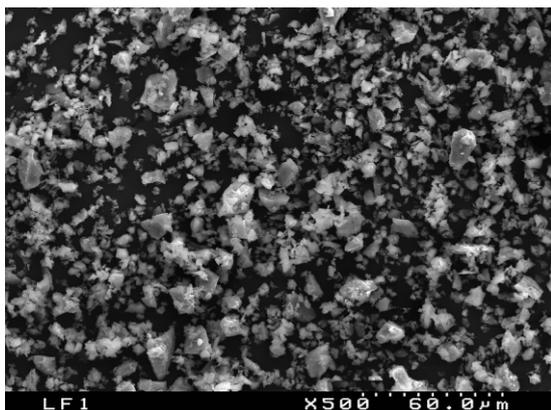


Fig. 6.43 Resíduo de Argila Expandida, ampliado 500x; visualização geral

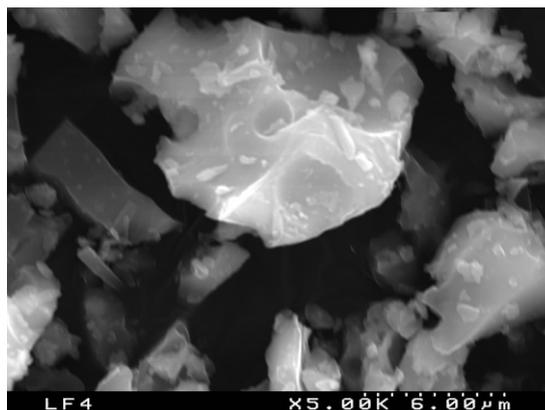


Fig. 6.44 Resíduo de Argila Expandida, ampliada 5000x

Conforme é visível nas Fig. 6.43 (ampliação x500) e Fig. 6.44 (ampliação x5000), o Resíduo de Argila Expandida é constituído por partículas de forma variável e com alguma dispersão dimensional. Os elementos detectados por EDS são, por ordem decrescente de presença: silício, alumínio, ferro, potássio e cálcio.

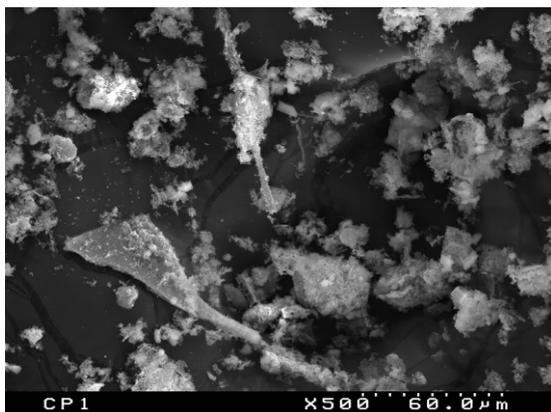


Fig. 6.45 Resíduo de Cinzas de Papel, ampliado 500x; visualização geral

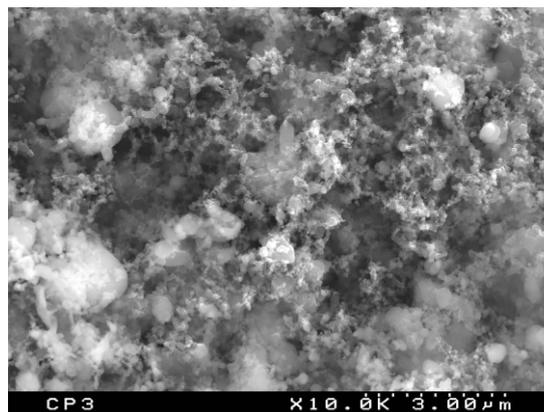


Fig. 6.46 Resíduo de Cinzas de Papel, ampliadas 10 000x

As Cinzas de Papel são constituídas por partículas muito finas que se aglomeram (Fig. 6.45, Fig. 6.46) à semelhança das partículas de Metacaulino, o que explica a sua elevada superfície específica. Não sustentando a análise efectuada por FRX, a análise elementar da fracção geral feita por EDS dá como principais elementos o fósforo, seguido de silício, cálcio, magnésio e alumínio.

Entre os diversos materiais potencialmente pozolânicos analisados, apenas as Cinzas de Papel oferecem maiores dúvidas relativamente ao desenvolvimento de uma reacção pozolânica, devido à sua composição química (FRX), não coincidente com a análise EDS. Os restantes materiais possuem elevadas quantidades de silicatos e aluminatos e, excluindo o Pó de Tijolo, exibem, na análise por DRX, presença abundante de material amorfo. Através dos vários resultados obtidos, é possível inferir que os materiais Metacaulino de Alvarães e, principalmente, Metacaulino Industrial, deverão ter maior reactividade pozolânica devido à junção dos seguintes factores fundamentais: composição rica em silício e alumínio; elevada quantidade de material amorfo e elevada superfície específica.

6.1.3 Reactividade Pozolânica

Foi medida a reactividade pozolânica dos materiais utilizados, através de diversas técnicas de ensaio, procurando determinar a reactividade dos materiais e a técnica mais adequada de avaliação desse parâmetro.

6.1.3.1 Ensaio aplicados

- **Caderno de Encargos para o Fornecimento e Recepção de Pozolanas/RBLH [166]**
Segundo o 'Caderno de Encargos para o Fornecimento e Recepção de Pozolanas' [166], documento anexo do 'Regulamento de Betões e Ligantes Hidráulicos', as pozolanas são classificadas segundo a sua reactividade como Pozolana do tipo I (pozolanas de alta reactividade) e Pozolana do tipo II (pozolanas fracas), conforme os requisitos especificados na Tab.6.6.

Tab.6.6 Classificação de pozolanas segundo o Caderno de Encargos para o Fornecimento e Recepção de Pozolanas [166]

Determinação	Idade	Pozolana do tipo I	Pozolana do tipo II
Superfície Específica	-	3000 cm ² /g	2000 cm ² /g
Resistência à flexão	7 dias	1,0 MPa	-
	28 dias	2,0 MPa	1,0 MPa
Resistência à compressão	7 dias	2,0 MPa	-
	28 dias	6,0 MPa	3,0 MPa

Adicionalmente, este documento exige um resíduo máximo de 5% no peneiro de 0,59mm de abertura e, em casos em que o betão ou argamassa produzidos com a pozolana estejam sujeitos a acções químicas agressivas, um ensaio de pozolanicidade positivo.

Os ensaios mecânicos são efectuados em provetes prismáticos com dimensões de 40 mm x 40 mm x 160mm, moldados a partir de uma mistura de 250g de pozolana e 750g de cal aérea hidratada, com a quantidade de água determinada com recurso à sonda de consistência. Nas primeiras 72h após execução, os provetes são mantidos nos moldes, cobertos por uma chapa metálica (Fig. 6.47) em local com $20^{\circ}\text{C}\pm 1^{\circ}\text{C}$ e humidade relativa a 95%. Em seguida, após desmoldagem e até à data de ensaio, são conservados em água à mesma temperatura.



Fig. 6.47 a) e b) Preparação e condicionamento de provetes

- **ASTM C593-95 [13]**

A norma ASTM C593-95 [13] estabelece requisitos a serem cumpridos por cinzas volantes e demais pozolanas utilizadas em argamassas de cal (Tab.6.7).

Tab.6.7 Requisitos para pozolanas segundo a ASTM C593-95 [13]

Determinação	Máximo	Mínimo
Fracção solúvel	10%	-
Retidos 600 μm	2%	-
Retidos 75 μm	30%	-
Resistência à compressão 7 dias	-	6,0 MPa
Resistência à compressão 28 dias	-	6,0 MPa

Para a realização dos ensaios de resistência mecânica à compressão são preparados provetes cúbicos com dimensões 50 mm x 50 mm x 50 mm (Fig. 6.48), com uma mistura de 180g de cal aérea hidratada, 360g de pozolana e 1480g de areia normalizada [15] e segundo a metodologia

especificada [11, 13, 16]. Os provetes são colocados em câmara com vapor a $54\pm 2^{\circ}\text{C}$ durante 7 dias; após desmoldagem são mantidos à temperatura de $23\pm 2^{\circ}\text{C}$ e 95 a 100% de humidade relativa até à data de ensaio.



Fig. 6.48 Provetes preparados segundo a norma ASTM 593-95 após ensaio à compressão

- **Ensaio de condutividade [125]**

O ensaio de condutividade efectuado foi baseado na metodologia descrita por Luxán [125], tendo sido utilizados 5g de amostra (pozolana) e uma solução saturada em $\text{Ca}(\text{OH})_2$. O ensaio, efectuado à temperatura de 40°C , mede a condutividade inicial de uma solução saturada de hidróxido de cálcio e a variação da condutividade durante 120s após adição do material pozolânico. A redução da condutividade com a fixação de iões por reacção com os materiais pozolânicos deu azo à classificação da actividade pozolânica conforme expresso na Tab.6.8.

Tab.6.8 Avaliação da actividade pozolânica por medição de condutividade [125]

Classificação do material	Variação de condutividade (mS/cm)
Não pozolânico	< 0,4
Pozolanidade variável	0.4 a 1.2
Boa pozolanidade	>1.2

- **NP EN 196-5 (1996) – Métodos de ensaios de cimentos. Parte 5: Ensaio da pozolanidade de cimentos pozolânicos [97]**

A norma NP EN 196-5 [97] propõe um ensaio para determinação da pozolanidade de cimentos pozolânicos que é indicado para pozolanas na mistura de 75% de cimento portland tipo I da classe 42,5 e 25% de pozolana, pela norma NP 4220 (1993) – Pozolanas para betão. Definições, especificações e verificação da conformidade [96].

Este ensaio baseia-se na determinação da quantidade de hidróxido de cálcio em solução aquosa, mantida a 40°C, em contacto com o cimento hidratado e comparação com a quantidade de hidróxido de cálcio que causa saturação de solução com a mesma alcalinidade [97]. Pretende-se, desta forma, aferir a fixação de hidróxido de cálcio após um período de tempo de 8 ou 15 dias.

6.1.3.2 Resultados

- Caderno de Encargos para o Fornecimento e Recepção de Pozolanas/RBLH [166]

Tab.6.9 Resistência à flexão e à compressão (RBLH) [166]

Material	RF 7 dias	RC 7 dias	RF 28 dias	RC 28 dias
PCV	n.r.	n.r.	2,87	7,73
PA	n.r.	n.r.	1,35	2,88
MCA	n.r.	n.r.	0,65	2,36
MCI	0,34	1,01	0,46	2,68
PT	n.r.	n.r.	2,17	9,30
PTCON	n.r.	n.r.	2,23	5,40
CV	n.r.	n.r.	0,35	1,02
RAE	0,40	1,05	1,83	5,85
CP	0,10	0,45	0,43	1,26

Segundo o Caderno de Encargos para Fornecimento e Recepção de Pozolanas [166], as únicas pozolanas passíveis de classificação como Pozolanas do Tipo I e, portanto, de elevada reactividade são a Pozolana de Cabo Verde (PCV) e o Pó de Tijolo (PT), devido aos valores de resistência mecânica à flexão e compressão desenvolvidos pelas pastas de cal e pozolana aos 28 dias e à sua superfície específica (Tab.6.4). Como Pozolanas do Tipo II e, portanto, de baixa reactividade são classificados os materiais pó de tijolo moído com granulometria adaptada às argamassas de Comímbriga (PTCON) e o resíduo de argila expandida (RAE). Os restantes materiais analisados não entram na classificação dos materiais pozolânicos, sendo a sua reactividade, segundo este critério, demasiado baixa para os considerar materiais pozolânicos. A Pozolana dos Açores (PA) encontra-se, contudo, muito próxima de atingir os valores mínimos de resistência aos 28 dias estipulados para ser classificada como Pozolana do Tipo II.

- **ASTM C593-95 [13]**

Tab.6.10 Resistência à compressão (ASTM C593-95 [13])

Material	RC 7 dias	RC 28 dias
PCV	2,27	2,20
PA	1,97	2,26
MCA	4,47	3,84
MCI	11,22	9,80
PT	2,33	2,05
CV	1,54	1,40
RAE	5,50	4,44
CP	1,41	1,60

A classificação segundo a norma ASTM C593-95 dos materiais em análise estabelece que o único material que cumpre os requisitos mínimos de resistência aos 7 e 28 dias é o Metacaulino Industrial (Tab.6.10). Os ensaios com todos os restantes materiais produziram resistências abaixo de 6,0 MPa, sendo especialmente baixos os valores obtidos pelas cinzas de papel (CP) e pelas cinzas volantes (CV) e similares os valores obtidos pelas pozolanas naturais (PCV e PA) e pelo pó de tijolo (PT). É curioso, e relevante, o decréscimo de resistência dos provetes dos 7 dias para os 28 dias, tendo como únicas excepções a Pozolana dos Açores (PA) e as Cinzas de Papel (CP).

- **Ensaio de condutividade [125]**

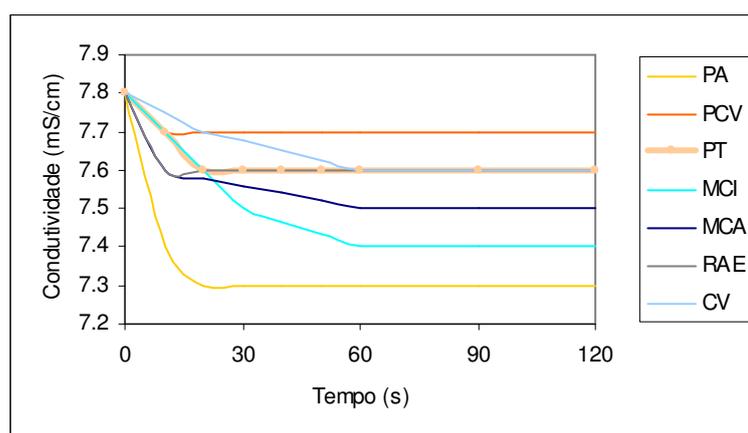


Fig. 6.49 Variação da condutividade [125]

Tab.6.11 Variação de condutividade [125]

Material	Δ ms/cm	Classificação
PCV	0,1	N.P.
PA	0,5	P.V.
MCA	0,3	N.P.
MCI	0,4	P.V.
PT	0,2	N.P.
CV	0,2	N.P.
RAE	0,2	N.P.

Segundo esta metodologia de ensaio, a maioria dos materiais apresentaram baixas variações de condutividade (Fig. 6.49, Tab.6.11), sendo classificados como Não Pozolânicos (N.P.). Apenas a Pozolana dos Açores e o Metacaulino Industrial foram classificados como materiais com Pozolanidade Variável (P.V.).

- **NP EN 196-5 (1996) – Métodos de ensaios de cimentos. Parte 5: Ensaio da pozolanidade de cimentos pozolânicos [97]**

Tab.6.12 Concentração de íões OH⁻ e CaO (NP EN 165-5) [97]

Material	Concentração OH ⁻ (mmoles/l)	Concentração CaO (mmoles/l)
PCV	90,58	4,11
PA	45,26	6,37
MCA	38,85	7,18
MCI	15,43	5,57
MCA	38,85	7,18
PT	59,26	4,63
CV	30,43	0,91
RAE	55,93	0,74

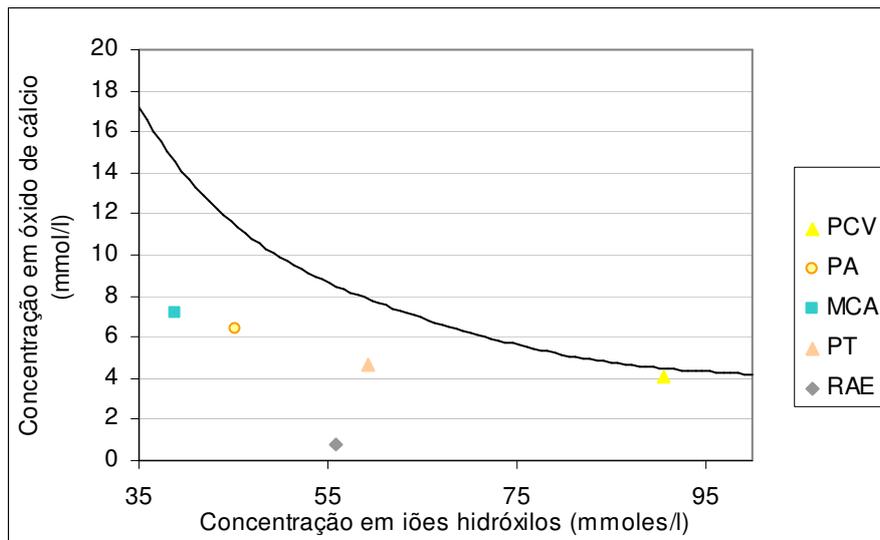


Fig. 6.50 Concentração em íons OH⁻ e em CaO (NP EN 1015-5) [97]

Os resultados deste ensaio, efectuado aos oito dias, apontam para uma reactividade elevada dos Resíduos de Argila Expandida, reactividade intermédia da Pozolana dos Açores, do Metacaulino de Alvarães e do Pó de Tijolo e menor reactividade da Pozolana de Cabo Verde.

Os materiais Metacaulino Industrial e Cinzas Volantes apresentaram valores que não se enquadram dentro da área do gráfico devido à menor concentração em íons hidróxilo. O material Cinzas de Papel resultou em elevada concentração de íons hidróxilo, não se enquadrando na área do gráfico.

6.1.3.3 Visualização de produtos de reacção no MEV

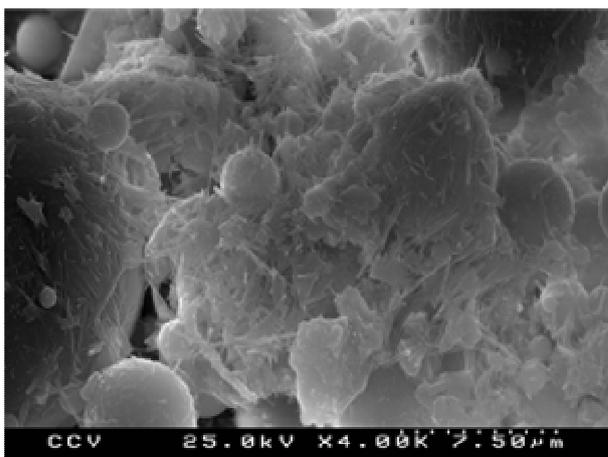


Fig. 6.51 Cinzas volantes e cal aérea com 1 mês

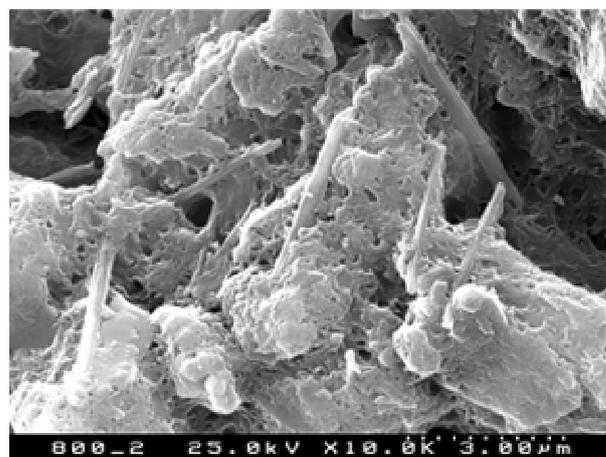


Fig. 6.52 Pó de tijolo e cal aérea com 1 mês

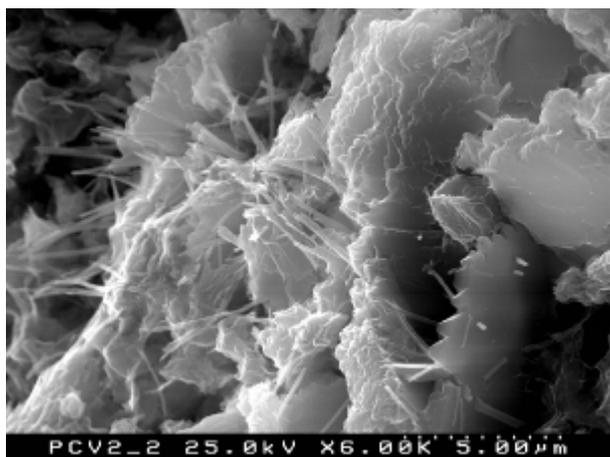


Fig. 6.53 Argamassa de cal aérea e pozolana de Cabo Verde com 1 semana

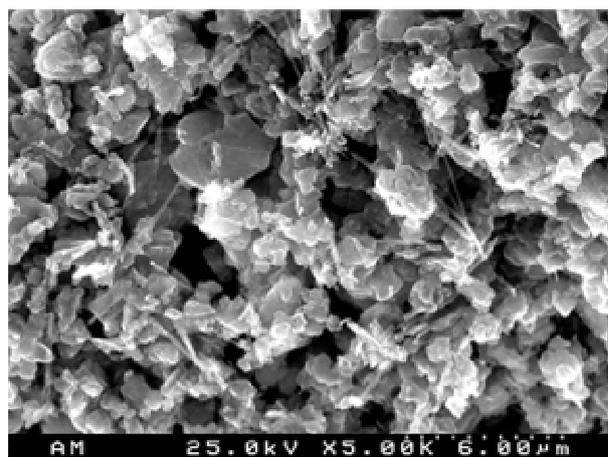


Fig. 6.54 Argamassa de cal aérea e metacaulino industrial com 1 mês

Foi efectuada a análise ao MEV de argamassas com pozolanas e pastas de cal e pozolana, de forma a verificar a existência de produtos de reacção em várias idades.

Nas imagens presentes nas Fig. 6.51a Fig. 6.54 permitem verificar a formação de produtos de reacção entre diversos materiais pozolânicos e o hidróxido de cálcio. Na Fig. 6.51 é visível a formação de produtos de reacção sobre as cinzas volantes, criando ligações entre elas. A formação de filamentos tubulares de C-S-H, contribuindo também para a ligação interna dos constituintes da argamassa é particularmente visível na Fig. 6.53, numa argamassa com Pozolana de Cabo Verde com apenas uma semana.

6.1.3.4 Discussão de resultados

Face aos resultados extremamente díspares, dos ensaios de reactividade pozolânica realizados sobre os diversos materiais, é necessária uma reflexão, pois todos são habitualmente utilizados como indicadores de reactividade pozolânica de diversos produtos.

Os ensaios preconizados pelo CEFRR/RBLH [166] e pela ASTM C593-95 [13] são similares pelo padrão de medição da reacção pozolânica baseado na resistência mecânica de provetes. Contudo, enquanto a regulamentação Portuguesa prevê que esta medição se realize em pastas de cal e pozolana, a norma Americana estabelece essa medição em provetes de argamassa (cal, pozolana e agregado). Ambos os documentos especificam a utilização de uma medida de cal, em massa, para três medidas de pozolana; contudo diversas diferenças no processo de execução e condicionamento das pastas podem produzir resultados diferentes, conforme expresso na Fig. 6.12.

Tab.6.13 Comparação CEFRP/RBLH [166] e ASTM C593-95 [13]

Documento	Proporção cal:pozolana em massa	Quantidade de água	Condicionamento primeiros 7 dias	Condicionamento até 28 dias
CEFRP/RBLH [13]	1:3	Baixa (pasta pouco trabalhável)	72h- 20±1°C; 95%HR Tempo restante em água	20±1°C; Em água
ASTM C593-95 [14]	1:3	Estabelecida; Argamassa trabalhável	54±2°C; Em vapor	23±2°C ; 95 a 100% HR

Factores como a quantidade de água adicionada e o condicionamento nos primeiros 7 dias poderão ser determinantes para os resultados obtidos. O facto de os ensaios serem efectuados em idades baixas também é fulcral dado que as pozolanas têm um tempo de reacção demorado, que poderá ser diferente de pozolana para pozolana. Como exemplo, os resultados baixos obtidos pelo material Cinzas Volantes não é representativo da sua reactividade, que se sabe ser extremamente lenta. Seria de esperar, face às análises de materiais que foram efectuadas, que o Metacaulino Industrial produzisse os melhores resultados de reactividade pozolânica, o que acontece, de facto, quando este produto é analisado através do ensaio ASTM [13]. O ensaio de condutividade aplicado a este material avalia-o como um dos materiais capazes de estabelecer uma reacção rápida em meio aquoso. Contudo, o ensaio preconizado pelo CEFRP/RBLH [166] classifica-o como material não pozolânico. Um padrão similar, mas menos acentuado, é preconizado pelo Metacaulino de Alvarães. Este comportamento pode eventualmente ser explicado pelo condicionamento inicial adoptado no ensaio Português, colocando os provetes em água após apenas 72h, podendo interferir com a reacção pozolânica em curso. Contudo, com a manutenção dos provetes em água, há sempre um acréscimo de resistência dos 7 para os 28 dias. O facto de ser usada uma temperatura mais elevada na primeira fase da reacção no caso da norma ASTM [13] também potencia uma reacção mais rápida, proporcionando resistências iniciais mais elevadas. É possível que a subsequente diminuição de temperatura desempenhe um papel na diminuição quase generalizada da resistência mecânica dos 7 para os 28 dias. Embora o facto da existência de um menor conteúdo de água, no caso da metodologia do CEFRP/RBLH [166], pareça ter um efeito transversal a todos os materiais analisados, a reacção entre o hidróxido de cálcio e os materiais pozolânicos não tem um único produto final e, dependendo da estequiometria das reacções produzidas com cada material específico, decorrem diferentes necessidades de água. Por este motivo, a diferente quantidade de água utilizada pelos ensaios usados, poderá ter alguma repercussão no resultado final.

O ensaio de condutividade atribui uma reacção mais eficaz à Pozolana dos Açores, material com elevado teor em sílica e alumina e superfície específica relativamente elevada. Contudo, esta reactividade não é confirmada pelos restantes ensaios mecânicos. Os materiais Metacaulino Industrial e Metacaulino de Alvarães são os que, a seguir à Pozolana dos Açores, são melhor classificados por esta metodologia, factor relacionável com os resultados produzidos pela aplicação do ensaio ASTM [13]. Os ensaios em meio aquoso, de condutividade e da NP EN 196-5 [97] baseiam-se em pressupostos diferentes: enquanto o ensaio de condutividade traduz a velocidade da reacção pozolânica que se dá imediatamente a seguir à junção dos materiais, o ensaio da NP EN 196-5 [97] traduz já uma reacção que se dá ao longo de algum tempo. A reacção pozolânica caracteriza-se como uma reacção lenta e ensaios efectuados em diferentes momentos temporais darão resultados diferentes devido à diferença da velocidade de reacção dos diversos materiais.

Da análise destes resultados, conjuntamente com a análise dos materiais efectuada em 6.1.2, parece provável que o ensaio ASTM C593-95 [13] retrate de forma mais realista a reactividade pozolânica dos diversos materiais analisados, tendo em conta a aproximação à finalidade de utilização. Entre os ensaios em meio aquoso, o ensaio da NP EN 196-5 [97] parece retratar melhor a reacção pozolânica, pois tem maior tempo de desenvolvimento não se baseia na reacção imediata. Contudo, a análise dos resultados obtidos não é conclusiva. A análise de argamassas com os diversos materiais e os resultados daí decorrentes poderão acrescentar nova informação. A monitorização das reacções que ocorrem entre as diversas pozolanas e o hidróxido de cálcio, em diferentes condições ambientais será um passo necessário para a compreensão destas variações.

6.2 Análises Preliminares

De forma a estabelecer uma base para a análise de argamassas de cal contendo pozolanas, foi efectuada uma campanha de ensaios preliminar, com o intuito de avaliar a influência deste materiais nas propriedades das argamassas, em comparação com argamassas de cal aérea. Para esta campanha de ensaios foram escolhidas duas pozolanas naturais, a Pozolana de Cabo Verde e a Pozolana dos Açores.

Tab.6.14 Ensaios efectuados a argamassas na análise preliminar

Estado do produto	Ensaio	Datas	de Normas
Argamassa em pasta	Massa volúmica		NP EN 1015-6
	Consistência espalhamento	por	NP EN 1015-3
	Resistência à tracção por flexão	28d, 90d	NP EN 1015-11
Produto endurecido	Resistência à compressão	28d, 90d	NP EN 1015-11
	Módulo de elasticidade dinâmica	28d, 90d	Cahier 2669-4 CSTB
	Capilaridade (24h) - início 5min	28d, 90d	Cahier 2669-4 CSTB
	Variações dimensionais	28d, 90d	Cahier 2669-4 CSTB
	Susceptibilidade à fendilhação (Fs máx)	28d	FE Pa 37
	Avaliação da capacidade de impermeabilização	90 d	FE Pa 38
	Envelhecimento artificial acelerado ciclos chuva – gelo	90 d	Cahier 2669-4 CSTB
	Envelhecimento artificial acelerado ciclos chuva - calor	90 d	Cahier 2669-4 CSTB
	Controle da carbonatação	28d, 90d	

Estes ensaios foram divididos em duas fases, compreendendo a primeira fase a análise de argamassas de cal aérea com pozolanas e uma argamassa de cal aérea e a verificação das

mudanças introduzidas nas características das argamassas pela utilização de pozolanas. Na segunda fase, foram analisadas diferentes composições e condicionamentos, de forma a aferir as melhores composições para utilização em conservação e reabilitação de edifícios antigos e também a influência das condições de cura neste tipo de argamassas.

Os ensaios efectuados tiveram como finalidade uma caracterização física e mecânica completa das argamassas, tendo em vista a sua utilização em acções de reabilitação de edifícios antigos, de forma a permitir a compatibilização com argamassas e alvenarias existentes e encontram-se discriminados na Tab.6.14.

As determinações e ensaios realizados foram efectuados com base nas técnicas geralmente utilizadas no Laboratório de Ensaio de Revestimento de Paredes do LNEC (LNEC/LERevPa), ou adaptações dessas técnicas aplicáveis aos materiais utilizados.

Em seguida descrevem-se pormenorizadamente os diversos ensaios efectuados, quer sobre a argamassa em pasta, quer sobre o produto endurecido.

6.2.1.1 Determinação da massa volúmica

A determinação da massa volúmica foi efectuada segundo a norma EN 1015-6 [43]. O procedimento que permite a determinação da massa volúmica da argamassa em pasta percorre os seguintes passos: taragem de recipiente metálico com capacidade de um litro, enchimento do recipiente até meia altura, compactação da argamassa, inclinando e deixando cair o molde 10 vezes, em lados alternados, enchimento do recipiente e nova compactação. A pesagem e posterior subtracção do valor de taragem proporcionam o resultado final.

6.2.1.2 Determinação da consistência por espalhamento

Este ensaio foi efectuado segundo a norma EN 1015-3 [37]. Os aparelhos necessários para realização deste ensaio consistem num molde tronco-cónico, em chapa metálica galvanizada e com dimensões normativas e numa mesa de consistência com características expressas na norma.

O ensaio inicia-se com o enchimento do molde cónico com argamassa, em duas camadas, compactando 10 vezes cada camada com um varão de compactação. Em seguida, retira-se a argamassa em excesso e remove-se o molde. A argamassa espalha-se por efeito das 15

pancadas a efectuar em 15 segundos. Efectua-se a medição em milímetros nos diâmetros gravados na mesa de consistência.

6.2.1.3 Resistência à tracção por flexão

A norma utilizada para execução deste ensaio foi a EN 1015-11 [38]. Os provetes utilizados têm as dimensões 40mm x 40mm x 160mm, sendo moldados nas condições ambientes de 20°C ± 2°C de temperatura e de 95% ± 5% de humidade relativa, em moldes normalizados e posteriormente mantidos a uma temperatura de 20°C ± 2°C e a uma humidade relativa de 65% ± 5%.

Utilizando uma máquina de ensaios de resistência à flexão que cumpra os requisitos expressos na norma supracitada, efectua-se o ensaio de resistência à flexão através da colocação de cada provete sobre os cilindros de apoio e com o seu eixo longitudinal perpendicular aos apoios e posterior aplicação da carga concentrada a meio vão, com um aumento uniforme (usualmente no intervalo compreendido por 10N/s e 50N/s), para que a rotura ocorra no período de 30s a 90s. O resultado é obtido pela expressão:

$$f = 1,5 \frac{F l}{bd^2}$$

Em que: f – resistência à flexão, em Newtons por milímetro quadrado

b – largura do prisma, em milímetros

d - espessura do prisma, em milímetros

F – carga aplicada no centro do prisma na rotura, em Newtons

l – distância entre os apoios, em milímetros

Este ensaio é usualmente efectuado aos 28 dias e 90 dias, como base para caracterização das argamassas, sendo também efectuado em idades mais avançadas com o intuito de conhecimento da evolução desta propriedade, utilizando-se 3 prismas em cada uma das idades.

6.2.1.4 Resistência à compressão

Este ensaio é também efectuado seguindo a norma EN 1015-11 [38]. Após o ensaio de resistência à flexão, os meios-prismas resultantes são utilizados no ensaio de resistência à compressão, igualmente com base na norma EN 1015-11 [38]. Com o auxílio da máquina de ensaios de resistência à compressão normalizada, é aplicada sobre a face de 40mm x 40mm do meio-prisma uma carga com um aumento uniforme (usualmente situado dentro do intervalo compreendido por

50N/s e 500N/s) para que ocorra a rotura num período de 30s a 90s. O resultado é calculado através da fórmula:

$$R_c = \frac{F_c}{1600}$$

Em que: R_c – resistência á compressão, em Newtons por milímetro quadrado

F_c – carga máxima na rotura, em Newtons

1600 – área dos pratos em milímetros quadrados

Este ensaio é efectuado aos 28 dias e 90 dias e em idades mais tardias, até 4 anos, utilizando-se 6 metades de prisma em cada uma das idades.

6.2.1.5 Módulo de elasticidade dinâmico

O Módulo de Elasticidade Dinâmico é determinado através das especificações do Cahier 2669-4 CSTB [54], sendo utilizado os equipamentos ZRM 001 e ZRM 2005.

Os provetes prismáticos utilizados para este ensaio têm dimensões 40mmx40mmx160mm. O módulo de elasticidade dinâmico resulta da medição da frequência de ressonância derivada da vibração longitudinal dos provetes, através da seguinte expressão:

$$E_d = \frac{4L^2 * F^2 * P}{g}$$

em que: L – comprimento do provete em metros

F – frequência de ressonância longitudinal, em Hz

P – peso volúmico, em N/mm^3

g – aceleração da gravidade em m/s^2

Para este ensaio são necessários três provetes e a obtenção de resultados é efectuada aos 28 dias e 90 dias.

6.2.1.6 Capilaridade

O ensaio de capilaridade é efectuado sobre provetes com as dimensões 40mm x 40mm x 160mm, seguindo o Cahier 2669-4 CSTB [54].

Numa tina preenchida com água até uma altura de 5mm, colocam-se os provetes com a sua maior dimensão em posição vertical, sendo medido o seu aumento de peso ao longo do tempo. O resultado de ensaio traduz-se numa curva regulada pelas expressões de \sqrt{t} nas abcissas e $100 \times M/S$ nas ordenadas, em que:

t – tempo

M – massa

S – secção

O coeficiente de capilaridade (C), que corresponde ao declive da recta entre os pontos $\sqrt{10}$ min e $\sqrt{90}$ min é dado pelo seguinte expressão:

$$C = \frac{(M/S)_{90} - (M/S)_{10}}{\sqrt{90} - \sqrt{10}}$$

Este coeficiente é actualmente expresso em $\text{kg/m}^2 \cdot \text{h}^{1/2}$, seguindo a norma EN 1015-18 [273]. Para cada ensaio, a efectuar aos 28 dias e 90 dias, foram utilizados três provetes prismáticos.

6.2.1.7 Variações dimensionais

As variações dimensionais após desmoldagem foram medidas conforme expresso no Cahier 2669-4 CSTB [54] utilizando um comparador digital com precisão de 0,03mm.

Moldam-se três provetes com 40mm x 40mm x 160mm, munidos de dispositivos de medição nas extremidades. Após desmoldagem, regista-se a variação do comprimento dos provetes durante um determinado espaço temporal, sendo utilizados três provetes para cada ensaio.

6.2.1.8 Susceptibilidade à fendilhação

Este ensaio foi efectuado segundo a Fe Pa 37 [118]. O processo de moldagem dos provetes para execução dos ensaios de susceptibilidade à fendilhação é idêntico ao processo utilizado para medição das variações dimensionais iniciais, com a excepção de que, na altura de montagem dos aparelhos, prévia ao enchimento dos moldes, a cabeça superior deve ficar imobilizada pelo parafuso, ligado ao transdutor de força.



Fig. 6.55 Ensaio de susceptibilidade à fendilhação

Para determinar a resistência à tracção e o alongamento na rotura, procede-se, aos 28 dias, à movimentação lenta do parafuso de forma a imprimir uma força de tracção no provete. Esta movimentação mantém-se até à rotura e após a abertura da 1ª fenda, até a anulação completa da resistência; para argamassas fracas, continua até a fenda atingir 1mm.

Deste ensaio são retirados o coeficiente de segurança à abertura da 1ª fenda (CSAF) e o coeficiente de resistência à evolução da fendilhação (CREF), dados pelas seguintes expressões:

$$CSAF = \frac{R_t}{F_{r\text{máx}}} \qquad CREF = \frac{G}{F_{r\text{máx}}}$$

em que: R_t – resistência à tracção, em Newtons

$F_{r\text{máx}}$ – força máxima medida durante o ensaio de retracção restringida, em Newtons

G – energia de rotura no ensaio de tracção, em N/mm

Para cada ensaio foram utilizados três provetes.

O critério de classificação é dado pela verificação dos seguintes parâmetros:

$CSAF \geq 1$	e	$CREF \geq 1$	- Fraca fissurabilidade
$CSAF \geq 1$	e	$0,6 \leq CREF \leq 1$	- Média fissurabilidade
$CSAF < 1$	ou	$CREF < 0,6$	- Forte fissurabilidade

O aparelho utilizado neste ensaio e a metodologia de ensaio foram desenvolvidos no LNEC no âmbito de um estudo de investigação [228].

6.2.1.9 Capacidade de impermeabilização (molhagem/secagem)

O aparelho utilizado para medir a capacidade de impermeabilização de um revestimento denomina-se humidímetro [152] e encontra-se descrito na Fe Pa 38 [119]. Este aparelho está provido de sondas metálicas que permitem o registo da tensão eléctrica.

O ensaio efectua-se segundo o procedimento seguinte: utilizando placas de fibrocimento de 150mm x 300mm como suporte, colocam-se três sondas, alinhadas segundo a maior dimensão do provete e com distanciamento mínimo de 5cm entre si, e cobrem-se com argamassa; em seguida preenche-se o suporte com uma camada de 1cm de espessura de argamassa (Fig. 6.56).



Fig. 6.56 Execução de provetes para ensaio de impermeabilização

Após manutenção dos provetes a uma temperatura de $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ e $50\% \pm 5\%$ de humidade relativa, inicia-se o ensaio na idade desejada com a colocação de molduras de vidro acrílico transparente e a impermeabilização lateral dos provetes com uma mistura de 50% de cera de abelha e 50% de pez louro.

Os provetes são colocados na horizontal e as sondas são ligadas ao humidímetro. Efectua-se a molhagem dos provetes com uma lâmina de água de 10 mm durante 30 minutos. Elimina-se a

água e colocam-se os provetes na posição vertical até à estabilização da tensão eléctrica, correspondente a secagem dos provetes.

Os resultados deste ensaio são expressos por um gráfico com o tempo em horas nas abcissas e a tensão eléctrica em mV nas ordenadas. Os parâmetros utilizados na avaliação da capacidade de impermeabilização são:

M – atraso na molhagem (h), medido entre o tempo de início de molhagem e o momento em que a tensão eléctrica desce abaixo de 95% do valor inicial

S – período de humedecimento (h), em que a tensão se mantém abaixo de 95% da tensão inicial

H – intensidade de molhagem (mv.h) dada pela área do gráfico compreendida entre a linha que define a variação da tensão com o tempo e abaixo da linha correspondente ao menor valor dos seguintes: valor médio da tensão antes do ensaio, valor médio da tensão depois do ensaio

À semelhança do ensaio anterior, o aparelho e metodologia utilizados foram desenvolvidos no LNEC no âmbito de estudos de investigação [73, 152].

6.2.1.10 Envelhecimento artificial acelerado

O método de ensaio usado [230] é uma adaptação do método descrito no Cahier 2669-4 CSTB [54]. Para este ensaio foi utilizada a câmara higrotérmica ARALAB FITOCLIMA 700 EDTU.

É aplicada uma camada de argamassa com 10mm de espessura sobre um tijolo cerâmico vazado. Os provetes assim efectuados são sujeitos a ciclos calor-frio, calor-chuva e chuva-gelo. São utilizados 2 provetes de cada argamassa para o ensaio.

- Ciclos calor-frio

Estes ciclos consistem na imposição alternada de uma temperatura de 60°C durante 8h e de uma temperatura de -15°C durante 15 horas, em câmara onde estão colocados os provetes [Fig. 6.57]. Os ciclos são repetidos durante 10 dias.

- Ciclos calor-chuva

Os provetes são submetidos a uma temperatura de 70°C durante 3 horas e, em seguida, a um período de chuva com caudal de 1l/m².min durante 5h. Estes ciclos são intercalados com um período de secagem de 16h e têm a duração de 10 dias.

- Ciclos gelo/degelo

È efectuado um período de chuva com caudal de $1\text{l/m}^2\cdot\text{min}$, durante 8h, seguido de um período com temperatura de -15°C durante 15 horas e de um tempo de espera de 1h.



Fig. 6.57 Colocação de provetes na câmara de envelhecimento artificial acelerado

Os ciclos são desenvolvidos durante 10 dias.

6.2.1.11 Controle da carbonatação

O ensaio de controle da carbonatação foi efectuado com provetes $40\text{mm} \times 40\text{mm} \times 160\text{mm}$, mantidos a uma temperatura de cerca de 20°C e a uma humidade relativa próxima de 50%, em superfície de corte perpendicular à maior dimensão. Após limpeza rápida da superfície com ar comprimido esta deve ser aspergida com uma solução alcoólica de fenolftaleína composta por 50ml de água, 50ml de álcool a 96%, 1g de fenolftaleína e hidróxido de sódio diluído em água destilada (quantidade suficiente para permitir a coloração da solução). A zona não carbonatada toma a cor vermelha, pois o hidróxido de cálcio possui características alcalinas compatíveis com a mudança de cor da fenolftaleína, entre o pH de 8,3 e 10, enquanto o carbonato de cálcio produz uma reacção neutra.

6.2.1.12 Composição das argamassas

Para os ensaios preliminares foram utilizadas duas pozolanas naturais: Pozolana de Cabo Verde e Pozolana dos Açores. Como ligante foi utilizada uma cal aérea hidratada em pó, comercial, sempre do mesmo fabricante. Como agregado foi utilizada areia siliciosa, sempre da mesma proveniência de forma a uniformizar a sua influência nas características mecânicas e físicas da argamassa e a minimizar a sua influência nas suas características químicas.

A escolha da composição das argamassas teve fundamentalmente em conta os seguintes factores:

- Recolha bibliográfica
- Características a analisar/requeridas
- Resultados das análises a argamassas antigas

Para além da variedade de traços referidos no Capítulo 4, ponto 4.2, a recolha bibliográfica revelou a utilização de composições muito variáveis de cal e pozolanas naturais, com ou sem adição de agregado, ao longo dos tempos:

- Stafford Holmes [34] indica a utilização na Época Romana de composições 1:2 e 1:3 (cal, possivelmente em pasta: pozolana natural)
- Sousa Coutinho [55] afirma que os traços cal/pozolana dos Açores variam entre 6:1 e 1:4
- Mateus [8] relata a utilização de composições de argamassas com pozolanas naturais desde a antiguidade até ao início do Século XX, mencionando traços tão díspares como 1:5 a 1:6 (cal em pasta : pozolana natural) e 1:2:2 (cal em pasta: pozolana natural: areia)

É de referir que os traços são dados em volume, e que na maioria das argamassas antigas era utilizada cal em pasta e não cal em pó, o que implica uma transformação dos traços dado que a cal em pasta contém, em média, cerca de 20% de água [224].

A grande disparidade de composições usada na antiguidade, o facto de um estudo anterior elaborado no LNEC [85] ter sido baseado no traço 1:1:4, a facilidade de comparação desse traço com a composição tradicional de argamassas de cal aérea e areia 1:3, considerando o funcionamento da pozolana parcialmente como ligante e parcialmente como agregado, levaram a que, para a primeira fase dos ensaios preliminares, o traço escolhido com ambas as pozolanas fosse de 1:1:4 (cal:pozolana:areia) em volume, conforme a Tab.6.15. Como argamassa de comparação, foi utilizada uma argamassa de cal e areia com o traço 1:3 em volume.

Tab.6.15 Composições utilizadas nos ensaios preliminares – primeira fase

Argamassa	Cal	Pozolana de Cabo Verde	Pozolana dos Açores	Areia
C	1	-	-	3
CPA	1	1	4	-
CPCV1	1	1	-	4

As composições expressas na Tab.6.15 não visam a utilização de quantidades de pozolana que maximizem a resistência mecânica das argamassas (relação cal: pozolana 1:2 a 1:8 para algumas pozolanas dos Açores e 1:5 para a pozolana de Santo Antão, Cabo Verde, segundo Sousa Coutinho [53]), mas sim uma utilização de quantidades criteriosas que modifiquem as propriedades das argamassas, permitindo o seu enquadramento em padrões de argamassas de conservação e reabilitação de edifícios.

Face aos resultados obtidos na primeira fase [236, 237, 238, 239] e às informações bibliográficas recolhidas, na segunda fase foram testadas as composições com Pozolana de Cabo Verde 1:0,5:2,5 e 1:1:1, em volume, conforme expresso na Tab.6.16.

Tab.6.16 Composições utilizadas nos ensaios preliminares – segunda fase

Argamassa	Cal	Pozolana de Cabo Verde	Areia
CPCV2	1	0,5	2,5
CPCV3	1	0,5	2,5
CPCV4	1	1	1

Regra geral, os autores consultados [53, 115] consideram a adição de água benéfica para a reacção, sendo inclusive, mencionado, no caso particular do trass, que a reacção requer que uma quantidade suficiente de água esteja presente durante um longo período de tempo ou o trass comportar-se-á como um filler inerte [80]. De facto, a reacção pozolânica só é possível através da acção da água, formando compostos hidratados. Contudo, alguns textos [150] referem a utilização de pouca água como uma das especificidades a obedecer na preparação de argamassas com Pozolana dos Açores de forma a garantir a sua melhor prestação.

A quantidade de água utilizada foi regulada através da trabalhabilidade da argamassa e de ensaios de espalhamento, sendo mantida a quantidade de água e, portanto, o mesmo espalhamento para argamassas com a mesma composição, exceptuando o caso de CPCV3 (Tab.6.16), onde, em alternativa, foi colocada menor quantidade de água de forma a assegurar condições mínimas de trabalhabilidade.

6.2.1.13 Condicionamento das argamassas

As argamassas pertencentes à primeira fase dos ensaios preliminares foram condicionadas à temperatura estipulada no Cahier 2669-4 [54], de $23^{\circ}\text{C}\pm 2^{\circ}\text{C}$ e à humidade relativa de $50\%\pm 5\%$, conforme a prática corrente no LNEC antes da existência de normalização europeia específica aplicável às argamassas de cal aérea.

A norma EN 1115-11 [38] estipula a manutenção dos provetes à temperatura de $20^{\circ}\text{C}\pm 2^{\circ}\text{C}$ e com uma humidade relativa de $95\%\pm 5\%$ nos primeiros 7 dias, dos quais os primeiros 5 são dentro do molde, e os restantes, depois de desmoldados. Nos 21 dias seguintes, a temperatura é mantida, mas a humidade relativa desce para $65\%\pm 5\%$. Para além destas condições, a norma prevê, para as argamassas de cal aérea, a justaposição de 6 camadas de papel de filtro e duas camadas de gaze (Fig. 6.58, Fig. 6.59) em ambos os lados do molde e a colocação de uma massa de 5 kg sobre o molde durante, que serão todos retirados após 3h. Estas imposições visam a simulação da absorção de água por parte do suporte. São, contudo de difícil implementação no caso de argamassas de cal aérea e pozolana devido à dificuldade de desmoldagem após 5 dias e à dificuldade em retirar a gaze e o papel de filtro da parte inferior do molde. Devido a estes factores, esta norma foi adaptada, sendo as argamassas usualmente retiradas do molde com a idade de 7 dias, já suficientemente endurecidas para evitar a sua desagregação e sendo mantidos o papel de filtro e a gaze na parte inferior do molde até à desmoldagem.



Fig. 6.58 Preparação de provetes segundo EN 1015-11. Colocação de gaze



Fig. 6.59 Preparação de provetes segundo EN 1015-11. Colocação de papel de filtro

Adicionalmente, foram idealizadas outras condições de cura, de forma a verificar a influência da utilização do papel de filtro, a simulação de condições exteriores, a acção de condições exteriores de Inverno (com protecção da chuva) e a diferença induzida pela cura dentro de água.

As condições encontram-se descritas na Tab.6.17.

Tab.6.17 Condições de cura experimentadas

Condicionamento	Temperatura	Humidade Relativa	Especificidade
C1	23°C±2°C	50%±5%	CSTB 1669-4
C2	23°C±2°C	50%±5%	Papel de filtro nas duas faces do provete até desmoldagem
C3	23°C±2°C	50%±5%	Aspersão de água (20cm ³ /dia)
C4	20°C±2°C	65%±5%	-
C5	20°C±2°C	65%±5%	Procedimento EN 1015-11 (papel de filtro (3h) e 95% HR inicial)
C6	Exterior	Exterior	Resguardo da chuva
C7	20°C±2°C	Imersão em água	-

Utilizando a temperatura e humidade relativa definidas pelo CSTB 1669-4 [54], foram executados três condicionamentos diferentes: C1, condicionamento normalizado; C2, de forma a avaliar a influência de utilização de papel de filtro simulando a absorção de água por parte do suporte; C3, simulando o condicionamento exterior em condições laboratoriais, com uma temperatura média e aspersão diária de água, relacionada com a variação de humidade relativa que ocorre diariamente [228, 229].

Foram utilizadas tanto a temperatura como a humidade relativa definidas pela EN 1015-11 [38] em dois casos distintos: C4, com procedimento análogo à CSTB 1669-4 [54], deixando os provetes dentro do molde, com uma face exposta ao ar até à altura de desmoldagem; C5, seguindo os passos previstos na EN 1015-11 [38], com as alterações de ordem prática já acima descritas.

O condicionamento C6 implicou a manutenção de provetes no exterior durante os meses de Outubro a Janeiro, resguardados da chuva, com temperaturas descritas na Tab.6.18 e humidades relativas sujeitas a grandes variações, oscilando entre o mínimo de 40% a meio do dia até ao máximo de 90% durante o princípio da manhã.

Tab.6.18 Temperaturas mínimas, médias e máximas, em °C, durante o tempo de exposição exterior

Mês	Mínima	Média	Máxima
Outubro	13,4	19,0	25,5
Novembro	5,5	13,7	25,6
Dezembro	3,3	10,0	17,1
Janeiro	7,0	12,5	19,2

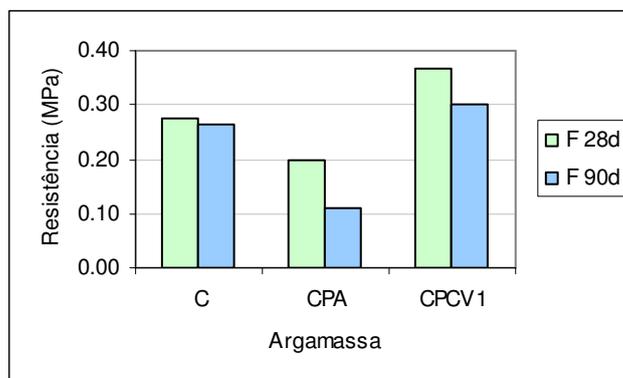
No caso do condicionamento C7, os provetes, inicialmente colocados a $20^{\circ}\text{C}\pm 2^{\circ}\text{C}$ de temperatura e $65\%\pm 5\%$ de humidade relativa, dentro do molde, foram colocados em água, após desmoldagem aos 7 dias.

6.2.1.14 Determinação da resistência à flexão

Este ensaio permite avaliar a resistência à tracção por flexão das argamassas, sendo de particular importância para argamassas a colocar como reboco ou junta em paredes antigas, devido à existência transversal deste tipo de solicitação sobre as argamassas.

Tab.6.19 Resistência à flexão – ensaios preliminares - primeira fase - Média e Desvio Padrão

Designação	Composição em volume	F 28d		F 90d	
		M	D.P.	M	D.P.
C	1:3	0.27	0.04	0.26	0.06
CPA	1:1:4	0.20	0.01	0.11	0.04
CPCV1	1:1:4	0.37	0.05	0.30	0.04

**Fig. 6.60** Resistência à flexão de argamassas – ensaios preliminares – primeira fase

Foi verificado, em primeiro lugar, o comportamento das argamassas contendo Pozolana de Cabo Verde (CPCV1) e Pozolana dos Açores (CPA), em comparação com a argamassa de cal aérea (C). Verifica-se, conforme é visível na Tab.6.19 e na Fig. 6.60 uma resistência superior da argamassa contendo Pozolana de Cabo Verde face à argamassa de cal aérea tanto na idade inicial de 28 dias, como ao final de 90 dias. A argamassa contendo Pozolana dos Açores apresentou resistência à flexão inferior à da argamassa de cal aérea nas idades testadas. Todas as argamassas apresentaram um decréscimo de resistência à flexão aos 90 dias, face aos 28 dias.

A adição de Pozolana de Cabo Verde a uma argamassa de cal aérea, utilizando um traço em volume de 1:1:4 aumenta a sua resistência à flexão nas idades iniciais. A adição de Pozolana dos Açores nas mesmas condições diminui esta característica. A partir destes resultados, foram efectuadas outras composições utilizando a Pozolana de Cabo Verde (Tab.6.16).

Tab.6.20 Resistência à flexão – ensaios preliminares – diferentes composições - Média e Desvio Padrão

Designação	Composição em volume	F 28d		F 90d	
		M	D.P.	M	D.P.
CPCV1	1:1:4	0.37	0.05	0.30	0.04
CPCV2	1:0,5:2,5	0.53	0.04	0.42	0.04
CPCV3	1:0,5:2,5	0.49	0.04	n.r.	n.r.
CPCV4	1:1:1	1.04	0.16	n.r.	n.r.

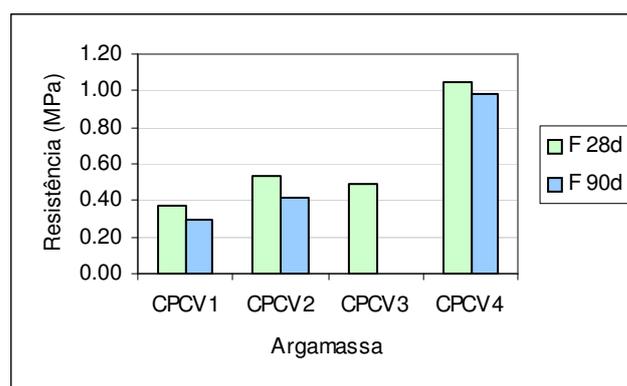


Fig. 6.61 Resistência à flexão de argamassas – ensaios preliminares – diferentes composições

É visível, analisando a Tab.6.20 e a Fig. 6.61, o acréscimo de resistência da argamassa CPCV2 face à argamassa CPCV1, devido ao aumento da percentagem de ligante na mistura. A

diferenciação na quantidade de água utilizada na amassadura, expressa pelos valores obtidos pelas composições CPCV2 e CPCV3, provoca variações desprezíveis aos 28 dias. Com a mesma relação cal/pozolana que a argamassa CPCV1, mas com menor quantidade de agregado, a argamassa CPCV24 atinge elevados valores de resistência à flexão.

A utilização de Pozolana de Cabo Verde nas composições 1:1:4 e 1:0,5:2,5 a resistência à flexão obtida é de por volta de 0,4MPa a 0,5MPa aos 28 dias, com ligeiro decréscimo aos 90 dias. Com a composição 1:1:1 é aumentada esta característica para valores na ordem de 1MPa nas primeiras idades. Após esta constatação, foram verificados os diversos condicionamentos propostos com estas composições.

Tab.6.21 Resistência à flexão de argamassas – ensaios preliminares – diferentes condicionamentos – Média e Desvio Padrão

Designação	Composição em volume	Designação		Designação	
		M	D.P.	M	D.P.
CPCV1C1	1:1:4	0,37	0,05	0,30	0,04
CPCV1C3	1:1:4	0,35	0,02	0,30	0,02
CPCV2C1	1:0,5:2,5	0,53	0,04	0,42	0,04
CPCV2C2	1:0,5:2,5	0,73	0,01	0,57	0,06
CPCV2C3	1:0,5:2,5	0,53	0,14	0,48	0,08
CPCV2C4	1:0,5:2,5	0,35	0,03	0,31	0,03
CPCV2C5	1:0,5:2,5	0,13	0,01	0,23	0,04
CPCV2C6	1:0,5:2,5	0,18	0,02	0,14	0,01
CPCV2C7	1:0,5:2,5	0,75	0,03	n.r.	n.r.
CPCV4C1	1:1:1	1,04	0,16	n.r.	n.r.
CPCV4C5	1:1:1	0,69	0,06	n.r.	n.r.

C1 – 23°C / 50%; C2 - 23°C / 50% + papel filtro; C3 - 23°C / 50% + aspersão de água; C4 – 20°C / 65%; C5 - 20°C / 65% + papel filtro /95% inicial; C6 – Exterior; C7 – 20°C / água

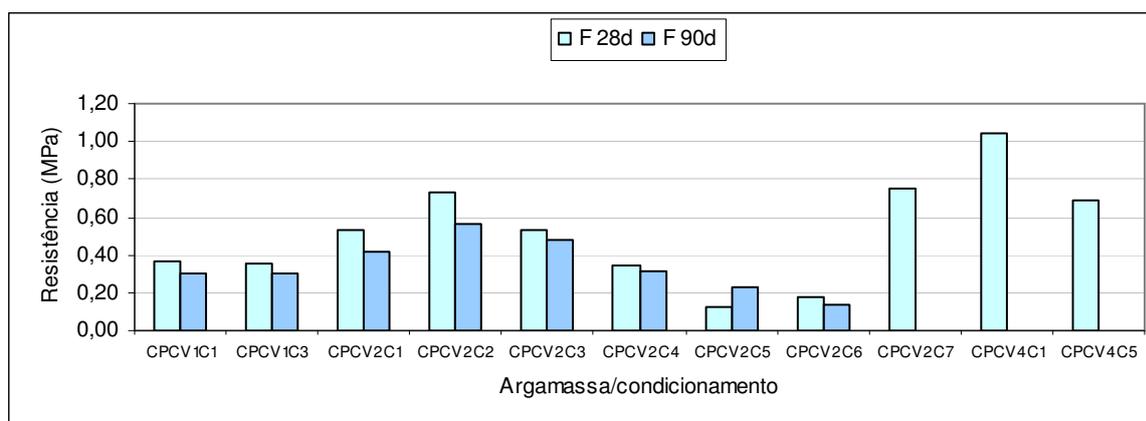


Fig. 6.62 Resistência à flexão de argamassas – ensaios preliminares – diferentes condicionamentos

A influência dos diversos condicionamentos nas argamassas estudadas pode ser resumida da seguinte forma, relativamente ao condicionamento padrão (C1), através dos dados da Tab.6.21 e da Fig. 6.62:

- C2 – colocação de papel de filtro: experimentado apenas na argamassa CPCV2, este condicionamento, provocando uma absorção de água inicial, simulando o efeito dos suportes, implicou um aumento de resistência à flexão
- C3 – aspersão de água: experimentado nas argamassas CPCV1 e CPCV2, a sua influência na resistência à flexão foi quase nula
- C4 – 20°C e 65%H.R.: a mudança para uma temperatura inferior e humidade relativa mais alta, experimentada na argamassa CPCV2, provocou um decréscimo da resistência à flexão
- C5 – EN 1015-11: a aplicação das condições descritas na norma provocaram um decréscimo de resistência à flexão, quer relativamente ao condicionamento padrão, quer relativamente a C4, indicando a influência do procedimento inicial (95%H.R.; papel de filtro e gaze) no resultado final. Foram os únicos resultados com um acréscimo de resistência aos 90 dias, face ao decréscimo generalizado verificado nos restantes condicionamentos.
- C6 – a manutenção de argamassas no exterior resultou em resistências à flexão baixas, próximas de C5.
- C7 – o condicionamento das argamassas dentro de água após os primeiros 7 dias provocou elevada resistência à flexão aos 28 dias

A resistência à flexão das argamassas é influenciada pela absorção de água do suporte e pela temperatura e humidade relativa existentes. Os condicionamentos que provocam maior resistência inicial são a utilização de papel de filtro até à desmoldagem e o condicionamento dentro de água. Os condicionamentos laboratoriais mais próximos do condicionamento exterior de Inverno são os de $23^{\circ}\text{C}\pm 2^{\circ}\text{C}$ e $50\%\pm 5\%\text{H.R.}$ e $20^{\circ}\text{C}\pm 2^{\circ}\text{C}$ e $65\%\pm 5\%\text{H.R.}$ Os condicionamentos mais desfavoráveis são protagonizados pelo condicionamento exterior e pelo condicionamento dado pela EN 1015-11 [38].

6.2.1.15 Determinação da resistência à compressão

A resistência à compressão é um parâmetro fundamental de avaliação das argamassas e reveste-se de especial importância no caso da sua utilização como argamassas de junta.

Tab.6.22 Resistência à compressão de argamassas – ensaios preliminares – primeira fase
– Média e Desvio Padrão

Designação	Composição em volume	C 28d		C 90d	
		M	D.P.	M	D.P.
C	1:3	0,50	0,02	0,84	0,03
CPA	1:1:4	0,57	0,03	0,52	0,04
CPCV1	1:1:4	1,29	0,05	1,12	0,14

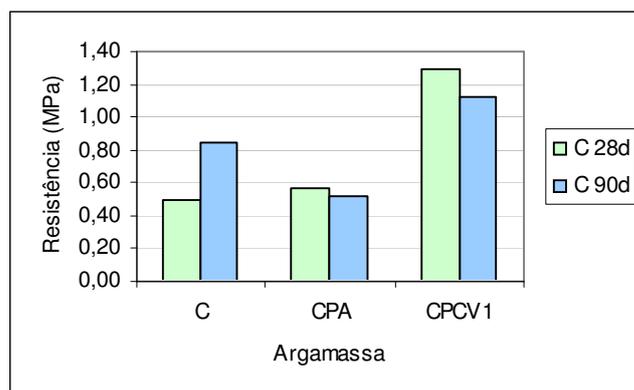


Fig. 6.63 Resistência à compressão de argamassas – ensaios preliminares – primeira fase

A Fig. 6.63 representa o comportamento das argamassas em termos de resistência à compressão, sendo notória a resistência mais elevada da argamassa contendo Pozolana de Cabo Verde, face à argamassa de cal, nas idades estudadas. Embora a argamassa contendo Pozolana dos Açores atinja valores com a mesma ordem de grandeza da argamassa de cal aérea aos 28 dias, o comportamento da argamassa de cal aérea aos 90 dias é caracterizado por uma resistência à compressão superior.

A utilização de Pozolana de Cabo Verde em argamassas de cal aérea nas proporções, em volume, de 1:1:4, potencia o aumento da resistência à compressão. A utilização de Pozolana dos Açores nas mesmas condições produz poucas alterações da resistência à compressão. Os resultados destes ensaios levaram ao prosseguimento da campanha de ensaios utilizando Pozolana de Cabo Verde, em argamassas de cal e areia siliciosa com diferentes composições (Tab.6.16).

Tab.6.23 Resistência à compressão de argamassas – ensaios preliminares – diferentes composições – Média e Desvio Padrão

Designação	Composição em volume	C 28d		C 90d	
		M	D.P.	M	D.P.
CPCV1	1:1:4	1,29	0,05	1,12	0,14
CPCV2	1:0,5:2,5	1,51	0,06	1,53	0,06
CPCV3	1:0,5:2,5	1,48	0,04	n.r.	n.r.
CPCV4	1:1:1	6,01	0,21	n.r.	n.r.

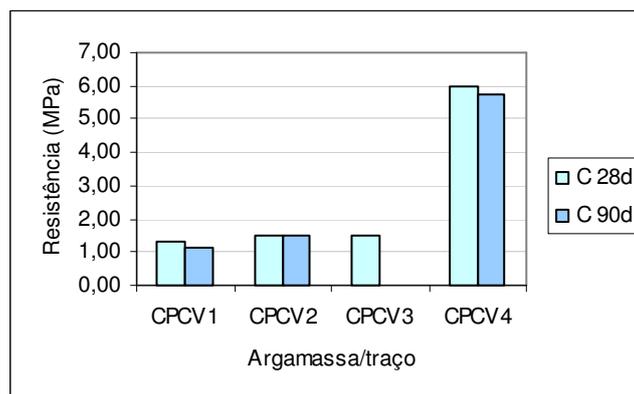


Fig. 6.64 Resistência à compressão de argamassas – ensaios preliminares – diferentes composições

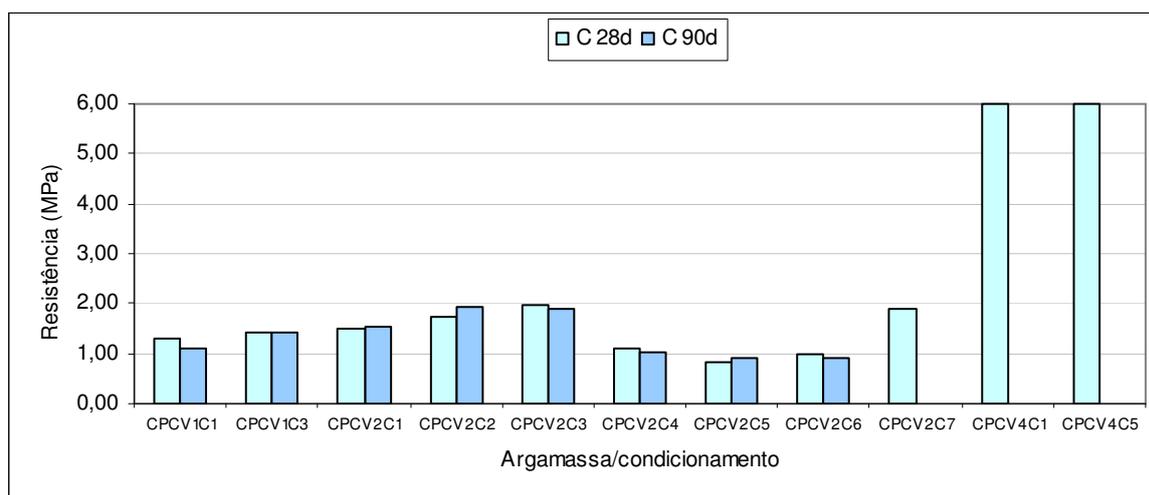
Á semelhança do que ocorreu na resistência à flexão, a Tab.6.23 e a Fig. 6.64 revelam um ligeiro aumento da resistência à compressão obtido por CPCV2, uma semelhança de comportamento entre CPCV2 e CPCV3, minimizando o efeito da quantidade de água nos resultados de resistência aos 28 dias, e um acréscimo substancial de resistência dado por CPCV4.

Nas argamassas de cal aérea e Pozolana de Cabo Verde com traços 1:1:4 e 1:0,5:2,5, a resistência à compressão nos primeiros três meses situa-se entre 1 MPa e 2 MPa; em argamassas com os mesmos materiais mas com composição volumétrica 1:1:1, esta resistência atinge valores próximos de 6 MPa.

Tab.6.24 Resistência à compressão de argamassas – ensaios preliminares – diferentes condicionamentos – Média e Desvio Padrão

Designação	Composição em volume	C 28d		C 90d	
		M	D.P.	M	D.P.
CPCV1C1	1:1:4	1,29	0,05	1,12	0,14
CPCV1C3	1:1:4	1,42	0,11	1,41	0,10
CPCV2C1	1:0,5:2,5	1,51	0,06	1,53	0,06
CPCV2C2	1:0,5:2,5	1,75	0,13	1,94	0,08
CPCV2C3	1:0,5:2,5	1,97	0,16	1,89	0,24
CPCV2C4	1:0,5:2,5	1,10	0,09	1,03	0,02
CPCV2C5	1:0,5:2,5	0,84	0,05	0,89	0,05
CPCV2C6	1:0,5:2,5	0,97	0,09	0,89	0,04
CPCV2C7	1:0,5:2,5	1,90	0,35	n.r.	n.r.
CPCV4C1	1:1:1	6,01	0,21	n.r.	n.r.
CPCV4C5	1:1:1	6,03	0,07	n.r.	n.r.

C1 – 23°C / 50%; C2 - 23°C / 50% + papel filtro; C3 - 23°C / 50% + aspersão de água; C4 – 20°C / 65%; C5 - 20°C / 65% + papel filtro /95% inicial; C6 – Exterior; C7 – 20°C / água

**Fig. 6.65** Resistência à compressão de argamassas – ensaios preliminares – diferentes condicionamentos

A influência dos diversos condicionamentos nas argamassas estudadas pode ser resumida da seguinte forma, relativamente ao condicionamento padrão (C1), através dos dados da Tab.6.21 e da Fig. 6.65:

- C2 – colocação de papel de filtro: experimentado apenas na argamassa CPCV2, este condicionamento, provocando uma absorção de água inicial, simulando o efeito dos suportes, implicou um aumento de resistência à compressão
- C3 – aspersão de água: experimentado nas argamassas CPCV1 e CPCV2, a sua influência provocou um aumento de resistência à compressão

- C4 – 20°C e 65%H.R.: a mudança para uma temperatura inferior e humidade relativa mais alta, experimentada na argamassa CPCV2, provocou um decréscimo da resistência à compressão
- C5 – EN 1015-11: a aplicação das condições descritas na norma provocaram um decréscimo de resistência à compressão no caso de CPCV2, quer relativamente ao condicionamento padrão, quer relativamente a C4, indicando a influência do procedimento inicial (95%H.R.; papel de filtro e gaze) no resultado final. No caso de CPCV4, os resultados obtidos aos 28 dias foram similares aos obtidos com o condicionamento C1.
- C6 – a manutenção de argamassas no exterior resultou em resistências à compressão baixas, próximas de C5.
- C7 – o condicionamento das argamassas dentro de água após os primeiros 7 dias provocou resistência à compressão próxima de C2 e C3

A resistência à compressão das argamassas é influenciada pela absorção de água do suporte e pela temperatura e humidade relativa existentes. Os condicionamentos que provocam maior resistência inicial são a utilização de papel de filtro até à desmoldagem, a aspersão diária de água e o condicionamento dentro de água. Os condicionamentos laboratoriais mais próximos do condicionamento exterior de Inverno são os de 20°C±2°C e 65%±5%H.R., com ou sem o procedimento inicial adicional previsto na EN 1015-11 [38] Estes são também os condicionamentos mais desfavoráveis.

6.2.1.16 Determinação da absorção de água por capilaridade

A absorção de água por capilaridade caracteriza a velocidade de absorção de uma argamassa, através do coeficiente de capilaridade e a quantidade de água absorvida, com a absorção máxima às 24h. É desejável que a absorção de água das argamassas não seja elevada, mas é igualmente importante que tenham uma rápida capacidade de secagem.

Tab.6.25 Coeficiente de capilaridade – Ensaio preliminares – Primeira Fase

Argamassa	Composição em volume	C 28d (kg/m ² .h ^{1/2})	C 90d
C	1:3	9,1	8,6
CPA	1:1:4	16,6	15,6
CPCV1	1:1:4	13,9	n.r.

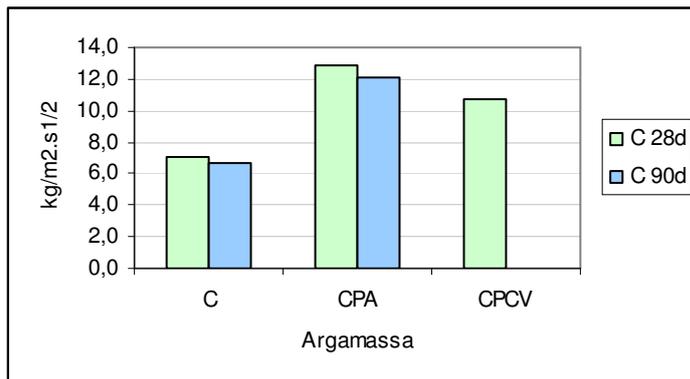


Fig. 6.66 Coeficiente de capilaridade – ensaios preliminares – primeira fase

Os ensaios efectuados resultaram nos valores expostos na Tab.6.25 e na Fig. 6.66, sugerindo o aumento do coeficiente de capilaridade com a adição das pozolanas naturais à argamassa de cal

Tab.6.26 Coeficiente de capilaridade – ensaios preliminares – diferentes composições e condicionamentos

Argamassa	Composição em volume	C 28d (kg/m ² .h ^{1/2})	C 90d
CPCV1C1	1:1:4	13,9	n.r.
CPCV1C3	1:1:4	13,6	10,2
CPCV2C1	1:0,5:2,5	13,4	12,0
CPCV2C2	1:0,5:2,5	16,3	15,3
CPCV2C3	1:0,5:2,5	12,2	10,5
CPCV2C4	1:0,5:2,5	12,1	11,2
CPCV3C1	1:0,5:2,5	10,4	n.r.
CPCV2C6	1:0,5:2,5	15,9	21,2
CPCV4C1	1:1:1	8,5	n.r.
CPCV4C5	1:1:1	7,8	n.r.

C1 – 23°C / 50%; C2 - 23°C / 50% + papel filtro; C3 - 23°C / 50% + aspersão de água; C4 – 20°C / 65%; C5 - 20°C / 65% + papel filtro /95% inicial; C6 – Exterior; C7 – 20°C / água

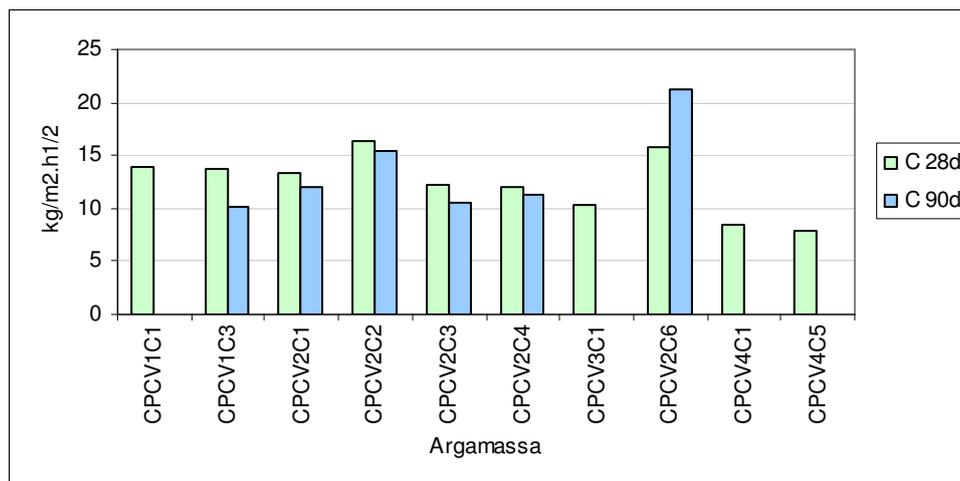


Fig. 6.67 Coeficiente de capilaridade – ensaios preliminares – diferentes composições e condicionamentos

As principais mudanças de capilaridade verificadas por mudanças de composição e/ou condicionamento registam-se nas argamassas com composição 1:1:1, que apresentam menor capilaridade do que as restantes e nas argamassas condicionadas no exterior, que têm maior coeficiente de capilaridade do que as condicionadas em ambiente controlado (Tab.6.26, Fig. 6.67).

6.2.1.17 Avaliação da capacidade de impermeabilização

O ensaio de capacidade de impermeabilização caracteriza a velocidade com que a argamassa se deixa atravessar pela água, até esta atingir o suporte e a sua capacidade para permitir a secagem do suporte. Para além do ensaio de capilaridade, baseado na absorção de água por ascensão capilar, este ensaio permite avaliar o comportamento das argamassas face à água.

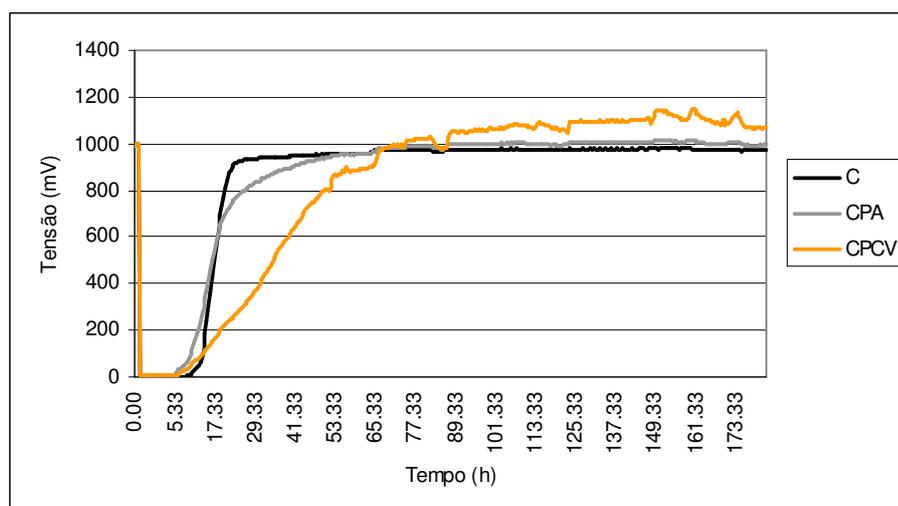


Fig. 6.68 Avaliação da capacidade de impermeabilização – ensaios preliminares

As argamassas de cal aérea, contendo Pozolana de Cabo Verde e com Pozolana dos Açores absorveram a água de forma similar e muito rapidamente, como é possível verificar pela curva descendente da Fig. 6.68. Embora as argamassas contendo pozolanas naturais tenham iniciado mais cedo o processo de secagem, a argamassa de cal aérea estabilizou mais cedo, significando que teve uma secagem mais rápida. A argamassa com Pozolana de Cabo Verde teve o processo de secagem mais longo. Contudo, o processo de secagem pode considerar-se muito rápido para as três argamassas estudadas, quando comparado com outros tipos de argamassas [231].

6.2.1.18 Avaliação do grau de carbonatação

A velocidade de carbonatação permite verificar o ritmo da reacção de carbonatação nas argamassas. No caso das argamassas com pozolanas, esta reacção dá-se paralelamente com a reacção pozolânica, ambas competindo pelo hidróxido de cálcio.

Tab.6.27 Profundidade de carbonatação – Ensaio preliminares – Primeira fase

Profundidade de carbonatação (mm)		
C	1:3	9,4
CAP	1:1:4	11,3
CPCV1	1:1:4	11,0

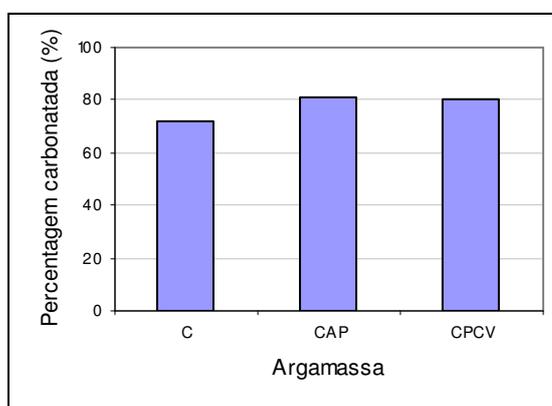


Fig. 6.69 Percentagem carbonatada – ensaios preliminares – primeira fase

Nos ensaios iniciais, verificou-se um aumento de carbonatação nos provetes com adição de pozolanas naturais (Tab.6.27, Fig. 6.69), potencialmente devido a um aumento de porosidade inicial.

A influência da formulação de argmassas com diferente composição e da aplicação de variadas condições de cura, produziu os seguintes resultados (Tab.6.28, Fig. 6.70).

- Há uma diminuição da velocidade de carbonatação com o aumento da quantidade de ligante nas argamassas estudadas, provavelmente devido à menor porosidade das argamassas com mais ligante
- A aspersão de água e o condicionamento exterior causaram uma carbonatação mais lenta. Este facto pode-se dever à sensibilidade da carbonatação à humidade relativa ou à existência paralela de uma reacção pozolânica fomentada pela variação da humidade.

Tab.6.28 Profundidade de carbonatação - ensaios preliminares – diferentes composições e condicionamentos

Profundidade de carbonatação (mm)				
Argamassa	Composição em volume	7d 14d 28d		
		CPCV1C1	1:1:4	n.r.
CPCV1C3	1:1:4	n.r.	n.r.	5,3
CPCV2C1	1:0,5:2,5	n.r.	1,5	10,0
CPCV2C5	1:0,5:2,5	0,7	4,7	8,5
CPCV2C6	1:0,5:2,5	n.r.	n.r.	5,8
CPCV3C1	1:0,5:2,5	0,6	6,3	8,1
CPCV4C1	1:1:1	0,8	1,8	4,6
CPCV4C5	1:1:1	0,6	6,3	8,1

C1 – 23°C / 50%; C2 - 23°C / 50% + papel filtro; C3 - 23°C / 50% + aspersão de água; C4 – 20°C / 65%; C5 - 20°C / 65% + papel filtro /95% inicial; C6 – Exterior; C7 – 20°C / água

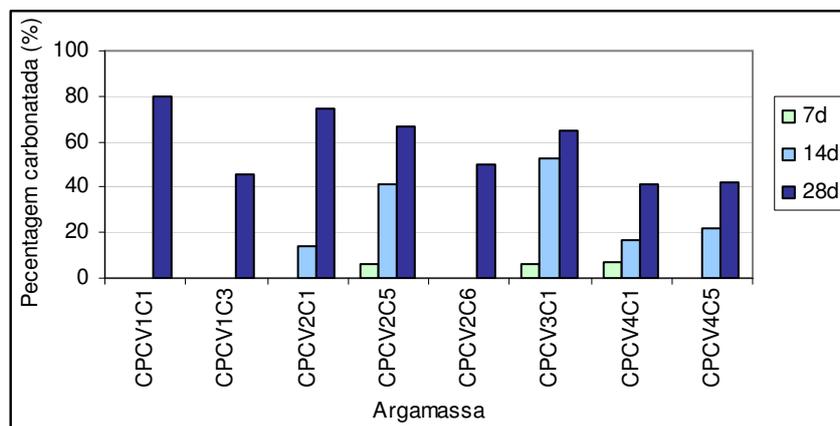


Fig. 6.70 Percentagem carbonatada – ensaios preliminares – diferentes composições e condicionamentos

6.2.1.19 Medição das variações dimensionais

A medição das variações dimensionais livres é indicativa da retracção livre das argamassas.

Foram medidas as variações dimensionais devido a retracção livre das argamassas após desmoldagem aos 5 ou 7 dias, estando os resultados expressos na Fig. 6.71.

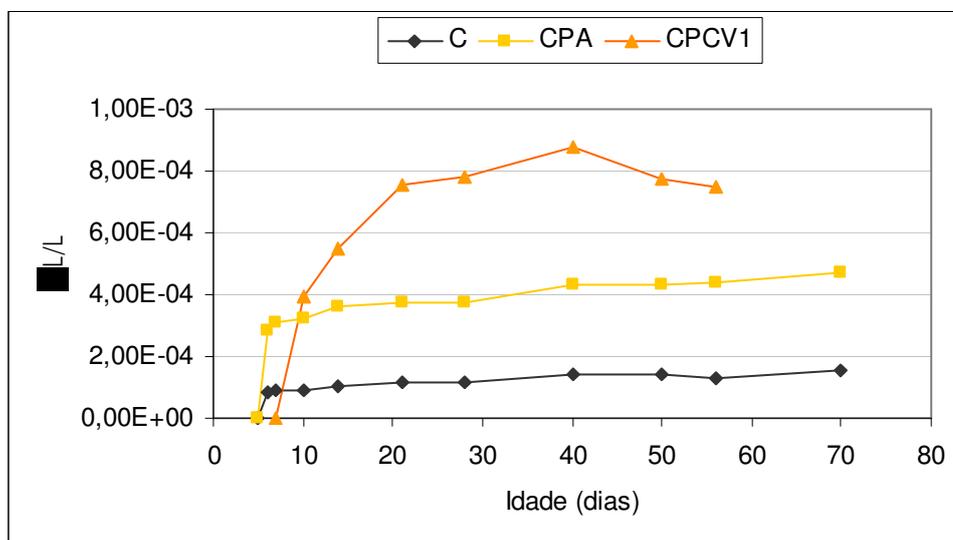


Fig. 6.71 Variações dimensionais de argamassas – ensaios preliminares

As variações dimensionais após desmoldagem, medidas conforme o Cahier 2669-4 CSTB [54], denotam maior variação da retracção livre das argamassas com pozolanas, relativamente à argamassa de cal aérea. A argamassa com Pozolana dos Açores tem uma variação acentuada nos primeiros dias do ensaio, mas estabiliza rapidamente. A argamassa com Pozolana de Cabo Verde apresenta maior retracção ao longo do tempo.

6.2.1.20 Avaliação da susceptibilidade à fissuração

Dado que as argamassas são aplicadas sobre um suporte, não sofrendo retracção livre, mas sim restringida, é utilizado este ensaio para simular essas condições e verificar a susceptibilidade à fissuração das argamassas.

Conhecida a fraca fissurabilidade das argamassas de cal aérea, foi verificado que a adição destas pozolanas naturais na proporção volumétrica 1:1:4 não provocou variações nesta característica, mantendo-se as argamassas pouco susceptíveis à fissuração (Tab.6.29).

Tab.6.29 Susceptibilidade à fendilhação – ensaios preliminares – primeira fase

Argamassa	Composição em volume	Susceptibilidade à fendilhação				Classificação
		Fs max (N)	G (N.mm)	CSAF	CREF	
C	1:3	50	74	1,4	1,5	Fraca fissurabilidade
CPA	1:1:4	51	69	1,1	1,4	Fraca fissurabilidade
CPCV1	1:1:4	47	85	1,1	1,8	Fraca fissurabilidade

6.2.1.21 Envelhecimento artificial acelerado

Este ensaio avalia a durabilidade das argamassas às solicitações climáticas.

Após cada ciclo de envelhecimento artificial acelerado a que foram sujeitos os provetes, foi avaliado visualmente o seu estado de degradação, sendo dada uma descrição qualitativa do mesmo.

Tab.6.30 Envelhecimento Artificial Acelerado – ensaios preliminares

Ciclo	C	CPA	CPCV
Calor - frio	Sem degradação	Sem degradação	Sem degradação
Calor - chuva	Ligeira degradação	Ligeira degradação	Ligeira degradação
Gelo - degelo	Degradação notória	Degradação notória	Degradação notória

O comportamento das argamassas com e sem adições pozolânicas ao envelhecimento artificial acelerado foi similar nos diversos ciclos. A acção gelo/degelo foi especialmente destrutiva para as argamassas.

6.2.2 Avaliação inicial da influência produzida em argamassas pela adição de pozolanas

A adição inicial de pozolanas a argamassas de cal, foi efectuada inicialmente utilizando duas pozolanas naturais, com a composição 1:1:4 (cal: pozolana: areia) em volume, tendo a análise comparativa sido efectuada com uma argamassa de cal aérea com composição 1:3 em volume.

Os resultados obtidos variam consoante a pozolana natural empregue: Pozolana dos Açores (S. Miguel) ou Pozolana de Cabo Verde (Sto. Antão).

Ao nível de resistência mecânica, a adição Pozolana de Cabo Verde produziu um aumento da resistência à flexão e da resistência à compressão das argamassas estudadas face à argamassa de cal aérea. Já a adição de Pozolana dos Açores produziu um decréscimo, tanto da resistência à flexão como da resistência à compressão.

O comportamento à água foi verificado através dos ensaios de absorção capilar e de capacidade de impermeabilização. Verificou-se, para todas as argamassas com pozolanas naturais um aumento do coeficiente de capilaridade. Contudo, o ensaio de avaliação da capacidade de impermeabilização destas argamassas efectuado no humidímetro revelou um início de secagem mais rápido do que o das argamassas de cal aérea testadas e, embora a secagem tenha sido mais lenta do que a da argamassa de comparação (cal aérea), foi indubitavelmente mais rápida do que a secagem de argamassas de cimento ou cal aérea e cimento [231].

A velocidade de carbonatação, mais rápida nas argamassas com pozolanas, estará interligada com a estrutura porosa desenvolvida pela adição destes materiais, favorecendo a carbonatação e aumentando a velocidade de absorção capilar.

A retracção livre mais elevada verificada pelas argamassas com pozolanas face à argamassa de cal aérea não se traduziu num aumento da susceptibilidade à fissuração das mesmas, classificadas como de fraca susceptibilidade à fissuração.

O ensaio de envelhecimento artificial acelerado produziu degradação similar em todas as argamassas ensaiadas, com bom desempenho no ciclo calor-frio, alguma degradação no ciclo calor-chuva e degradação acentuada no ciclo gelo-degelo.

6.2.3 Influência da composição no desempenho de argamassas de cal com Pozolana de Cabo Verde

Foram efectuadas três composições diferentes, em volume, com cal aérea e Pozolana de Cabo Verde: a composição inicial 1:1:4 (cal: pozolana: areia) e as composições 1:0,5:2,5 e 1:1:1. Os resultados revelaram que as argamassas com maior quantidade de ligante atingiram resistências mecânicas mais elevadas, coeficientes de capilaridade mais baixos e também menor ritmo de carbonatação. É provável que as argamassas com teores em ligante mais elevados tenham menor porosidade, impedindo a carbonatação e diminuindo a absorção capilar. Nestas argamassas, a

reação pozolânica terá um papel importante no desenvolvimento das suas características mecânicas.

6.2.4 Influência do condicionamento no desempenho de argamassas de cal com Pozolana de Cabo Verde

Foram adoptadas diferentes condições de cura, de forma a verificar a influência de factores como a temperatura e humidade utilizadas nos documentos normativos, o condicionamento por imersão em água, a simulação do efeito de sucção dos suportes, a aspersão de água (variação de humidade relativa) ou as variações térmicas e higrométricas exteriores. Como condicionamento padrão foram utilizadas as condições de cura estipuladas pelo Cahier CSTB 2669 – 4 [54], de $23^{\circ}\text{C}\pm 2^{\circ}\text{C}$ de temperatura e $65\%\pm 5\%$ de humidade relativa.

Descrevem-se os condicionamentos utilizados e a sua influência nas características das argamassas:

- C2 (mesmas condições de temperatura e humidade, mas utilização de papel de filtro para simular a absorção do suporte) – verificou-se um aumento da resistência mecânica e do coeficiente de capilaridade. A sucção do suporte provoca geralmente um aperto da estrutura porosa da argamassa [228]. Este fenómeno pode ter causado um aumento da resistência mecânica da argamassa assim condicionada, tendo diminuindo a dimensão da estrutura capilar, assim favorecendo uma mais rápida absorção capilar.
- C3 (mesmas condições de temperatura e humidade, mas aspersão de água para simular variações de humidade relativa) – este condicionamento provocou um aumento da resistência mecânica e a diminuição do coeficiente de capilaridade e da carbonatação. A aspersão de água pode ter favorecido a reação pozolânica face à reação de carbonatação, provocando aumento de resistência, mas menor carbonatação. Existiu arrastamento de partículas provocado pela aspersão, o que pode ter influenciado a estrutura capilar e o coeficiente de capilaridade.
- C4 ($20^{\circ}\text{C}\pm 2^{\circ}\text{C}$ de temperatura e $65\%\pm 5\%$ de humidade relativa) – verificou-se um decréscimo da resistência mecânica. A reação pozolânica é mais rápida em ambientes de humidade relativa e temperatura superiores. Este condicionamento implica uma diminuição da temperatura, mas um aumento da humidade relativa. A reação de carbonatação não deverá sofrer modificações com estas pequenas variações.
- C5 ($23^{\circ}\text{C}\pm 2^{\circ}\text{C}$ de temperatura e $65\%\pm 5\%$ de humidade relativa, condicionamento inicial com papel de filtro (3h) e 95% de humidade relativa (7 dias)) – diminuição da resistência mecânica, mesmo relativamente a C4, e do coeficiente de capilaridade. Este condicionamento põe particular ênfase no desenvolvimento da reação pozolânica no período inicial do condicionamento, o que poderá não acontecer.

- C6 (exterior, condições de Inverno) – registou-se uma diminuição da resistência mecânica, um aumento do coeficiente de capilaridade e a diminuição da taxa de carbonatação. As argamassas poderão ter mantido a sua porosidade e elevada capilaridade devido ao baixo desenvolvimento das reacções pozolânica e principalmente, de carbonatação.
- C7 (imersão em água) – aumento da resistência mecânica. Assumindo a inexistência de carbonatação debaixo de água, a reacção pozolânica provoca resistência mecânica superior na ausência da reacção de carbonatação, dado serem reacções competitivas pelo hidróxido de cálcio.

6.3 Campanha de Ensaios em Argamassas de Cal com Pozolanas

Após os resultados obtidos na campanha de ensaios preliminar e da obtenção de uma base de conhecimento relativa a argamassas de cal com adições pozolânicas [236, 237, 238, 239], fundamentalmente no que concerne à evolução da resistência mecânica e ao comportamento face à água, partiu-se para uma campanha de ensaios mais detalhada, escolhendo alguns dos materiais e/ou traços previamente ensaiados.

6.3.1 Ensaios Efectuados

Para além dos ensaios de determinação da resistência mecânica por flexão e compressão e da determinação do Módulo de Elasticidade Dinâmico, foram efectuados ensaios de absorção de água por capilaridade, de capacidade de impermeabilização (molhagem/secagem) e de permeabilidade ao vapor de água, no campo do comportamento face à água. Foram também efectuados ensaios de retracção restringida e de retracção livre, fundamentais para avaliar o adequado desempenho de argamassas colocadas como reboco, no que toca à sua adaptabilidade aos suportes e tendência de fissuração.

Paralelamente, tendo em conta a importância da durabilidade de argamassas a serem aplicadas como revestimentos de superfície foi efectuada uma adaptação do ensaio de envelhecimento artificial acelerado com o intuito de avaliar de forma realista o desempenho de argamassas de reboco face às agressões climatéricas e do meio ambiente.

Tab.6.31 Ensaio efectuados em argamassas

Estado do produto	Ensaio	Datas de ensaio	Normas
Argamassa em pasta	Massa volúmica		NP EN 1015-6
	Consistência por espalhamento		NP EN 1015-3
Produto endurecido	Resistência à tracção por flexão	28d, 90d, 6m	NP EN 1015 -11
	Resistência à compressão	28d, 90d, 6m	NP EN 1015-11
	Módulo de elasticidade dinâmica	28d, 90d, 6m	Cahier 2669-4 CSTB
	Capilaridade (24h) - início 5min	28d, 90d, 6m	Cahier 2669-4 CSTB
	Permeabilidade ao vapor de água	90d	EN 1015-19
	Susceptibilidade à fendilhação (Fs máx)	28d	FE Pa 37
	Avaliação da capacidade de impermeabilização	90 d	FE Pa 38
Envelhecimento artificial acelerado	90 d	Adaptado	
	Resistência aos sais	90 d	Adaptado

A maioria dos ensaios efectuados encontra-se explicitada na descrição dos ensaios preliminares; neste ponto são descritos os ensaios de permeabilidade ao vapor de água, envelhecimento artificial acelerado, permeabilidade à água, aderência ao suporte e resistência aos sais.

6.3.1.1 Permeabilidade ao vapor de água

O ensaio de permeabilidade ao vapor de água foi efectuado segundo a norma EN 1015 – 19 [40], sobre provetes cilíndricos de argamassa com 2cm de espessura, tendo sido utilizada a câmara climática ARALAB FITOCLIMA 700 EDTU. Após moldagem e cura, os provetes foram colocados em recipientes, com espaçamento de $10\text{mm} \pm 5\text{mm}$ de camada de ar, sobre solução de fosfato de amónio di-hidrogenado. Os recipientes foram colocados numa câmara a $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ de temperatura e a $50\% \pm 5\%$ de humidade relativa e pesados a intervalos regulares até estabilização. A permeabilidade ao vapor de água é dada pelo valor médio da permeância multiplicado pela espessura do provete. A permeância é determinada pela seguinte fórmula:

$$\Lambda = \frac{1}{A\Delta_p / (\Delta G / \Delta t) - R_A} \text{ (kg/m}^2\text{.s.Pa)}$$

em que:

A - área é a área da zona aberta do recipiente em m²

Δ_p – diferença de pressão em vapor de água entre o ambiente e a solução salina em Pa

$\Delta G/\Delta t$ - fluxo de vapor em kg/s

R_A – resistência ao vapor de água da camada de ar entre a solução salina e o provete (0,048x10⁹ Pa.m².s/kg por cada 10mm de camada de ar)

Λ - permeância em kg/m².s.Pa

6.3.1.2 Envelhecimento artificial acelerado

O envelhecimento artificial acelerado foi desenvolvido baseado nas condições climáticas nacionais, de forma a sujeitar os rebocos a acções sustentadas na realidade climática [107, 132, 235].

Os provetes são constituídos por tijolo cozido sobre o qual é colocada uma camada de reboco com 2cm, de forma a simular a situação comum e desfavorável de rebocos com elevada espessura. Os provetes são mantidos à temperatura de 20±2°C de temperatura e 65±5% de humidade relativa até à altura do ensaio.

O envelhecimento artificial acelerado consiste num ciclo calor/ chuva e num ciclo gelo degelo. Os ciclos são de 4h, em número de 10 a 20.

O ciclo calor/ chuva é efectuado através da colocação dos provetes a 40°C, durante 4 horas, seguido de um período de chuva com duração de 4h e intensidade de 1l/min e de um período de secagem de 16h.

O ciclo gelo-degelo sujeita as argamassas a um período de chuva durante 4 horas e à temperatura de -10°C durante 4h. O tempo de espera entre ciclos será de 4 horas.

Após cada ciclo é efectuado um esquema da degradação dos provetes e estes são pesados, após secagem, até massa constante, sendo a massa comparada com a massa inicial.

6.3.1.3 Resistência aos sais

De forma a avaliar a resistência aos sais, foram sujeitos a ascensão de água por capilaridade e/ou imersão provetes de tijolo com 2 cm de argamassa, imersos até meio em solução com 27g/l de NaCl, conforme se visualiza na Fig. 6.72. Desta forma, embora possa haver influência por parte do suporte, essa influência tenderá a agravar a situação, simulando uma situação real em que a água também ascende pelo suporte [235]. O tempo de imersão é de 1 semana e a secagem é efectuada a temperatura ambiente até ser atingida massa constante. São realizados ciclos até se verificar uma descida de massa que permita uma análise comparativa.



Fig. 6.72 Ensaio de resistência aos sais em curso

6.3.2 Composição das argamassas

Tab.6.32 Composição das argamassas

Designação	Materiais	Composição em volume (ligante : pozolana : agregado)
C	Cal em pó : areia de rio	1:3
CPCV	Cal em pó: Pozolana de Cabo Verde: areia de rio	1:1:4
CPA	Cal em pó: Pozolana dos Açores: areia de rio	1:1:4
CMCA10	Cal em pó: areia de rio com 10% de Metacaulino de Alvarães sobre o peso da cal	1:3 c/ 10% MCA
CMCA20	Cal em pó: areia de rio com 20% de Metacaulino de Alvarães sobre o peso da cal	1:3 c/ 20% MCA
CMCI10	Cal em pó: areia de rio com 10% de Metacaulino Industrial sobre o peso da cal	1:3 c/ 10% MCI
CMCI20	Cal em pó: areia de rio com 20% de Metacaulino Industrial sobre o peso da cal	1:3 c/ 20% MCI
CPT	Cal em pó: Pó de Tijolo: areia de rio	1:1:4
CPTCON	Cal em pó : Fragmentos de Tijolo: areia de rio	1:1:2,5
CpPTCON	Cal em pasta: Fragmentos de Tijolo: areia de rio	1:1:1
CCV	Cal em pó: Cinzas Volantes: areia de rio	1:1:4
CRAE	Cal em pó: Resíduo de Argila Expandida : areia de rio	1:1:4

Para as argamassas com pozolanas naturais (Pozolana de Cabo Verde e Pozolana dos Açores), Pó de Tijolo e resíduos (Cinzas Volantes e Resíduo de Argila Expandida) foi utilizada a composição em volume 1:1:4 (cal: pozolana: areia). Sabendo de antemão que as diversas pozolanas têm diferentes composições e que uma diferente percentagem de cada material é reactiva (dependendo da superfície específica, tamanho dos grãos, percentagem de material amorfo), assumiu-se o funcionamento da pozolana como ligante e como agregado em partes iguais. De forma a formular argamassas com relação ligante/agregado em volume comparáveis com a composição 1:3 da argamassa de cal aérea, foi estipulada a composição 1:1:4.

Para o metacaulino foi utilizada uma percentagem muito pequena, de 10% e 20% de material pozolânico sobre o peso em cal devido à probabilidade deste material ter uma elevada reactividade (elevada superfície específica, material fundamentalmente amorfo) e aos resultados de estudos anteriormente efectuados com o material MCI [95] e outros metacaulinos [220].

As argamassas CPTCON e CpPTCON foram preparadas de forma a permitir a sua utilização como argamassas de reparação na Estação Arqueológica de Conímbriga. Por este motivo, CpPTCON foi elaborada com base na proporção em peso ligante/agregado média determinada para as argamassas de Conímbriga, considerando 50% do agregado composto por cerâmico moído e 50% do agregado composto por areia siliciosa, conforme informação obtida por visualização ao microscópio óptico. Para este propósito foi considerado um conteúdo de 20% de água na cal em pasta [128]. Para a composição CPTCON foi utilizada maior quantidade de agregado, resultando na composição 1:1:2,5 em volume. Para ambas as composições foi ajustada a granulometria do agregado cerâmico à granulometria média das argamassas de Conímbriga, conforme Fig. 6.73. O agregado cerâmico foi saturado previamente à mistura com ligante e agregado para execução da argamassa.

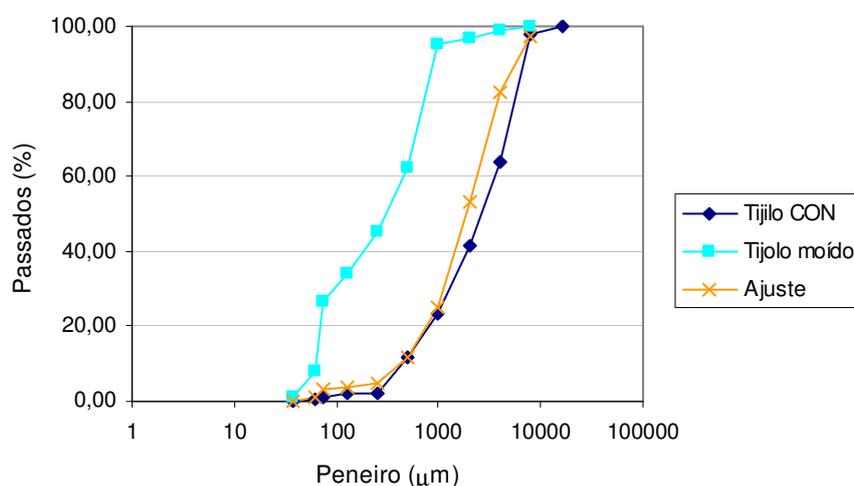


Fig. 6.73 Ajuste da curva do cerâmico moído à granulometria de Conímbriga

6.3.3 Condicionamento das argamassas

Embora os resultados obtidos nos ensaios preliminares tenham apontado o condicionamento normativo vigente, EN 1015-11 [38] como desfavorável para as argamassas com cal aérea e pozolanas, este foi adoptado para esta fase do trabalho, fundamentalmente com o intuito de possibilitar comparações entre este e outros estudos.

6.3.4 Resultados

6.3.4.1 Determinação da resistência à flexão

Tab.6.33 Resistência à flexão – Média e (MPa) Desvio Padrão

Arg.	F28d		F90d		F6m	
	M	D.P.	M	D.P.	M	D.P.
C	0.27	0.04	0.26	0.06	0.58	0.03
CPCV	0.37	0.05	0.30	0.04	0.82	0.09
CPA	0.20	0.01	0.11	0.04	0.12	0.03
CMCA10	0.24	0.03	0.37	0.03	0.16	0.03
CMCA20	0.20	0.04	0.26	0.02	0.11	0.01
CMCI10	0.19	0.04	0.22	0.04	0.18	0.02
CMCI20	0.27	0.03	0.21	0.05	0.11	0.01
CPT	0.22	0.02	0.19	0.01	0.20	0.07
CPTCON	0.45	0.05	0.51	0.08	0.44	0.05
CpPTCON	0.54	0.04	0.63	0.12	0.53	0.08
CCV	0.50	0.04	0.52	0.03	0.61	0.05
CRAE	0.65	0.08	0.51	0.08	0.63	0.10

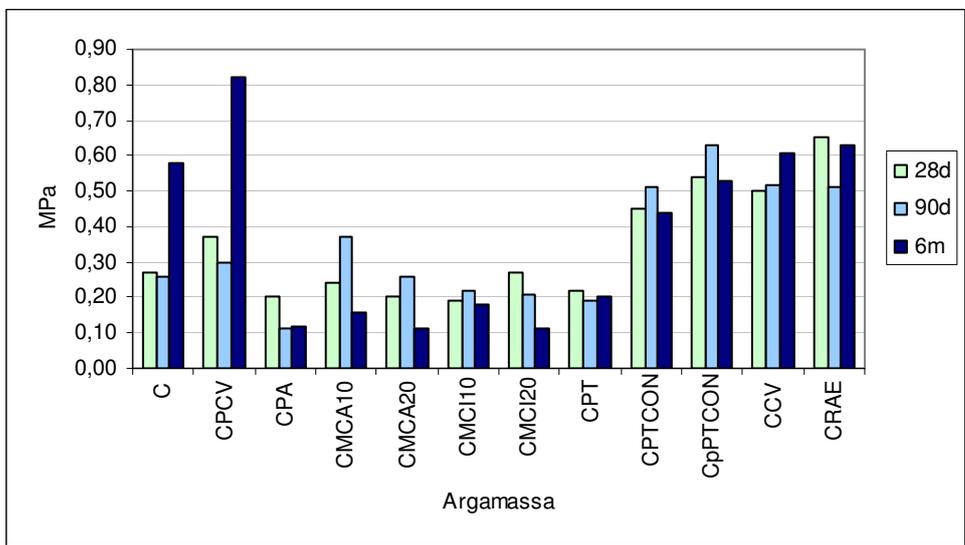


Fig. 6.74 Resistência à flexão

Relativamente à argamassa de cal aérea, a adição de pozolanas naturais produziu consequências diferentes no comportamento à flexão: a argamassa com Pozolana de Cabo Verde teve maior

resistência à flexão, especialmente evidente aos 6 meses, enquanto a argamassa com Pozolana dos Açores revelou menor resistência à flexão.

Para as argamassas contendo metacaulino foram obtidos baixos valores de resistência, similares aos da argamassa de cal aérea nas primeiras idades, mas inferiores aos 6 meses. Não se verificou qualquer relação entre a adição de diferentes quantidades de metacaulino e a variação desta propriedade.

Relativamente às argamassas contendo tijolo moído, a argamassa com Pó de Tijolo atingiu valores baixos de resistência à flexão, cerca de 0,2MPa, similares aos valores atingidos pelas argamassas com metacaulino. As argamassas com Fragmentos de Tijolo e maior teor em ligante, atingiram valores bastante mais elevados de resistência à flexão, muito superiores ao atingido pela argamassa de cal aérea nas primeiras idades e similares a este aos 6 meses.

As argamassas de cal e resíduos (CCV e CRAE) tiveram um comportamento à flexão com elevadas resistências iniciais, que se mantiveram dentro da mesma ordem de grandeza (0,5 a 0,6MPa) até aos 6 meses.

6.3.4.2 Determinação da resistência à compressão

Tab.6.34 Resistência à compressão – Média (MPa) e Desvio Padrão

Arg.	C28d		C90d		C6m	
	M	D.P.	M	D.P.	M	D.P.
C	0.50	0.02	0.84	0.03	2.46	0.15
CPCV	1.29	0.05	1.12	0.14	6.19	0.93
CPA	0.57	0.03	0.52	0.04	0.43	0.05
CMCA10	0.42	0.04	0.50	0.01	0.38	0.02
CMCA20	0.62	0.10	0.62	0.02	0.36	0.02
CMCI10	0.48	0.02	0.43	0.13	0.38	0.04
CMCI20	0.76	0.04	0.98	0.26	0.92	0.06
CPT	0.60	0.04	0.70	0.06	1.00	0.06
CPTCON	0.96	0.04	1.37	0.11	1.59	0.20
CpPTCON	1.46	0.06	2.04	0.12	1.38	0.07
CCV	1.06	0.06	1.02	0.22	1.28	0.11
CRAE	2.41	0.15	2.28	0.28	2.63	0.26

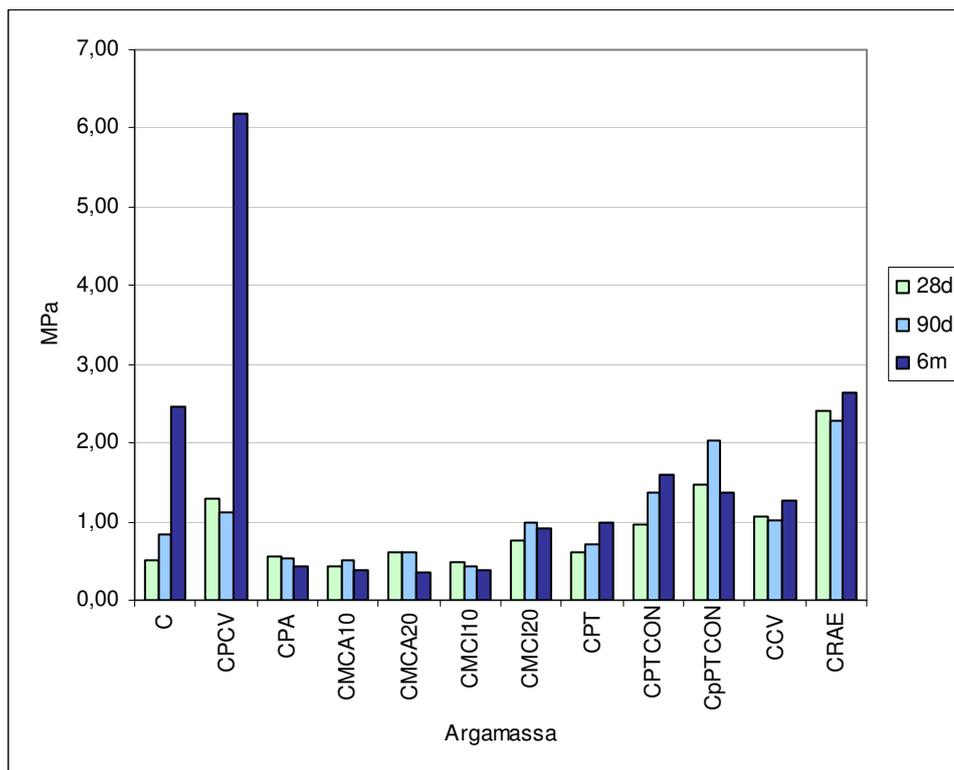


Fig. 6.75 Resistência à compressão

A argamassa com cal aérea aumenta a sua resistência à compressão de 0,5MPa aos 28 dias para 2,5MPa aos 6 meses. Nas argamassas com pozolanas naturais a argamassa contendo Pozolana de Cabo Verde tem resistência à compressão inicial um pouco superior a 1MPa, que sobe para 6MPa aos 6 meses, enquanto a argamassa com Pozolana dos Açores apresenta resistência à compressão baixa nas diversas idades, abaixo de 1MPa.

Relativamente às argamassas com Metacaulino de Alvarães e Metacaulino Industrial, revelaram comportamento semelhante, obtendo baixa resistência à compressão, abaixo de 1MPa nas diversas idades. A adição de maior quantidade de metacaulino parece ter tido um ligeiro efeito no aumento da resistência.

A argamassa com Pó de Tijolo obteve valores de resistência similares aos obtidos com as argamassas contendo metacaulino, também abaixo de 1MPa. A argamassa de cal em pó e fragmentos de tijolo teve uma subida gradual de resistência, apresentando valores iniciais elevados e uma resistência à compressão aos 6 meses de 1,6MPa. Um comportamento com ligeiras diferenças foi protagonizado pela argamassa com cal em pasta e Fragmentos de Tijolo, que obteve valores mais elevados nas primeiras idades e um valor similar aos 6 meses.

Para a argamassa contendo Cinzas Volantes foram obtidos valores um pouco acima de 1MPa nos ensaios efectuados às várias idades. Os resultados de resistência à compressão mais elevados foram obtidos pela argamassa com Resíduos de Argila Expandida, cerca de 2,4MPa, que se manteve dentro da mesma gama de valores nos ensaios efectuados às diversas idades.

6.3.4.3 Determinação do módulo de elasticidade

Tab.6.35 Módulo de Elasticidade Dinâmico (MPa)

Argamassa	M.E. 28d	M.E. 90d	M.E. 6m
C	2040	2327	2955
CPCV	4767	2768	2372
CPA	2741	2485	818
CMCA10	1254	1217	1246
CMCA20	910	1243	1009
CMCI10	1362	1517	1686
CMCI20	1199	1456	1266
CPT	n.r.	n.r.	1363
CPTCON	1868	1911	1514
CpPPTCON	1503	1719	2111
CCV	3779	4352	4181
CRAE	4535	4017	3777

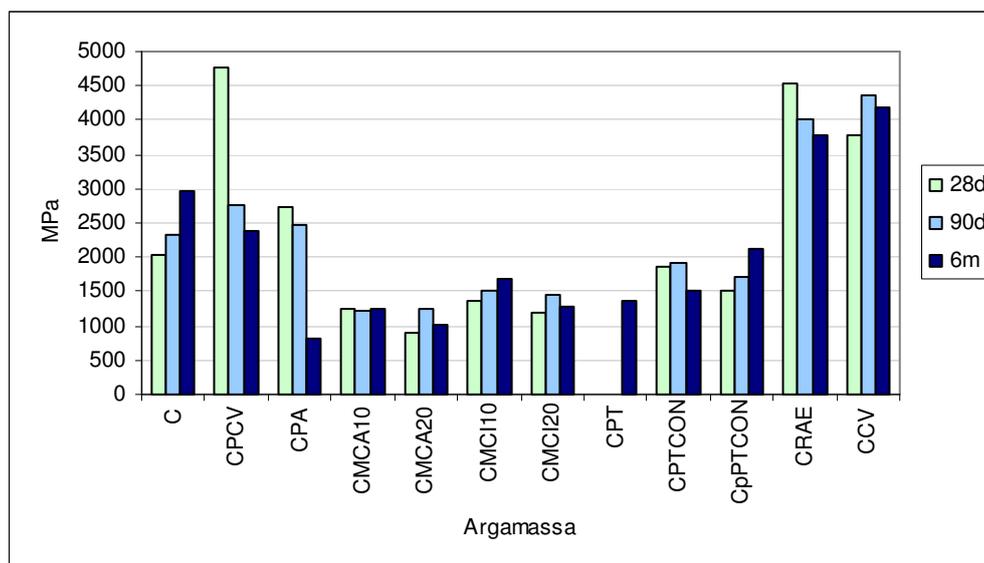


Fig. 6.76 Módulo de elasticidade dinâmico

Enquanto o Módulo de Elasticidade Dinâmico aumenta gradualmente com a idade no caso da argamassa de cal aérea, verifica-se o fenómeno contrário para as argamassas com pozolanas

naturais. No caso da argamassa com Pozolana de Cabo Verde, esta descida é especialmente acentuada, dado o elevado Módulo de Elasticidade atingido aos 28 dias.

Valores abaixo ou próximos de 1500MPa são atingidos pelas argamassas com metacaulino, independentemente da origem do produto e da percentagem utilizada.

A argamassa contendo Pó de Tijolo atinge valores aos 6 meses similares aos obtidos nas argamassas com metacaulino e próximos dos 1500MPa. As restantes argamassas contendo tijolo moído, CPTCON e CpPTCON apresentam Módulos de Elasticidade de cerca de 1500MPa a 2000 MPa, nas várias idades.

A utilização de resíduos nas argamassas modificou as suas propriedades, obtendo-se valores de Módulo de Elasticidade entre os 3500MPa e os 4500MPa.

6.3.4.4 Determinação da absorção de água por capilaridade

Tab.6.36 Coeficiente de capilaridade
(kg/m².h^{1/2})

Coeficiente de capilaridade (kg/m ² .h ^{1/2})			
Argamassa	28 d	90 d	6 m
C	10,81	17,21	15,47
CPCV	13,85	5,50	6,53
CPA	16,62	15,63	19,92
CMCA10	22,89	20,79	18,89
CMCA20	20,09	24,27	22,08
CMCI10	19,82	20,50	16,17
CMCI20	22,53	21,40	24,79
CPT	15,72	12,96	11,65
CPTCON	16,38	17,44	17,21
CpPTCON	15,07	12,96	16,96
CCV	17,85	17,43	17,37
CRAE	14,27	17,85	14,77

Tab.6.37 Absorção às 24h (Kg/m²)

Absorção às 24h (kg/m ²)			
Argamassa	28 d	90 d	6 m
C	31,85	46,93	44,32
CPCV	33,56	22,66	31,72
CPA	35,90	35,89	38,76
CMCA10	37,31	35,58	36,58
CMCA20	39,54	39,20	40,43
CMCI10	35,06	35,93	32,61
CMCI20	40,75	40,63	40,60
CPT	34,04	29,18	29,01
CPTCON	46,39	46,06	46,93
CpPTCON	42,80	45,00	45,50
CCV	33,49	33,31	33,33
CRAE	36,03	33,49	37,09

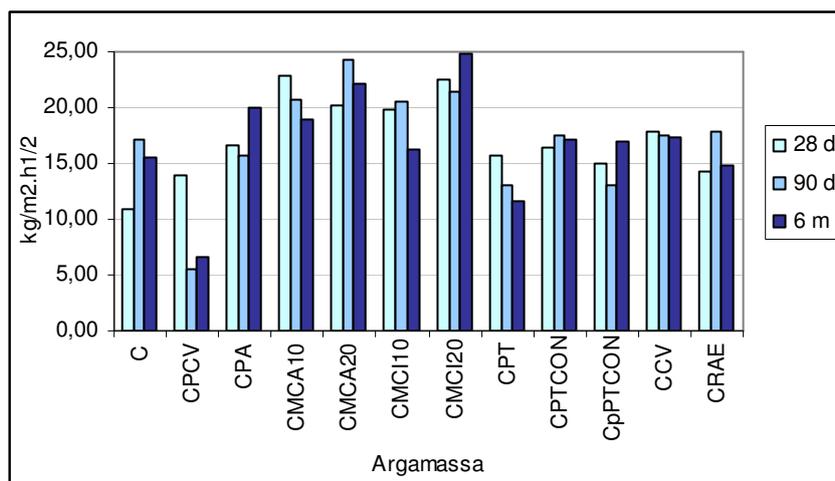


Fig. 6.77 Coeficiente de capilaridade ($\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}^{1/2}$)

Analisando os dados presentes nas tabelas (Tab.6.36 e Tab.6.37) e nos gráficos (Fig. 6.77 e Fig. 6.78) verifica-se que a argamassa de cal aérea apresenta valores de coeficiente de capilaridade intermédios, que sobem com o tempo, mas é das argamassas com maior absorção de água às 24h aos 90 dias e 6 meses e a única que regista um aumento significativo deste parâmetro ao longo do tempo.

As argamassas com pozolanas naturais têm comportamentos muito diferentes: a argamassa com Pozolana de Cabo Verde tem, de uma forma geral, coeficientes de capilaridade baixos (excepto aos 28 dias) e é também das argamassas com menor absorção de água, sendo de constatar que ambos os parâmetros diminuem com a idade; a argamassa com Pozolana dos Açores tem coeficientes de capilaridade mais altos do que a argamassa com cal aérea e estes aumentam com a idade, mas tem uma absorção às 24h que praticamente se mantém no tempo e é mais baixa do que a absorção da argamassa de cal aérea aos 90 dias e aos 6 meses.

As argamassas com Metacaulino de Alvarães e Metacaulino Industrial apresentam elevados coeficientes de capilaridade mas absorção às 24 horas inferior à verificada pela argamassa de cal aérea aos 90 dias e 6 meses. Não existem diferenças significativas no comportamento das argamassas devido à proveniência dos materiais. Contudo, verifica-se uma descida do coeficiente de capilaridade com o tempo nas argamassas com menos metacaulino e uma subida no caso das argamassas com maior percentagem deste material; a absorção de água às 24h é ligeiramente superior nas argamassas com maior percentagem de metacaulino.

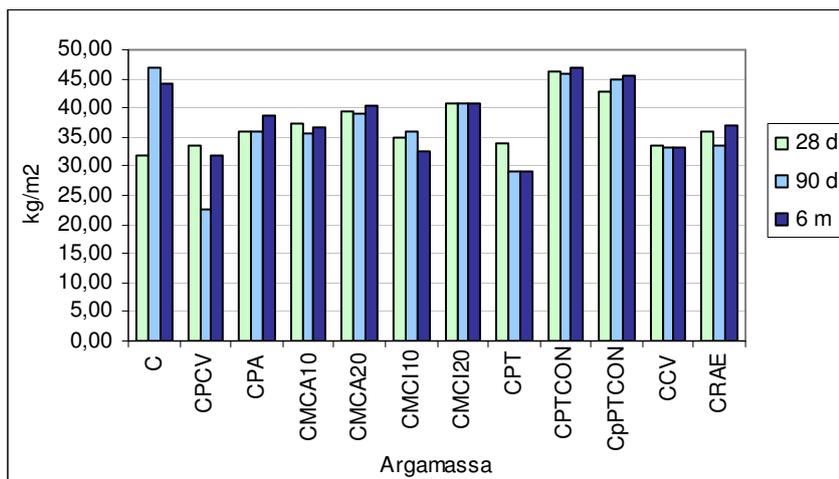


Fig. 6.78 Absorção de água às 24h (kg/m²)

A argamassa com Pó de Tijolo tem um coeficiente de capilaridade que baixa com tempo, tornando-se inferior ao da argamassa de cal aérea a partir dos 90 dias e apresenta baixa absorção de água, que decresce no tempo. Já as argamassas com Fragmentos de Tijolo (CPTCON e CpPTCON) têm coeficientes de capilaridade da mesma ordem de grandeza que CPT mas absorção às 24h consideravelmente superiores, similares às obtidas com a argamassa de cal aos 90 dias e 6 meses.

O coeficiente de capilaridade das argamassas com resíduos é praticamente constante na argamassa com Cinzas Volantes e geralmente um pouco mais baixo nas argamassas com Resíduo de Argila Expandida. De forma inversa a absorção de água às 24h é um pouco mais elevada em argamassas com Resíduo de Argila Expandida face às argamassas com Cinzas Volantes, sendo contudo o valor baixo, relativamente às restantes argamassas, em ambos os casos.

Relativamente à secagem das argamassas, verifica-se um comportamento diferenciado, ilustrado de forma exemplificativa nos gráficos da Fig. 6.79 à Fig. 6.81 e visualizável nos gráficos de absorção capilar e secagem do Anexo 2.

A capacidade de secagem das argamassas aumenta usualmente com o tempo para a argamassa de cal aérea, cal com Pozolana de Cabo Verde, cal com Pó de Tijolo, Cal com Fragmentos de Tijolo e cal com Metacaulino Industrial a 10% (C, CPCV, CPT, CPTCON; CMCI10). Para as restantes argamassas com metacaulino, a argamassa com cal em pasta e as argamassas com resíduos (CMCA10, CMCA20, CMCI20, CpPTCON, CCV, CRAE) a secagem é mais lenta e não sofre alterações significativas até aos 6 meses.

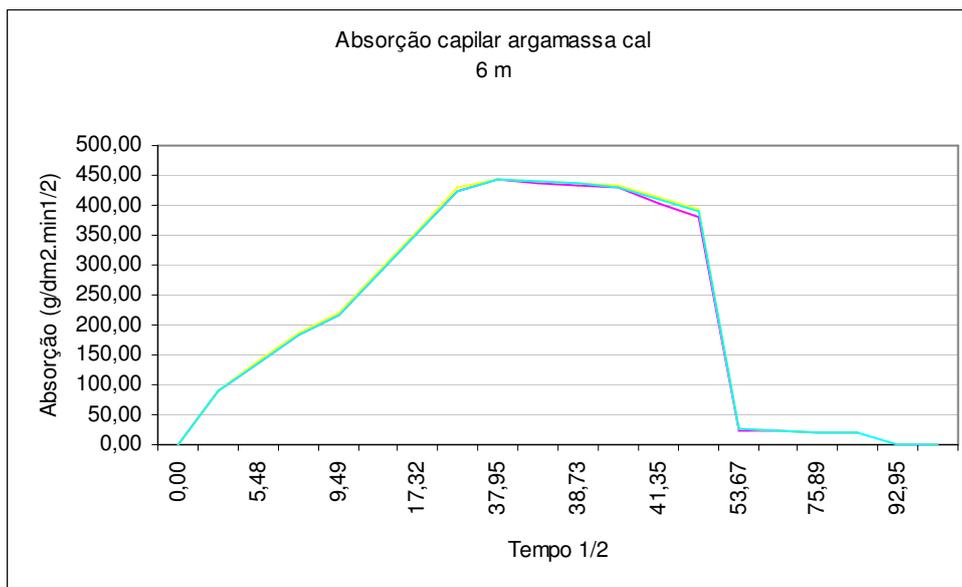


Fig. 6.79 Absorção capilar de argamassa de cal (C) com 6 meses

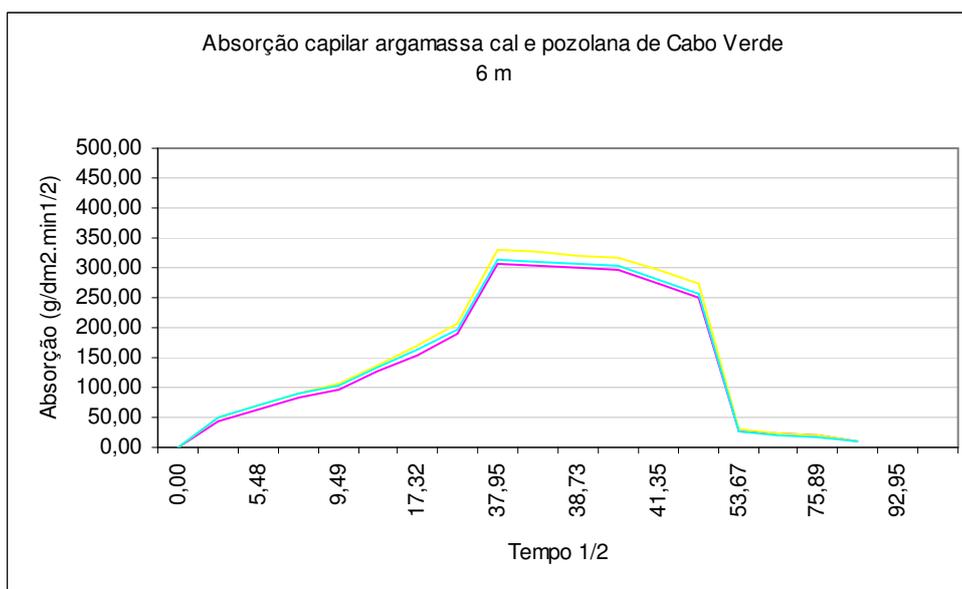


Fig. 6.80 Absorção capilar de argamassa com Pozolana de Cabo Verde (CPCV) com 6 meses

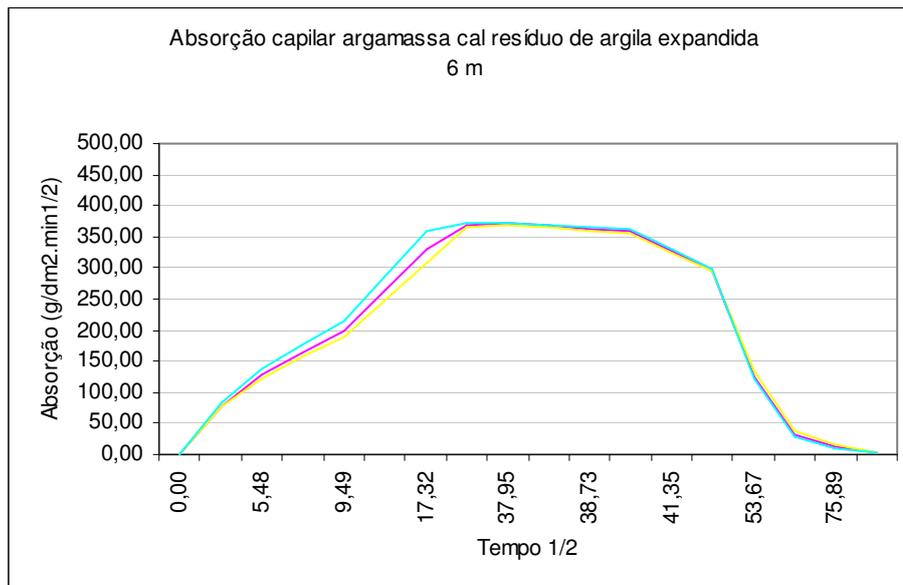


Fig. 6.81 Absorção capilar de argamassa com Resíduo de Argila Expandida (CRAE) com 6 meses

6.3.4.5 Determinação da permeabilidade ao vapor de água

Na Tab.6.38 registam-se os valores de permeância (Λ) e da camada de ar de difusão equivalente (S_D), de forma a avaliar a permeabilidade ao vapor de ar das amostras estudadas.

Tab.6.38 Permeância e Camada de ar de difusão equivalente

Argamassa	Λ (kg/m².s.Pa)	S_D (m)
C	1207,97	0,08
CPCV	1309,42	0,07
CPA	1390,57	0,07
CMCA10	1591,90	0,06
CMCA20	1587,22	0,06
CMCI10	491,96	0,13
CMCI20	1495,14	0,06
CPT	1460,81	0,06
CPTCON	1067,50	0,09
CpPTCON	1328,15	0,07
CCV	978,55	0,09
CRAE	1326,59	0,07

Os valores de permeância e da camada de ar de difusão equivalente são similares para a maioria das argamassas estudadas e indicam uma permeabilidade ao vapor de água ligeiramente superior à argamassa de cal aérea. As argamassas menos permeáveis são CMCI10 (com Metacaulino

Industrial a 10%), CCV (com Cinzas Volantes) e CPTCON (com Fragmentos de Tijolo), seguidas pela argamassa de cal aérea.

6.3.4.6 Avaliação da capacidade de impermeabilização

Tab.6.39 Avaliação do comportamento de molhagem/secagem

Argamassa	Humidímetro		
	M (h)	S (h)	H (mv.h)
C	0,25	42	15969
CPCV	0,25	66	44421
CPA	0,25	52	18269
CMCA10	0,25	24	14803
CMCA20	0,58	35	21713
CMCI10	0,50	17	11273
CMCI20	0,58	45	26893
CPT	1,17	27	14078
CPTCON	0,58	46	24591
CpPPTCON	1,08	60	35586
CCV	0,92	115	67401
CRAE	0,92	104	53136

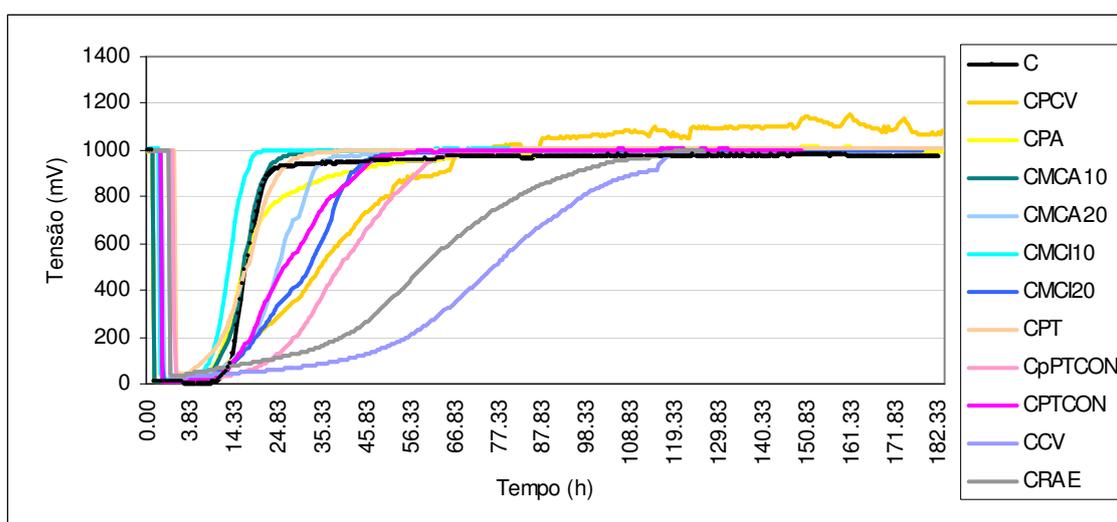


Fig. 6.82 Avaliação da capacidade de impermeabilização

A informação dada pelas Fig. 6.82 e Fig. 6.83 e pela Tab.6.39 permite verificar o comportamento à molhagem e secagem do suporte protegido pelas diversas argamassas. Os resultados individualizados estão no Anexo 2.

A molhagem é mais rápida na argamassa de cal aérea, nas argamassas contendo pozolanas naturais e na argamassa que contem menor quantidade de Metacaulino Industrial (C, CPCV, CPA, MCI10) e mais lenta nas argamassas com Pó de Tijolo, Fragmentos de Tijolo (com cal em pasta) e Resíduo de Argila Expandida (CPT, CpPTCON; CRAE).

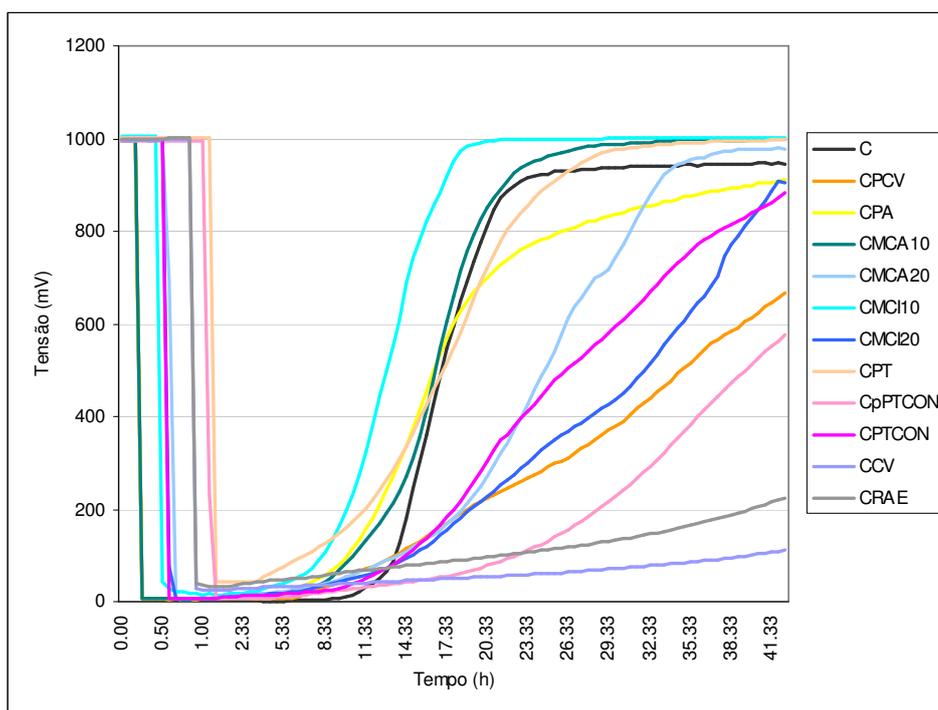


Fig. 6.83 Avaliação da capacidade de impermeabilização – molhagem e início de secagem

A secagem é mais rápida nas argamassas contendo menor percentagem de metacaulino (CMCI10 e CMCA10) e na argamassa com Pó de Tijolo (CPT) e mais lenta nas argamassas com Cinzas Volantes e Resíduo de Argila Expandida (CCV, CRAE).

No grupo das argamassas contendo metacaulino, verifica-se que o aumento da percentagem de metacaulino provoca maior atraso na molhagem e dificuldade na secagem. Nas argamassas com adição de tijolo moído, a argamassa com Pó de Tijolo (CPT) tem maior atraso na molhagem e facilidade de secagem, enquanto que a argamassa com Fragmentos de Tijolo e cal em pasta tem maior atraso na molhagem, mas também mais dificuldade de secagem.

As argamassas que apresentam melhor comportamento relativamente à molhagem/secagem são as argamassas com menor quantidade de metacaulino (CMA10, CMI10) e a argamassa com Pó

de Tijolo. As argamassas com pior comportamento relativamente a estes parâmetros são as que contêm Cinzas Volantes (CCV) e Resíduo de Argila Expandida (CRAE).

6.3.4.7 Avaliação da fissuração

Na Tab.6.40 figuram os resultados da Força de Retracção Restringida (Fr), da Energia de Rotura no Ensaio de Tracção (G) e dos coeficientes relativos à abertura da primeira fenda e evolução da fissuração (CSAF e CREF). Os gráficos dos ensaios de retracção restringida e de tracção encontram-se no Anexo 2.

Tab.6.40 Susceptibilidade à fendilhação

Argamassa	Fr (N)	G (N.mm)	CSAF	CREF (mm)	Susceptibilidade à fissuração
C	50	82	1,4	1,6	Fraca
CPCV	47	85	1,1	1,8	Fraca
CPA	51	69	1,1	1,4	Fraca
CMCA10	57	65	1,2	1,2	Fraca
CMCA20	49	98	1,9	2,3	Fraca
CMCI10	50	34	1,5	0,7	Média
CMCI20	29	108	12,2	10,1	Fraca
CPT	57	90	7,5	5,4	Fraca
CPTCON	64	121	6,9	6,4	Fraca
CpPTCON	52	214	5,0	2,5	Fraca
CCV	66	104	1,8	1,5	Fraca
CRAE	53	48	2,4	0,9	Fraca

Todas as argamassas testadas, com excepção da argamassa contendo Metacaulino Industrial em menor proporção (CMCI10), foram classificadas como de fraca susceptibilidade à fissuração. Adicionalmente, a maioria das argamassas apresenta um alto valor de G, significando alta ductilidade. Os baixos valores de Fr registados pelas argamassas de uma forma geral significam um desenvolvimento baixo de forças associadas à retracção e conseqüentemente menor transmissão de forças para o suporte [229].

6.3.4.8 Envelhecimento artificial acelerado

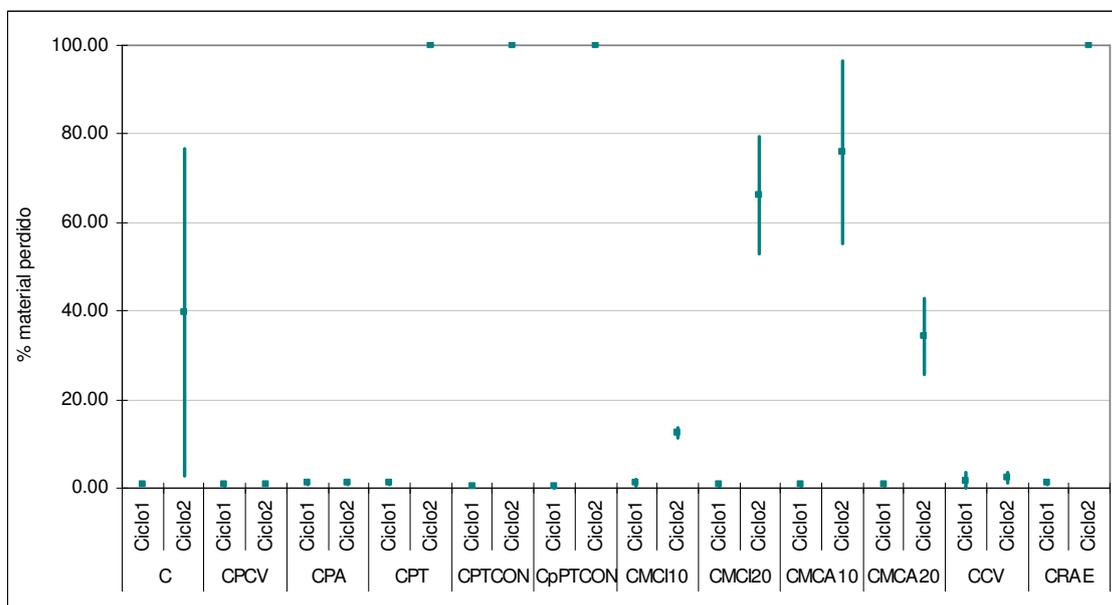


Fig. 6.84 Material perdido (% em massa) após cada ciclo de envelhecimento

Os resultados do ensaio de envelhecimento artificial acelerado encontram-se expressos na Fig. 6.84, através das perdas de massa percentuais sobre a massa inicial da argamassa, em média e desvio padrão, verificadas no fim de cada ciclo.

Denota-se a elevada resistência das argamassas ao primeiro ciclo, de calor-chuva. O ciclo gelo-degelo produziu maior degradação, tendo causado a queda da argamassa de revestimento nos casos de CPT, CPTCON, CpPPTCON e CRAE e degradação das argamassas de cal (C) e de metacaulino (CMCI10, CMCI20, CMCA10, CMCA20)

A queda da totalidade do reboco usualmente tem origem na falta de aderência entre o reboco e o suporte devido à técnica de aplicação da argamassa e à inadequabilidade do suporte, que não simula as paredes para as quais foram elaboradas as argamassas. No caso das argamassas com Fragmentos de Tijolo, o facto de terem alguma fissuração superficial inicial promoveu o seu destacamento.

No caso das argamassas de cal e de metacaulino e cal, a degradação deu-se por perda de material superficial e nos bordos, conforme se visualiza na Fig. 6.85.



Fig. 6.85 Provetes após ensaio de envelhecimento artificial acelerado

6.3.4.9 Avaliação da resistência aos sais

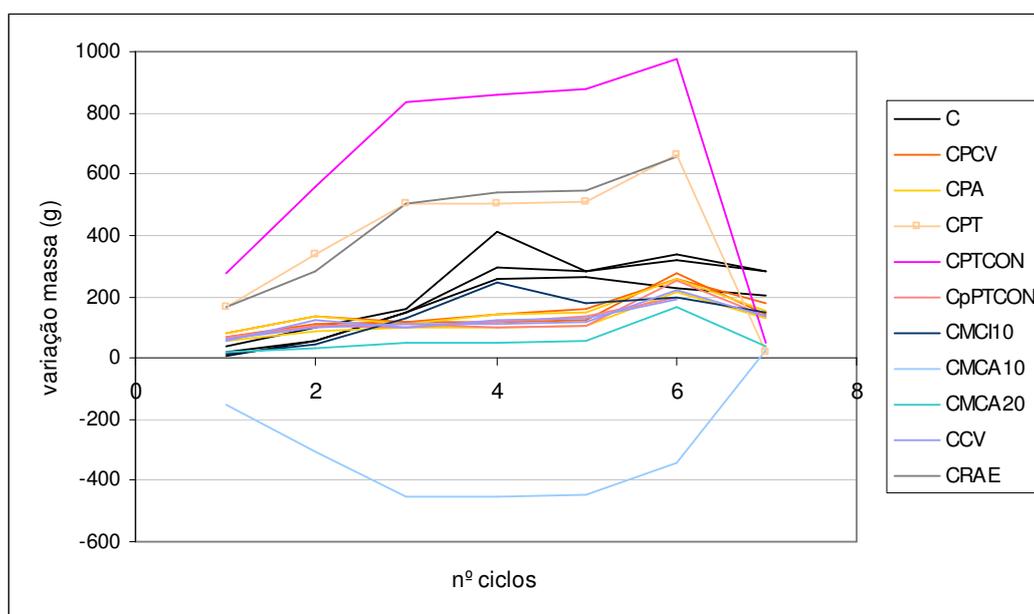


Fig. 6.86 Variação de massa, em g, dos provetes durante o ensaio de resistência aos sais

Os sais solúveis podem ser particularmente danosos para argamassas e suportes, causando a sua deterioração. As argamassas expostas a cloretos são susceptíveis a degradação por cristalização da halite, enquanto a presença de sulfatos despoleta reacções químicas cujos produtos (gesso, etringite, taumasite) são expansivos ou causam fenómenos de degradação pela transição entre fases (mirabilite/tenardite e gesso/anidrite) [3, 23, 110, 111, 122, 123, 170, 171, 176, 194, 223, 239]. A existência de cloretos solúveis pode também resultar em reacção química com aluminatos de cálcio produzindo sal de Friedel [23, 169, 202]. A avaliação da resistência aos sais visa verificar a resistência aos sais solúveis das argamassas e a sua capacidade de impedir a

sua acumulação no suporte. Foram utilizadas condições particularmente adversas, de colocação em solução salina, sobre o tipo de suporte que tem teor mais elevado em sais solúveis.

De uma forma geral, verifica-se menor variação de massa das argamassas contendo pozolanas. Apenas a argamassa MCI10 mostra ter um comportamento inadequado, verificando-se degradação desde o primeiro ciclo. As argamassas CPTCON e CPT tiveram aumento de peso inicial mais elevado do que as argamassas de cal, devido à maior acumulação de sais e degradação mais acentuada a partir do sexto ciclo. Verificou-se que as argamassas tiveram capacidade de transporte de sais que cristalizaram fundamentalmente na face superior do suporte e do reboco (Fig. 6.87).



Fig. 6.87 Provetes após ensaio de resistência aos sais

6.3.5 Resultados de ensaios a longo prazo em argamassas com pozolanas naturais

Foram verificadas as propriedades de Resistência Mecânica (Flexão e Compressão) a argamassas elaboradas para os Ensaio Preliminares, com as idades de 1 ano e de 3 anos. Estas argamassas, com composições e condicionamentos diferentes, foram mantidas nas condições de $23\pm 2^{\circ}\text{C}$ de temperatura e $65\pm 5\%$ de humidade relativa após os 90 dias.

6.3.5.1 Evolução da resistência à flexão

Tab.6.41 Resistência à flexão de argamassas - evolução

Designação	F 28d		F 90d		F 1 a		F 3 a	
	M	D.P.	M	D.P.	M	D.P.	M	D.P.
C	0,27	0,04	0,26	0,06	0,38	0,03	0,42	0,15
CPA	0,20	0,01	0,11	0,04	0,20	0,03	0,15	0,03
CPCV1C1	0,37	0,05	0,30	0,04	0,30*	n.r.	0,30	0,09
CPCV2C1	0,53	0,04	0,42	0,04	0,38	0,04	0,36	0,07
CPCV2C6	0,18	0,02	0,14	0,01	0,23*	n.r.	0,32	0,02
CPCV2C7	0,75	0,03	0,60*	n.r.	0,63	0,02	0,44	0,05
CPCV4C1	1,04	0,16	0,83*	n.r.	0,90	0,20	0,69	0,07
CPCV4C5	0,69	0,06	0,55*	n.r.	0,69	0,24	n.r.	n.r.

* ensaio não efectuado; valor extrapolado

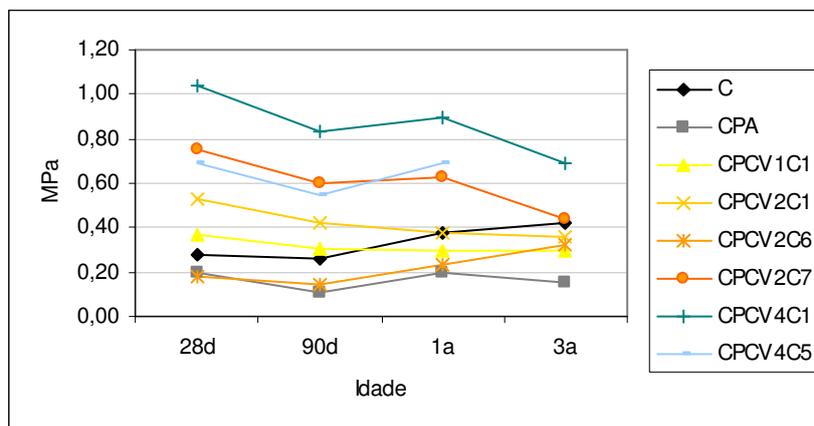


Fig. 6.88 Resistência à flexão - evolução

Avaliando os resultados apresentados em Tab.6.41 e Fig. 6.88, verifica-se um aumento gradual de resistência à flexão da argamassa de cal aérea (C), enquanto a argamassa contendo Pozolana dos Açores sofre algumas variações de resistência, que se situa, contudo, sempre dentro da mesma gama de valores. Relativamente às argamassas contendo Pozolana de Cabo Verde,

registaram-se duas situações distintas: as argamassas com traço 1:0,5:2,5 ou 1:1:4, independentemente do seu condicionamento inicial, convergiram para resistências muito próximas da atingida pela argamassa de cal aérea; as argamassas com traço 1:1:1 mantêm uma resistência à flexão mais elevada com 1 ano de idade e argamassa com esta composição, ensaiada com 3 anos revela também uma resistência superior (embora em fase de descida).

6.3.5.2 Evolução da resistência à compressão

Tab.6.42 Resistência à compressão - evolução

Designação	C 28d		C 90d		C 1a		C 3a	
	M	D.P.	M	D.P.	M	D.P.	M	D.P.
C	0,50	0,02	0,84	0,03	0,80	0,05	0,85	0,08
CPA	0,57	0,03	0,52	0,04	0,47	0,02	0,42	0,03
CPCV1C1	1,29	0,05	1,12	0,14	1,07*	n.r.	1,01	0,06
CPCV2C1	1,51	0,06	1,53	0,06	1,19	0,08	0,89	0,21
CPCV2C6	0,97	0,09	0,89	0,04	0,66*	n.r.	0,44	0,02
CPCV2C7	1,90	0,35	2,05*	n.r.	2,20	0,06	2,03	0,08
CPCV4C1	6,01	0,21	5,55*	n.r.	5,23	0,11	5,73	0,12
CPCV4C5	6,03	0,07	6,36*	n.r.	6,73	0,35	n.r.	n.r.

* - ensaio não efectuado – valor extrapolado

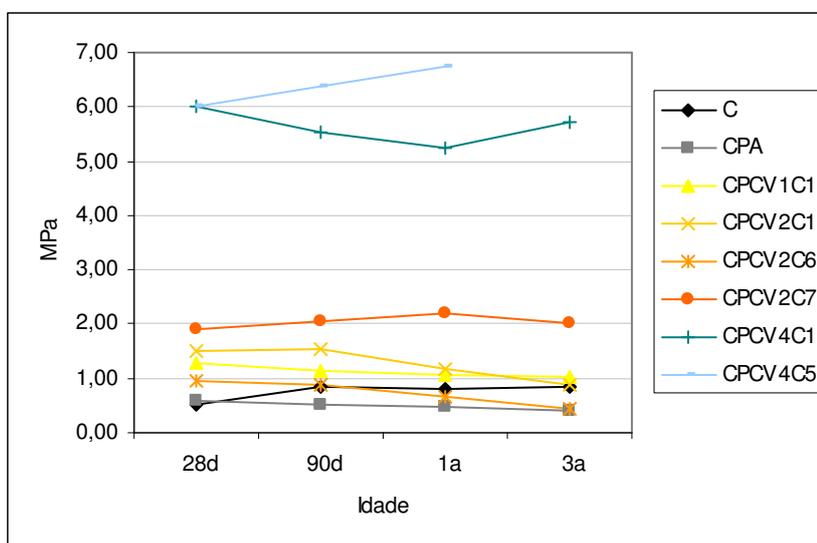


Fig. 6.89 Resistência à compressão - evolução

Os resultados obtidos através da determinação da resistência à compressão (Tab.6.42, Fig. 6.89) diferem dos resultados de resistência à flexão, sendo mais perceptível a influência do condicionamento inicial para além das diferenças induzidas pela composição. Verifica-se o

crescimento lento da resistência da argamassa de cal aérea (C) e o decréscimo suave da resistência da argamassa contendo Pozolana dos Açores (CPA).

As argamassas com Pozolana de Cabo Verde e composição 1:1:1 (CPCV4) obtiveram os valores de resistência mais elevados. Contudo; curiosamente, e dependendo do condicionamento utilizado, comportaram-se de formas diferentes, com um aumento gradual de resistência da argamassa condicionada segundo a EN 1015-11 [38] e um decréscimo seguido de uma aumento de resistência para valores próximos aos iniciais da argamassa efectuada conforme o Cahier 2669-4 CSTB [54]. É duvidoso que a parca diferença de temperatura e humidade induza comportamentos tão díspares, sendo de salientara a possível influência do procedimento inicial da EN 1015-11, principalmente no que toca à manutenção de elevada humidade relativa, no desenvolvimento das resistências.

As restantes argamassas contendo Pozolana de Cabo Verde tiveram um comportamento diferenciado: as que foram condicionadas a 23°C de temperatura e a 50% de humidade relativa, tiveram um lento decréscimo de resistência com o tempo, aproximando-se, ao fim de 3 anos, da resistência da argamassa de cal aérea; a argamassa cujo condicionamento inicial decorreu no exterior (CPCV2C6) teve um decréscimo de resistência, que se situou, ao fim de 3 anos, abaixo da resistência da argamassa de cal aérea; a argamassa cujo condicionamento inicial foi em água (CPCV2C7) manteve valores bastante mais elevados de resistência à compressão ao fim de 3 anos (similar aos da sua resistência inicial) do que as restantes.

6.3.6 Análise de resultados

- Resistência Mecânica

As argamassas estudadas podem ser divididas, em relação à resistência mecânica desenvolvida, em argamassas com resistência mecânica superior às argamassas de cal aérea e argamassas cuja resistência mecânica não atingiu os valores obtidos pela argamassa de cal aérea. No primeiro grupo figuram a argamassa com Pozolana de Cabo Verde e as argamassas com resíduos (Cinzas Volantes e Resíduo de Argila Expandida). As argamassas efectuadas com Fragmentos de Tijolo (CPTCON e CpPTCON) têm resistência à flexão superior à da argamassa de cal aérea, mas resistência à compressão ligeiramente inferior. Com resistência mecânica geralmente mais baixa do que a da argamassa de cal, figuram as argamassas com Pozolana dos Açores, Metacaulino Industrial e Metacaulino de Alvarães e Pó de Tijolo.

Os Módulos de Elasticidade acompanham, de uma forma geral, as variações de resistência à compressão entre argamassas (a única excepção é a da argamassa com Pozolana dos Açores).

- Comportamento à Água

Verifica-se que as argamassas com menor resistência mecânica apresentam coeficientes de capilaridade mais elevados, mas absorção às 24h mais baixa do que a argamassa de cal. Excepção a esta regra é a argamassa com Pó de Tijolo, com um coeficiente de capilaridade baixo e que baixa com a idade e também com uma absorção às 24h descendente com o tempo e de baixo valor. As restantes argamassas, (CPCV, CPT, CPTCON, CpPTCON, CCV e CRAE) detêm coeficientes de capilaridade um pouco superiores ao da argamassa de cal, excepto CPCV com o mais baixo coeficiente aos 90 dias e 6 meses. Contudo, relativamente à absorção de água existe uma diferenciação entre as argamassas com Fragmentos de Tijolo, as únicas com absorção às 24h superior à verificada pela argamassa de cal, e as restantes, com absorções inferiores.

O ensaio de capacidade de impermeabilização revela um adequado comportamento de molhagem/secagem das argamassas, dado que todas as argamassas têm secagens muito mais rápidas do que argamassas de cal e cimento ou argamassas de cimento [192]. As argamassas com melhor desempenho relativamente a este parâmetro são CPT, com maior tempo de molhagem e secagem rápida, CMCI10 e CMCA10.

Todas as argamassas apresentam baixa permeabilidade ao vapor de água, com Sd abaixo de 0,08. As excepções são CMCI (Sd de 0,13), CCV (Sd de 0,09) e CpPTCON (Sd de 0,09).

De forma a analisar o comportamento das argamassas comportando a resistência mecânica e o seu comportamento à água, foi efectuada uma correlação entre resistência à compressão e o coeficiente de capilaridade das argamassas com 6 meses de idade.

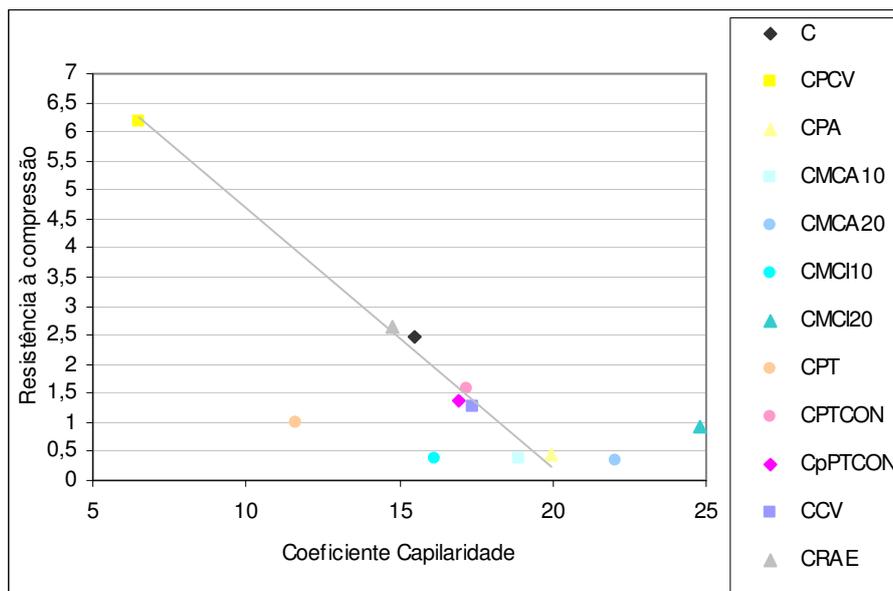


Fig. 6.90 Resistência à compressão versus coeficiente de capilaridade

Da análise da Fig. 6.90 verifica-se que a maioria das argamassas têm uma relação inversa entre resistência à compressão e coeficiente de capilaridade, medidos aos 6 meses após provável densificação da estrutura por formação de produtos da reação pozolânica [12]. A argamassa PTCON não se enquadra neste contexto, pois, embora apresente baixa resistência mecânica, tem igualmente baixo coeficiente de capilaridade. É notória a influência da adição de metacaulino no comportamento à água das argamassas e igualmente a sua pequena influência na resistência mecânica. As argamassas com menos metacaulino (CMCI10 e CMCA10) apresentam coeficientes de capilaridade mais baixos, enquanto a adição de maior quantidade de metacaulino aumenta o coeficiente de capilaridade (CMCI20 e CMCA20). Também no ensaio de molhagem/secagem com o húmidímetro se nota a influência da adição deste material, com excelente prestação de CMCI10 e CMCA10.

- Envelhecimento artificial acelerado e resistência aos sais

Os ensaios de envelhecimento artificial acelerado revelaram bom comportamento das argamassas com pozolanas exceptuando as argamassas com metacaulino, que sofreram degradação. O destacamento do reboco poderá ser contornado através da utilização de diferentes suportes e técnicas de execução.

Relativamente à resistência aos sais, denota-se igualmente uma melhor prestação geral das argamassas com pozolanas face às argamassas de cal, exceptuando CMCI10 e verifica-se que as argamassas com cal aérea em pó e argila cozida (CPT e CPTCON) funcionam como argamassas de acumulação.

6.4 Análise geral

- Influência da adição de materiais pozolânicos a argamassas de cal aérea

A modificação de características das argamassas de cal aérea por adição de pozolanas deve-se fundamentalmente à reacção pozolânica, embora outros fenómenos, como a introdução de material fino, influenciem a estrutura interna e, portanto, a resistência mecânica e o comportamento à água.

A análise dos materiais pozolânicos empregues nas argamassas revelaram características comuns como finura, elevada superfície específica e composição química com elevado teor em silicatos e aluminatos. Através da análise da composição mineralógica determinada por DRX, verificou-se a existência de maior quantidade de material amorfo nos materiais Metacaulino Industrial e Metacaulino de Alvarães, seguidos pelos materiais Cinzas Volantes, Pozolana de Cabo Verde, Pozolana dos Açores e Resíduo de Argila Expandida. Os resultados da caracterização de materiais sugeriram maior reactividade do metacaulino face aos restantes materiais, fundamentados pela quantidade de material amorfo, indutor de maior reactividade [193], na sua composição e da sua elevada superfície específica.

Os resultados dos ensaios de reactividade pozolânica efectuados aos diversos materiais não foram conclusivos, provavelmente devido à reactividade lenta destes materiais. O metacaulino é reportado como tendo reactividade mais rápida do que pozolanas naturais ou pó de tijolo [136], mas, em pastas onde todo o hidróxido de cálcio é consumido pela reacção pozolânica, atinge-se a ausência de hidróxido de cálcio entre os 28 dias [136] e os 90 dias [66]. Contudo os ensaios de reactividade baseiam-se em reacções que se dão até aos 28 dias.

As argamassas efectuadas com os diversos materiais revelaram aumento de resistência mecânica com a utilização de Pozolana de Cabo Verde, Fragmentos de Tijolo, Cinzas Volantes e Resíduo de Argila Expandida nas argamassas de cal. O comportamento face à água das argamassas com estes materiais, medido pelos ensaios de capilaridade, permeabilidade ao vapor de água e capacidade de impermeabilização, pode ser classificado como bom. De forma análoga, as argamassas com os materiais supracitados revelaram baixa susceptibilidade à fissuração.

As argamassas com Pó de Tijolo obtiveram baixas resistências mecânicas mas um excelente comportamento face à água. As argamassas com Pozolana dos Açores obtiveram resultados indicando também baixas resistências mecânicas mas um bom comportamento à água. Ambas revelaram baixa susceptibilidade à fissuração.

O metacaulino foi utilizado numa quantidade inferior à devida, tendo provavelmente sido quase totalmente utilizado na reacção pozolânica, não possibilitando contudo a formação de quantidade de produtos de reacção suficientes para criar ligações. A sua utilização modificou principalmente a estrutura porosa das argamassas de cal aérea, induzindo resistências mecânicas mais baixas e modificações no comportamento à água.

- Avaliação da compatibilidade das argamassas com suportes antigos

É desejável que as argamassas sejam aplicáveis em suportes antigos. Para tal necessitam de ter características físicas, mecânicas e químicas adequadas e compatíveis com o suporte [144, 169, 213, 218, 219, 227]. Os requisitos expressos na Tab.6.43 e na Tab.6.44 são indicativos de parâmetros a respeitar por argamassas a colocar em edifícios antigos, sobre paredes de pedra irregular, funcionando como reboco exterior ou como refechamento de junta.

Tab.6.43 Requisitos estabelecidos para características mecânicas das argamassas, conforme [227]

Uso	Características Mecânicas (MPa)			Comportamento à retracção restringida			
	Rt	Rc	E	F _{máx} (N)	G (N.mm)	CSAF	CREF
Reboco exterior	0,2-0,7	0,4-2,5	2000-5000	<70	>40	>1,5	>0,7
Refechamento de juntas	0,4- 0,8	0,6-3	3000-6000	<70	>40	>1,5	>0,7

Tab.6.44 Requisitos estabelecidos para características de comportamento à água e ao clima, conforme [227]

Uso	Comportamento à água					Envelhecimento Artificial Acelerado
	Ensaio clássico		Ensaio com humidímetro			
	S _D (m)	C (kg/m ² .h ^{1/2})	M (h)	S (h)	H (mv.h)	
Reboco exterior	<0,08	<12; >8	>0,1	<120	<16 000	Médio: degradação nos ciclos gelo/degelo
Refechamento de juntas	<0,10	<12;>8	>0,1	<120	<16 000	

Foi efectuada a comparação entre valores obtidos pelas argamassas analisadas e os requisitos estabelecidos (Tab.6.45, Tab.6.46).

Tab.6.45 Comparação com requisitos estabelecidos para características mecânicas das argamassas, conforme [227]

Argamassa	Características Mecânicas (MPa)			Comportamento à retracção restringida			
	Rt	Rc	E	Fmáx (N)	G (N.mm)	CSAF	CREF
C	0,26	0,84	2327	50	82	1,4	1,6
CPCV	0,30	1,12	2768	47	85	1,1	1,8
CPA	0,11	0,52	2485	51	69	1,1	1,4
CMCA10	0,37	0,50	1217	57	65	1,2	1,2
CMCA20	0,26	0,62	1243	49	98	1,9	2,3
CMCI10	0,22	0,43	1517	50	34	1,5	0,7
CMCI20	0,21	0,98	1456	29	108	12,2	10,1
CPT	0,19	0,70	n.r.	57	90	7,5	5,4
CPTCON	0,51	1,37	1911	64	121	6,9	6,4
CpPTCON	0,63	2,04	1719	52	214	5,0	2,5
CCV	0,52	1,02	4352	66	104	1,8	1,5
CRAE	0,51	2,28	4017	53	48	2,4	0,9

No campo das características mecânicas, todas as argamassas elaboradas e ensaiadas cumprem os requisitos estipulados para argamassas de reboco, excepto CMCI10, que apresenta CREF de 0,7 e G inferior a 40 e, portanto, média susceptibilidade à fissuração. A comparação dos valores obtidos no ensaio de susceptibilidade à fissuração com critérios de compatibilidade mais discriminados [226] confirma o adequado comportamento das argamassas, excepto CMCI10, neste campo.

As argamassas com Cinzas Volantes e com Resíduos de Argila Expandida cumprem também os requisitos estipulados para utilização como argamassas de refechamento de juntas.

Tab.6.46 Requisitos estabelecidos para características de comportamento à água e ao clima, conforme [227]

Uso	Comportamento à água					Envelhecimento Artificial Acelerado
	Ensaio clássico		Ensaio com humidímetro			
	S _D (m)	C (kg/m ² .h ^{1/2})	M (h)	S (h)	H (mv.h)	
C	0,08	17,21	0,25	42	15969	Médio
CPCV	0,07	5,50	0,25	66	44421	Bom
CPA	0,07	15,63	0,25	52	18269	Bom
CMCA10	0,06	20,79	0,25	24	14803	Médio
CMCA20	0,06	24,27	0,58	35	21713	Médio
CMCI10	0,13	20,50	0,50	17	11273	Médio
CMCI20	0,06	21,40	0,58	45	26893	Médio
CPT	0,06	12,96	1,17	27	14078	Destacamento
CPTCON	0,09	17,44	0,58	46	24591	Destacamento
CpPTCON	0,07	12,96	1,08	60	35586	Destacamento
CCV	0,09	17,43	0,92	115	67401	Bom
CRAE	0,07	17,85	0,92	104	53136	Destacamento

Relativamente ao comportamento à água a argamassa CMCI10 teve menor permeabilidade ao vapor de água do que a estipulada. Nenhuma argamassa obteve resultados de coeficiente de capilaridade que se situem dentro do intervalo estabelecido; todas têm coeficiente de capilaridade mais alto excepto CPCV, com coeficiente de capilaridade mais baixo. Contudo, os ensaios revelaram para todas as argamassas exceptuando as que contêm Fragmentos Cerâmicos (CPTCON e CpPTCON), menor absorção de água às 24h do que a argamassa de cal aérea.

Apenas as argamassas CPT, CMCI10 e C cumpriram totalmente os requisitos estipulados para o ensaio com humidímetro. Contudo, analisando o comportamento das argamassas com pozolanas face às argamassas de cal aérea com cimento ou às argamassas de cimento, têm melhor comportamento à secagem [231].

Face a estes resultados, em conjunto com os resultados de envelhecimento artificial acelerado é possível recomendar estas argamassas, excepto as argamassas com metacaulino para utilização em rebocos de edifícios antigos.

Devido à sua resistência mais elevada e maior dificuldade de secagem as argamassas CCV e CRAE são especialmente indicadas para utilização em refeitamento de juntas.

- Compatibilidade com argamassas antigas e suportes de adobe

De forma a serem utilizadas como argamassas de reparação em lacunas, as argamassas elaboradas devem ser compatíveis com as argamassas antigas para não causar a sua deterioração, como acontece quando são utilizadas argamassas de cimento.

A resistência à compressão das argamassas elaboradas é inferior ou similar à das argamassas antigas estudadas, os Módulos de Elasticidade obtidos são baixos e têm elevada ductilidade, excepto CMCI10, sendo portanto possível a sua utilização como argamassas de reparação de lacunas. A menor durabilidade das argamassas com metacaulino estudadas em laboratório e o baixo contributo adicional que fornecem relativamente a argamassas de cal, não favorecem, contudo, a sua utilização. As argamassas elaboradas para utilização específica em Conímbriga apresentam características que promovem a sua aplicação.

O adobe é um material construtivo de ampla utilização no litoral do centro do país, necessitando de argamassas de protecção que sejam compatíveis com a sua baixa resistência mecânica (0,8MPa a 1,7MPa de resistência à compressão, segundo [224]) e que protejam o adobe da água. Das argamassas estudadas a argamassa com Pó de Tijolo, PTCON, reúne as características necessárias para garantir um adequado funcionamento como argamassa de reboco em paredes de adobe.

6.5 Aplicação de Argamassas de Cal com Pozolanas

Para além dos ensaios laboratoriais, efectuados em provetes e ambiente condicionado, reveste-se de fulcral importância a aplicação de argamassas com adições pozolânicas em condições higrótérmicas reais, com as suas variações, assim como a aplicação sobre suportes antigos ou similares.

São factores determinantes as condições climatéricas na altura da aplicação, a técnica utilizada na aplicação e as condições climatéricas subsequentes, com particular incidência no tempo imediatamente subsequente à aplicação, antes da argamassa adquirir características de dureza relevante. Neste tipo de argamassas, ricas em sílica, uma elevada humidade inicial pode ter um papel favorável à reacção entre os constituintes, sendo ainda pouco claro qual a influência da chuva e das variações termo-higrométricas nas variações das propriedades das argamassas com o tempo. Estes ensaios, em condições reais, permitem avaliar o adequado desempenho das argamassas nas condições específicas a que são expostas.

6.5.1 Aplicação em Muretes

A aplicação em muretes foi efectuada na Estação de Ensaio Natural do LNEC/LERevPa, tendo sido aplicados rebocos e argamassas de junta, de forma a testar o funcionamento de argamassas nas suas aplicações mais usuais, em meio externo.

Foram aplicados rebocos com argamassas de cal e pozolanas naturais em murete de alvenaria de tijolo com dimensões de 2m x 2m existente na Estação de Ensaio Natural do LNEC/LERevPa. As aplicações foram efectuadas na Primavera de 2000, tendo sido aplicada argamassa de cal aérea, Pozolana de Cabo Verde e areia siliciosa com o traço volumétrico 1:1:4, em metade do murete e argamassa similar, embora com Pozolana dos Açores na outra metade do murete (Fig. 6.91).



Fig. 6.91 Aplicação de argamassas de reboco com Pozolana de Cabo Verde e Pozolana dos Açores

Cinco anos após a aplicação, denota-se uma ligeira falta de coesão superficial em alguns pontos, o que implicou uma ligeira degradação. Este facto pode, porventura ser atribuível à forma de aplicação, factor que, para além da argamassa em si, é determinante para o adequado funcionamento de um reboco.

As aplicações de argamassa de junta foram feitas com uma argamassa de cal aérea, Pozolana de Cabo Verde e areia siliciosa, com traço volumétrico 1:0,5:2,5, utilizando granito proveniente da região de Lisboa (Fig. 6.92). Um ano após execução, as juntas não apresentam qualquer sinal de fissuração ou degradação.



Fig. 6.92 Aplicação de argamassa de junta em parede de granito

6.5.2 Aplicação em obra

Para o revestimento de um Forte situado junto ao mar com elevados problemas de salinidade, foram experimentados painéis de argamassa colocada como reboco nas próprias paredes do Forte, com as seguintes composições:

Tab.6.47 Composição em volume de argamassas aplicadas em painéis experimentais

Camada	Painel 1	Painel 2	Painel 3	Painel 4	Painel 5
	Cal aérea: cal hidráulica: areia	Cal aérea: cimento branco: areia	Cal aérea: pozolana de Cabo Verde	Cal aérea: pozolana artificial: Areia	Cal aérea: metacaulino : areia
1ª camada	1:1:6	1:1:6	1:0,5:2,5	1:0,25:2,5	1:0,5:2,5
2ª camada	1:2:9	1:2:9	1:0,5:3	1:0,25:3	1:0,5:3

Os painéis tiveram dimensão de 1mx2m, tendo sido efectuada a limpeza do suporte e um salpico com argamassa análoga, mas maior quantidade de água, previamente à aplicação da primeira camada de reboco.



Fig. 6.93 Painel 1 e Painel 2



Fig. 6.94 Painel 3 e Painel 4

Nas imagens da Fig. 6.93 à Fig. 6.95 visualizam-se os painéis executados sobre a parede do Forte; a temperatura média na altura da sua execução variou entre 16°C e 25°C, estando a parede frequentemente sujeita a vento forte. Verificou-se alguma fissuração na primeira camada, provavelmente devido à secagem rápida induzida pela acção conjunta do vento e da temperatura. Na segunda camada, cuja composição supunha argamassas mais pobres em ligante, esta situação não se verificou.



Fig. 6.95 Parede com painéis 3 e 4 e salpico para execução do painel 5

Foram efectuados ensaios de penetração controlada, aderência ao suporte, teor de água, permeabilidade à água sob baixa pressão, carbonatação e identificação de sais nos diversos painéis, 28 dias após a aplicação [204, 225]. Os resultados destes ensaios apontaram como argamassas com a melhor prestação as argamassas com pozolanas dos painéis 3 e 5, nomeadamente de cal aérea e Pozolana de Cabo Verde e de cal aérea e Metacaulino. Estas argamassas mostraram comportamento superior ao da argamassa com cal hidráulica embora, quando comparadas com a argamassa de cimento branco e cal aérea apresentassem resistência mecânica um pouco inferior e permeabilidade à água mais elevada.

6.5.3 Considerações gerais

Em termos qualitativos e no que se refere às argamassas de cal com pozolanas que tinham sido também objecto de caracterização em laboratório – argamassas com Pozolana de Cabo Verde, com Pozolana dos Açores e com Metacaulino – os resultados dos ensaios efectuados *in situ* são coerentes com os resultados obtidos em laboratório.

A argamassa seleccionada para execução dos rebocos do Forte foi uma argamassa com Metacaulino, devido à conjugação dos factores comportamento, cor (um creme ligeiramente rosado) e disponibilidade actual no mercado nacional. No entanto, corrigiu-se a dosagem para 1:1:4 (cal aérea: metacaulino: areia) que se verificou ter melhor comportamento em obra (Fig. 6.96).



Fig. 6.96 Parede rebocada com argamassa de cal aérea e metacaulino

7 Conclusão

Os materiais pozolânicos são já conhecidos desde a antiguidade e alguns, como as pozolanas naturais italianas, o cerâmico cozido a baixas temperaturas, as borras de ferro e, particularmente em Portugal, as pozolanas provenientes dos Açores, foram utilizados amiúde em argamassas e betões, com bons resultados de desempenho e durabilidade. O estudo de argamassas contendo pozolanas naturais e artificiais, a caracterização de diversos materiais pozolânicos e o desenvolvimento e ensaio de argamassas de cal aérea e pozolana permitiram aprofundar o conhecimento sobre estes materiais, o seu uso na antiguidade e as características que imprimem às argamassas.

7.1 Cumprimento dos objectivos e síntese geral dos resultados obtidos

Foram cumpridos os objectivos propostos para o trabalho:

- sistematização de conhecimentos sobre argamassas antigas com pozolanas, para a qual foram recolhidas argamassas de diferentes épocas, tipo de edifício e local, que foram analisadas quanto à sua composição e ensaiadas para determinação de características mecânicas e físicas
- levantamento dos materiais pozolânicos existentes e caracterização dos materiais utilizados na formulação de argamassas para este estudo
- elaboração de argamassas com pozolanas compatíveis com edifícios antigos
- Caracterização de argamassas antigas

Foram efectuadas análises e ensaios de caracterização em argamassas antigas, contendo pozolanas naturais e pozolanas artificiais, provenientes de diversas épocas e funcionando como argamassas de reboco ou de junta em edifícios com diferentes funções.

As argamassas da Época Romana, utilizando principalmente cerâmico moído e designadas por *Opus Signinum* foram recolhidas fundamentalmente de estruturas de contenção ou passagem de água. Outras argamassas desta época, compostas principalmente por cal aérea e desempenhando a função de reboco interior foram utilizadas para análise comparativa.

Verificou-se que as características das argamassas Romanas diferem consoante o local de recolha. É provável que, durante as épocas e dependendo do local, a técnica de produção de argamassas se diferenciasse de forma a adequar-se ao meio. Estas diferenças são notórias desde o aspecto visual da argamassa, denotando diferentes materiais e técnicas, até às características químicas, físicas e mecânicas. Em cada estação arqueológica foram verificadas similitudes entre as argamassas amostradas. Apenas as argamassas provenientes de Tróia se revelaram muito diferentes, devido aos locais de extracção díspares, representativos de diferentes épocas e técnicas construtivas.

Todas as argamassas desta época foram efectuadas utilizando como ligante a cal aérea, por vezes contendo dolomite e/ou magnesite, devido à utilização de uma matéria-prima diferente. A maioria das argamassas foi efectuada utilizando areia siliciosa como agregado, embora na estação arqueológica de Tróia as argamassas, junto ao estuário de onde é proveniente uma das amostras, fosse utilizado agregado dolomítico. Nas argamassas de Conímbriga, verificou-se similitude de granulometria do resíduo da dissolução ácida, composto por cerâmico moído e agregado silicioso, sugerindo a utilização de matéria-prima cerâmica do mesmo tipo e do mesmo processo de moagem. Apenas em dois casos, na Barragem do Álamo e no criptopórtico do Museu Machado de Castro é possível que tenham sido utilizadas pozolanas naturais na produção das argamassas. A presença de sais solúveis foi detectada em variadas amostras de Conímbriga e de Tróia.

A resistência mecânica das argamassas Romanas revelou-se variável, mesmo dentro da mesma estação arqueológica e em amostragens próximas. De uma forma geral, as argamassas provenientes de Tróia revelaram resistência à compressão mais elevada, assim como algumas amostras de Conímbriga. A absorção capilar foi sempre reduzida e as argamassas demonstraram ter uma secagem rápida.

A existência de produtos de reacção pozolânica nas argamassas foi verificada fundamentalmente através de análise térmica, embora a DRX tenha fornecido composições mineralógicas compreendendo possíveis produtos desta reacção. Para as argamassas Romanas, exceptuando as de cal foram obtidos rácios da percentagem de CO_2 sobre a percentagem de H_2O (retiradas das análises térmicas) abaixo de 5, indicativas de uma possível reacção pozolânica.

As análises por MEV e microscopia óptica demonstraram que estas argamassas possuem estruturas de calcite que re-cristalizou, preenchendo porosidades, fissuras e discontinuidades entre partículas cerâmicas e a matriz [282]. É possível que em muitos casos, a calcite tenha substituído os silicatos de cálcio hidratados, contribuindo para a manutenção das argamassas em

boas condições. Este fenómeno contribui também para o aumento da resistência mecânica e diminuição da capilaridade das argamassas.

As argamassas provenientes dos Açores caracterizam-se por uma composição rica em feldspatos e contendo frequentemente piroxenas, devido ao agregado utilizado localmente, de origem vulcânica. A composição difere ligeiramente entre as argamassas retiradas em Ponta Delgada e as retiradas nas Furnas, devido novamente às diferenças de matéria-prima. Como ligante foi utilizada cal aérea, por vezes contendo magnesite para além da calcite, dependendo da origem do produto, que era comprado a outras ilhas ou ao continente. A quantidade de ligante utilizada revelou-se bastante baixa, exceptuando o caso de algumas amostras retiradas de fortificações. Em algumas argamassas de Ponta Delgada foi encontrada halite, presença provável devido à localização das zonas de amostragem.

A resistência à compressão das argamassas dos Açores revelou-se bastante baixa, com apenas algumas amostras retiradas dos Fortes a atingirem valores mais elevados. Paradoxalmente, o rácio do teor em CO₂ sobre o teor em H₂O classificou estas argamassas como contendo produtos derivados da reacção pozolânica. De facto, as argamassas açorianas contêm muito maior quantidade de materiais de origem vulcânica do que de cal, dando origem a esta classificação devido à composição dos produtos naturais; o baixo teor em cal poderá ter sido o factor limitativo para a falta de resistência e terá impedido a existência de uma significativa reacção pozolânica. A variabilidade dos materiais encontrados nos Açores [26, 35, 184243] com diferentes características e reactividade poderá também proporcionar argamassas de resistência variável, como referido em [35].

Nas argamassas provenientes dos Açores foram verificados os mais elevados coeficientes de capilaridade e os maiores valores de absorção máxima às 24h, sendo notória a elevada porosidade de algumas argamassas.

As argamassas do Convento de Santa Cruz são curiosas no sentido em que foram ambas elaboradas com cerâmico moído fino, mas foram efectuadas de forma a desempenhar diferentes funções (reboco, junta) e dotadas das características necessárias para tal.

- Caracterização de materiais pozolânicos

Os materiais pozolânicos, embora tenham como elementos constituintes principais, silicatos e aluminatos, possuem características tais como a finura, a superfície específica e o teor em material amorfo, que induzem diferentes reactividade com o hidróxido de cálcio, na presença da água. Nesta reacção pozolânica, são produzidos fundamentalmente silicatos de cálcio hidratados, aluminatos de cálcio hidratados e silico-aluminatos de cálcio hidratados. Contudo, dependendo do

material pozolânico utilizado, assim se formarão diferentes compostos. Outros factores como a quantidade de água, a temperatura e a humidade ambientes têm influência tanto na velocidade das reacções como, muito provavelmente, nas quantidades e estequiometria dos produtos finais.

Foi efectuado um levantamento dos materiais pozolânicos existentes e foi verificada a utilização de diversos materiais com estas características em argamassas, desde a antiguidade.

Foram estudados materiais pozolânicos naturais e artificiais; nesta última categoria englobam-se materiais provenientes de resíduos e materiais produzidos a partir da argila e caulinite. Os materiais escolhidos são comercializados em Portugal ou podem ser produzidos com materiais nacionais. Foram caracterizados os seguintes materiais: Pozolana de Santo Antão, Cabo Verde; Pozolana de S. Miguel, Açores; Metacaulino Industrial; Metacaulino produzido a partir do caulino de Alvarães; Argila cozida a uma temperatura estudada; Cinzas Volantes; Resíduo da produção de argila expandida; Cinzas da produção de papel.

Através de análises granulométricas, químicas, mineralógicas e de determinação da superfície específica, confirmou-se a potencialidade pozolânica da totalidade dos materiais, com excepção das cinzas provenientes dos resíduos da indústria de papel. A quantidade elevada de conteúdo em silicatos e aluminatos e uma elevada superfície específica são características transversais aos materiais escolhidos para utilização em argamassas com base em cal aérea. Entre eles, os com maior teor em material amorfo, revelado pela DRX são os metacaulinos, potencialmente mais reactivos. Por outro lado, o material com menor percentagem de material amorfo é a argila cozida.

Foram efectuados ensaios de reactividade com o hidróxido de cálcio, utilizando materiais em pasta e ensaios mecânicos e também ensaios baseados na combinação do hidróxido de cálcio de soluções saturadas com as pozolanas. Deste ensaios surgiram resultados bastante diferentes, justificáveis pelos diferentes pressupostos utilizados em alguns ensaios (combinação imediata no ensaio de condutividade) e pelas diferentes metodologias (argamassa versus pasta de cal e pozolana) e/ou condicionamentos utilizados (imersão em água versus elevada humidade relativa e utilização de diferentes temperaturas). De facto, a lentidão da reacção pozolânica é pouco compatível com ensaios que necessitam de uma resposta rápida, não sendo traduzida a reactividade a longo prazo dos materiais. Neste campo, é importante desenvolver um ensaio de reactividade pozolânica, talvez a dois tempos, caracterizando a reactividade a 8 ou 15 dias de material pozolânico em solução saturada de hidróxido de cálcio (sem ser necessário recorrer à utilização de cimento) para verificar a reactividade inicial e, possivelmente, a um ensaio mais demorado, com cerca de 90 dias, caracterizando a reacção a longo prazo, baseado na manutenção de pastas de cal e pozolana em condições favoráveis à reacção como uma elevada temperatura e uma elevada humidade relativa.

A visualização ao MEV permitiu verificar o desenvolvimento da reacção pozolânica. Contudo, uma visualização de forma mais contínua de pastas de cal com as diversas pozolanas fornecerá mais informações sobre o desenvolvimento desta reacção no tempo, para cada material.

- Influência da adição de materiais pozolânicos a argamassas de cal aérea

Foram efectuados ensaios preliminares com as pozolanas naturais para verificar a pertinência de um estudo sobre a utilização destes materiais em argamassas de cal. Após os resultados iniciais, foram efectuados novos ensaios, com uma das pozolanas naturais - a Pozolana de Cabo Verde - utilizando diferentes composições e condicionamentos para avaliar a influência destes parâmetros nas características das argamassas. Verificou-se fundamentalmente a possibilidade da reacção pozolânica no desenvolvimento de resistência das argamassas. Ensaios efectuados a longo prazo com estas argamassas revelaram uma convergência de valores de resistência à flexão e compressão para valores próximos de argamassas de cal aérea após 3 anos, embora argamassas com maior quantidade de ligante ou inicialmente condicionadas debaixo de água não sigam esta tendência e desenvolvam resistências superiores.

Em seguida, e após a análise dos diversos materiais pozolânicos e de diferentes condições de cura, foram efectuadas argamassas com as diversas pozolanas naturais e artificiais, que foram ensaiadas de forma a verificar o seu comportamento mecânico e o seu comportamento face à água. Foi também verificada a sua susceptibilidade à fissuração e a sua durabilidade.

Estas argamassas revelaram aumento da resistência mecânica quando foram utilizados os materiais Pozolana de Cabo Verde, Fragmentos de Tijolo, Cinzas Volantes e Resíduo de Argila Expandida. O comportamento destas argamassas face à água, medido pelos ensaios de capilaridade, permeabilidade ao vapor de água e capacidade de impermeabilização classifica-as como permeáveis ao vapor e de secagem rápida. As argamassas com estes materiais têm baixa susceptibilidade à fissuração.

A argamassa com Pó de Tijolo tem um comportamento particular, apresentando um excelente comportamento à água e baixa susceptibilidade à fissuração mas também baixa resistência mecânica. Também a argamassa com Pozolana dos Açores apresenta baixa resistência mecânica e tem um comportamento adequado face à água.

Para as argamassas com metacaulino não foi utilizada quantidade suficiente deste material, criando argamassas com uma estrutura capilar diferenciada e mais frágeis. Provavelmente, a reacção pozolânica não foi suficientemente extensa para criar uma aglomeração da pasta com o agregado. Encontram-se em execução ensaios com o traço em volume 1:1:4, similar às restantes composições estudadas, e tendo em consideração que a reacção se dá até à utilização completa

do hidróxido de cálcio com a proporção em peso 1:1 (cal: metacaulino) [107, 108]. As aplicações experimentais realizadas *in situ* apontam também para a adequabilidade da composição 1:1:4. É no entanto importante mencionar que os resultados obtidos alertam para a importância de estudos prévios à aplicação de argamassas. Não é linear que a adição de qualquer quantidade de material pozolânico seja benéfica para o funcionamento das argamassas; a adição de materiais pozolânicos pode, como neste caso, minorar a resistência mecânica.

Foi verificada uma maior durabilidade das argamassas com pozolanas (exceptuando as argamassas com metacaulino), derivada dos resultados de envelhecimento artificial acelerado e resistência aos sais.

- Compatibilidade das argamassas estudadas com suportes antigos

Foi verificada a compatibilidade das argamassas com suportes antigos de pedra irregular através da análise comparativa com requisitos estabelecidos por Veiga [227]. Conclui-se que todas as argamassas ensaiadas, exceptuando CMCI10, cumpriram os requisitos mecânicos para utilização como argamassas de reboco em paredes antigas. Adicionalmente, as argamassas com Cinzas Volantes e Resíduos de Argila Expandida cumpriram os requisitos estabelecidos para utilização em juntas de paredes antigas.

Analisando o comportamento à água, verificou-se novamente o não cumprimento dos requisitos por parte de CMCI10. Para as restantes argamassas os coeficientes de capilaridade obtidos não se enquadraram dentro dos valores estabelecidos, mas verificou-se que a absorção de água às 24h era menor do que a absorção da argamassa de cal aérea (exceptuando as argamassas com Fragmentos de Tijolo). A secagem destas argamassas após ensaio de capilaridade também se revelou rápida. Poucas argamassas (CPT, CMCI10 e C) cumpriram os requisitos estabelecidos para o humidímetro, mas tiveram secagens rápidas, muito inferiores às observadas em argamassas de cal aérea com adição de cimento ou em argamassas de cimento [231].

As aplicações efectuadas em ambiente exterior, quer em muretes na estação de ensaio natural do LNEC/LERevPa, quer em obra revelaram um bom comportamento inicial e as com mais tempo tiveram um envelhecimento sem degradação acentuada.

Estes resultados revelam a adequabilidade destas argamassas, à excepção das argamassas com metacaulino nas proporções estudadas em laboratório, para utilização como argamassas de reboco em paredes antigas. No entanto, as argamassas com maiores dosagens de metacaulino aplicadas experimentalmente em obra apontam já para um bom comportamento.

As argamassas CCV e CRAE são especialmente adequadas para refechamento de juntas, dada a sua maior dificuldade de secagem e a sua resistência mecânica mais elevada.

- Compatibilidade das argamassas estudadas com argamassas antigas e suportes de adobe

Necessidades actuais e pertinentes são o preenchimento de lacunas de argamassa em paredes assim como o revestimento de paramentos com necessidades delicadas como as paredes de adobe, sendo para tal necessária a utilização de argamassas compatíveis [156, 157,,218].

Utilizando os dados fornecidos pelas argamassas antigas, verifica-se que a maioria das argamassas, com excepção das argamassas com metacaulino, está apta para desempenhar este papel. A argamassa deve ser escolhida em função das características da argamassa original.

Para as argamassas de S. Miguel, é possível utilizar a argamassa com Pozolana dos Açores desenvolvida neste estudo, com baixa resistência e um bom comportamento à água, e para as argamassas de Conímbriga as argamassas desenvolvidas para o efeito, dadas as suas características de baixa resistência, elevada ductilidade e rápida secagem. Cuidados especiais devem ser tomados para evitar a secagem rápida destas argamassas, através de molhagem após aplicação, contribuindo para a sua durabilidade.

No caso do revestimento de paredes de adobe, material com baixa resistência mecânica e susceptível à deterioração pela água, será adequada a utilização da argamassa com Pó de Tijolo dada o seu tempo de molhagem mais longo, a sua rápida secagem e a sua baixa resistência mecânica.

7.2 Desenvolvimentos futuros

- Será importante aprofundar o conhecimento dos materiais pozolânicos, estudando outros materiais disponíveis tais como cinzas de casca de arroz, terra diatomácea, e resíduos com propriedades pozolânicas (por exemplo, vidro moído)

- Em particular, o material metacaulino merece um estudo mais aprofundado, devido à sua potencialidade como material pozolânico e à possibilidade de produção deste material em território nacional

- A evolução da reacção pozolânica no tempo, conhecida para alguns destes materiais, como as cinzas volantes, não é análoga nos outros materiais, tanto em termos de velocidade de reacção como em termos de produtos e necessita de monitorização para permitir o seu conhecimento

- A inexistência, verificada neste estudo, de um ensaio que permita a classificação adequada de materiais pozolânicos sugere a sua necessidade
- A influência das condições de cura no comportamento das argamassas de cal com pozolanas, apesar de abordada neste trabalho, merece um maior aprofundamento, para estabelecer recomendações para aplicação em obra em que se optimize o aproveitamento das propriedades pozolânicas
- Por último, o estudo de argamassas de cal aérea com pozolanas para aplicação em edifícios novos é um desafio face ao contributo ambiental obtido pela utilização da cal e de alguns destes materiais em detrimento do cimento

8 Referências Bibliográficas

- [1] Adam, J.P. - La Construction Romaine, Matériaux et Techniques, J. Picard, Collection Grands Manuels Picard, Paris, 1989
- [2] Adams, J.; Dollimore, D.; Griffiths, D.L. - Thermal analytical investigation of unaltered Ca(OH)₂ in dated mortars and plasters, *Thermochimica Acta*, 324, 1998, p. 67-76,
- [3] Aguilera, J.; Martínez-Ramírez, S.; Pajares-Colomo, J.; Blanco-Varela, M.T. - Formation of thaumasite in carbonated mortars, *Cement and Concrete Composites*, 25, 2003, p.991-996,
- [4] Alberti, L. B. - *De re aedificatoria*, The Ten Books of Architecture . The 1755 Leoni Edition, Dover Publications, Canada, 1986
- [5] Al-Kass, R.; Hadi, M.; Khalil, N.; Ali, F. - Ancient Babylonian bricks. Their Technological Characterization and Simulation, *Structural Repair and Maintenance of Historical Buildings*
- [6] Alvarez, J.I.; Martín, A; Casado, P.J. García; Navarro, I.; Zornoza, A. - Methodology and validation of a hot hydrochloric acid attack for the characterization of ancient mortars, *Cement and Concrete Research*, 29, 1999, p. 1061-1065
- [7] Antiohos, S.; Tsimas, S. - Investigating the role of reactive silica in the hydration mechanisms of high-calcium fly ash/cement systems, *Cement and Concrete Composites*, 27, 2005, p 171-181
- [8] Arezki Tagnit-Hamou, A.; Petrov, N.; Luke, K.- Properties of Concrete Containing Diatomaceous Earth, *ACI Materials Journal*, January / February 2003
- [9] Ashall, G.; Butlin, R.; Teutonico, J.M.; Martin, M.- Development of lime mortar formulations for use in historic buildings. A report on the Smeaton Project, a Joint Research Programme of English Heritage, ICCROM, Bournemouth University and the BRE, *Durability of Building Materials and Components 7*, 7th International Conference of Building Materials and Components, Stockholm, Sweden, E & FN Spon, London, 19-23 May 1996, p.352-360,
- [10] ASTM C 109/C 109M-02 - Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars
- [11] ASTM C 110-02 - Standard Test Methods for Physical Testing of Quicklime, Hydrated Lime and Limestone
- [12] ASTM C 311-04 - Standard Test Methods for Sampling and Testing Fly Ash or Natural Pozzolans for Use in Portland-Cement Concrete
- [13] ASTM C 593-95 (Reapproved 2000) - Standard Specification for Fly Ash and Other Pozzolans for Use with Lime

- [14] ASTM C 618-01 - Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Concrete
- [15] ASTM C 778-00 - Standard Specification for Standard Sand
- [16] ASTM C305-99 - Standard Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency
- [17] Badogiannis, E.; Kakali, G.; Dimopoulou, G.; Chaniotakis, E.; Tsvivilis, S.- Metakaolin as a main cement constituent. Exploitation of poor Greek kaolins., *Cement and Concrete Composites*, 27, 2005, p. 197-203
- [18] Bakolas, A.; Biscontin, G.; Moropoulou, A.; Zendri, E. - Characterization of structural byzantine mortars by thermogravimetric analysis, *Thermochimica Acta*, 132, 1998, p. 151-160
- [19] Bentz, D.P.; Jensen, O.M.; Coats, A.M.; Glasser, F.P., Influence of silica fume on diffusivity in cement-based materials I, Experimental and computer modelling studies on cement pastes, *Cement and Concrete Research*, 30, 2000, p 935-962
- [20] Biermann, V.; Grönert, A.; Jobst, C.; Stewering, R.; Freigang, C.; Kremeier, J.; Klein, B.B.; Ruhl, C.; Evers, B.; Zimmer, J.; Lupfer, G.; Jürgen, P.; Sigel, P.- *Teoria da Arquitectura do Renascimento aos nossos dias*, Taschen, Colónia, 2003
- [21] Biernacki, J.; Williams, P.J.; Stutzman, P.E. - Kinetics of Reaction of Calcium Hydroxide and Fly Ash, *ACI Materials Journal*, Vol.98, No.4, 2001, July-August, 340-349
- [22] Biricik, H.; Aköz, F.; Berktaş, I.; Tulgar, A. N.- Study of pozzolanic properties of wheat straw ash, *Cement and Concrete Research*, 29, 1998, p.637-643,
- [23] Birnin-Yauri, U.A. Glasser, F.P.- Friedel's salt, $\text{Ca}_2\text{Al}(\text{OH})_6(\text{Cl},\text{OH})\cdot 2\text{H}_2\text{O}$: its solid solutions and their role in chloride binding, *Cement and Concrete Research*, 28, n.12, 1998, p. 1713-1723
- [24] Biscontin, G.; Birelli, M.; Zendri, E. - Characterization of binders employed in the manufacture of Venetian historical mortars, *Journal of Cultural Heritage*, 3, 2002, p. 31-37
- [25] Bonazza, A.; Sabbioni, C.; Sardella, A.; Favoni, O.; Rendini, P.; Sabelli, R.- Compatibility of repair mortars at the Archaeological site of Villa Domizia on Giannutri Island, Italy, *RILEM Workshop Repair Mortars for Historic Masonry*, Delft, January 2005
- [26] Booth, B.; Croasdale, R.; Walker, G.P.L. - A quantitative study of five thousand years of volcanism on São Miguel, Azores, *Philosophical Transactions of The Royal Society of London. A. Mathematical and Physical Sciences*. Vol 288, London, 1978, 23 March, p. 271-319
- [27] Bosilikov, V. B.; Valek, J. - A comparative study of mechanical and physical characteristics of mortars prepared using lime putties, sand and metakaolin from different sources, *RILEM Workshop Repair Mortars for Historic Masonry*, Delft, January 2005
- [28] Boynton, R. S.- *Chemistry and technology of lime and limestone*, John Wiley and Sons, 1980

- [29] Brunauer, S.; Kantro, D.L. - The hydration of Tricalcium Silicate and beta-Dicalcium Silicate from 5°C to 50°C , The chemistry of cements , Academic Press, 1972
- [30] Bruni, S.; Cariati, F.; Fermo, P.; Pozzi, A.; Toniolo, L. - Characterization of ancient magnesian mortars coming from northern Italy, *Thermochimica Acta*, 321, 1998, p.161-165
- [31] Bruno, P.- Taipa militar em Portugal - Fortificações do período de domínio muçulmano, SIACOT, Outubro 2005
- [32] Callebaut, K.; Elsen, J.; Van balen, K.; Viaene, W.- Historical and scientific study of hydraulic mortars from the 19th Century, PRO 12, *Historic Mortars: Characteristics and Tests*, Proceedings of the International RILEM Workshop, RILEM Publications S.A.R.L., Cachan Cedex, France, 1999, p. 125-132
- [33] Callebaut, K.; Elsen, J.; Van Balen, K.; Viaene, W.- Nineteenth century hydraulic restoration mortars in the Saint Michael's Church (Leuven, Belgium) Natural hydraulic lime or cement?, *Cement and Concrete Research*, 31, 2001, p. 397-403,
- [34] Camões, A. - Betões de elevado desempenho com incorporação de cinzas volantes, Universidade do Minho, Tese de Doutoramento, 2002
- [35] Castanheira das Neves - Subsídios para o estudo das pozolanas e sua aplicação nas construções, LNEC, Lisboa, Portugal, 1906
- [36] CEN, EN 13139 - Aggregates for mortar, 2002
- [37] CEN, EN 1015-3 - Methods of test for mortar for masonry - Part 3: Determination of consistence of fresh mortar (by flow table), 1998
- [38] CEN, EN 1015-11- Methods of test for mortar for masonry - Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar, 1999
- [39] CEN, EN 1015-18 - Methods of test for mortar for masonry - Part 18: Determination of water absorption coefficient due to capillary action of hardened rendering mortar, 1999
- [40] CEN, EN 1015-19 -Methods of test for mortar for masonry - Part 19: Determination of water vapour permeability of hardened rendering and plastering mortars, 1998
- [41] CEN, EN 1015-21 -Methods of test for mortar for masonry - Part 21: Determination of the compatibility of one-coat rendering mortars with substrates, 2002
- [42] CEN, EN 1015-12 - Methods of test for mortar for masonry - Part 12: Determination of adhesive strength of hardened rendering and plastering mortars on substrates, 1996
- [43] CEN , EN 1015-6 - Methods of test for mortar for masonry - Part 6: Determination of bulk density of fresh mortar, 1998
- [44] Chagas, A.T. - O Castelo de Alcácer do Sal e a utilização de taipa militar durante o domínio almóada, Tese de Mestrado pela Universidade de Évora, 1993
- [45] Charola, A. E.; Henriques, F.M.A. - Hidraulicity in lime mortars revisited, PRO 12, *Historic Mortars: Characteristics and Tests*, Proceedings of the International RILEM Workshop, RILEM Publications S.A.R.L., Cachan Cedex, France, 1999, p. 95-104

- [46] Charola, A. E.; Rodrigues, P.F.; McGhie, A.R.; Henriques, F. - Pozzolanitic components in lime mortars: correlating behaviour, composition and microstructure, 6th International Symposium on the Conservation of Monuments in the Mediterranean Basin, 1997
- [47] Chen, G.; Lee, H.; Young, K.L.; Yue, P.L.; Wong, A.; Tao, T.; Choi, K.K. - Glass recycling in cement production - an innovative approach, *Waste Management*, Vol. 22, Issue 7, 2002, p. 747-753
- [48] Chen, J.; Thomas, J.; Taylor, H. F. W.; Jennings, Hamlin M. - Solubility and structure of calcium silicate hydrate, *Cement and Concrete Research*, 34, 2004, p. 1499-1519
- [49] Cleto, J. - Porto de Leixões, Administração dos Portos do Douro e Leixões, 1998
- [50] Colella, C.; Gennaro, M.; Aiello, R. - Use of Zeolitic Tuff in the Building Industry, *Reviews in Mineralogy & Chemistry*, 45 em Natural zeolites: occurrence, properties, applications, D.L. Bish; D.W. Ming, The Mineralogical Society of America, 2001, p. 551-587
- [51] Cortina, M. G.; Dominguez, V. - Granulometry and burning temperature influence on clays used as hydraulic additions to air-dried lime and chamotte mortars, *Proceedings of the Sixth International Masonry Conference*, 2002
- [52] Coutinho, A. S. - *Fabrico e Propriedades do Betão*, LNEC, Lisboa, 1994
- [53] Coutinho, A. S. - *Pozolanas, betões com pozolanas e cimentos pozolânicos*, LNEC, Lisboa, 1958
- [54] CSTB - Certification CSTB des enduits monocouches d'imperméabilisation. Modalités d'essais. Cahier 2669-4 CSTB, Cahiers du CSTB, 341, Paris, Juillet-Août 1993
- [55] Dave, N.G.; Malhorta, S.K. - Chemical composition of mortars from the Ganga canal system, *Cement and Concrete Research*, 14, Is. 4, 1992, p. 235-238
- [56] Davidovits, F. - *Les Mortiers de pouzzolanes artificielles chez Vitruve. Evolution et historique architecturale*. Thèse de D.E.A., Université Paris X-Nanterre., Geopolymer Institute, Saint-Quentin, France, 1995
- [57] Degryse, P., Elsen, J., Waelkens, M. - Study of ancient mortars from Sagalassos (Turkey) in view of their conservation, *Cement and Concrete Research*, 32, 2002, p.1457-1463
- [58] Dyer, T.D.; Dhir, R.K. - Hydration of cement combinations containing vitrified incinerator fly ash, *Cement and Concrete Research*, 34, 2004, p.849-856
- [59] El-Didamony, H.; Shoab, M.M.; Heikal, M. - Homra pozzolanitic cement, *Silicates Industriels*, Belgian Ceramic Research Centre, Vol 65, 3-4, 2000, p. 39-43
- [60] Elinwa, A. U.; Mahmood, Y. A. - Ash from timber waste as cement replacement material, *Cement and Concrete Composites*, 24, 2002, p.219-222
- [61] Ellis, P.R.- Analysis of mortars (to include historic mortars) by Differential Thermal Analysis, PRO 12, *Historic Mortars: Characteristics and Tests*, Proceedings of the International RILEM Workshop, RILEM Publications S.A.R.L., Cachan Cedex, France, 1999

- [62] Ersen, A.; Karagüler, M.; Güleç, A. - Possible substitutes for Khorasan mortars in Byzantine and Ottoman monuments, *Methods of evaluating products for the conservation of porous building materials in monuments*, ICCROM, Roma, 1995, p.15-27
- [63] Farci, A.; Floris, D.; Meloni, P. - Water permeability vs. Porosity in samples of Roman mortars, *Journal of Cultural Heritage*, 6, 2005, p. 55-59
- [64] Fe Pa 40.1- Revestimentos de paredes. Ensaio de absorção de água por capilaridade para amostras irregulares e friáveis, MOPTC, LNEC, NRI, Abril 2005
- [65] Ferraz, E.J. - Caulinos de Alvarães: propriedades e aplicações cerâmicas, Dissertação apresentada na Universidade de Aveiro para obtenção do grau de Doutor em Geociências, 2004
- [66] Frías, M.; Cabrera, J. - Influence of MK on reaction kinetics in MK/lime and MK-blended cement systems at 20°C, 31, 2001, p. 519-527
- [67] Gallego, M. R. - Métodos Térmicos, Cuadernos Técnicos, Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico, Sevilla, n. 2, 1996, p. 43-45
- [68] Ghedini, N.; Sabbioni, C; Pantani, M. - Thermal analysis in cultural heritage safeguard: na application, *Thermochimica Acta*, 2003, p. 105-113
- [69] Gleize, P.J.P; Müller,A.; Roman, H.R. - Microstructural investigation of a silica fume-cement-lime mortar, *Cement and Concrete Composites*, 25, 2003, p.171-175
- [70] Goins, E. - A New Protocol for the Analysis of Historic Cementitious Materials, PRO 12, *Historic Mortars: Characteristics and Tests*, Proceedings of the International RILEM Workshop, RILEM Publications S.A.R.L., Cachan Cedex, France, 1999, p. 71-79
- [71] Gomes, C. F. - Argilas. O que são e para que servem, Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, Portugal, 1986
- [72] Gomes, C. F. ; Velho, J.A.G. L. - Kaolin Deposits of Portugal, *Geociências, Revista da Universidade de Aveiro*, Aveiro, Portugal, Volume 5, Fascículo 2, 1990, p. 27-36
- [73] Gonçalves, T.D.- Capacidade de impermeabilização de revestimentos de paredes com base em ligantes minerais. Desenvolvimento de um método de ensaio baseado na resistência eléctrica, LNEC, 1998
- [74] Goñi, S.; Guerrero, A.; Luxán, M.P.; Macías, A.- Activation of fly ash pozzolanic reaction by hydrothermal treatment, *Cement and Concrete Research*, 33, 2003, p.1399-1405
- [75] Gualtieri, A. F.; Viani, A., Montanari, C. - Quantitative phase analysis of hydraulic limes using the Rietveld method, *Cement and Concrete Research*, 2005
- [76] Hakateyama, T.; Quinn, F.X. - *Thermal Analysis. Fundamentals and Applications to Polymer Science*, John Wiley and Sons, 1994
- [77] Hakateyama, T.; Zhenhai, L. - *Handbook of Thermal Analysis*, John Wiley and Sons, 1998
- [78] He, C.; Osbaeck, B.; Makovicky, E. - Pozzolanic Reaction of six principal clay minerals: Activation, reactivity assessments and technological effects, *Cement and Concrete*

Research, Vol. 25, Is.8, Dec. 1995, p.1691-1702

- [79] He, C.; Osbaeck, B.; Makovicky, E. - Pozzolanic reactions of six principal clay minerals: activation, reactivity assessments and technological effects, *Cement and Concrete Research*, 25, n.8, 1995, p.1691-1702
- [80] Hees, R.P.J.; Nijland, T.G.; Larbi, J.A.; Wijffels, T.J.; Brocken, H. - Historic trass-lime mortars with expansive reactions. Characterisation and repair strategies, RILEM Workshop Repair Mortars for Historic Masonry, Delft, January 2005
- [81] Heikal, M. - Effect of temperature on the physico-mechanical and mineralogical properties of Homra pozzolanic cement pastes, *Cement and Concrete Research*, 30, 2000, p.1835-1839
- [82] Helmuth, R. - Fly Ash in Cement and Concrete, Portland Cement Association, 1987, pp.203, *citado por* Biernacki, J.; Williams, P.J.; Stutzman, P.E., Kinetics of Calcium Hydroxide and Fly Ash, *ACI Materials Journal*, 98, n. 4, July-August 2001
- [83] Helmuth, R. - Fly ashes in cement and concrete, Portland Cement Association, Skokie, Illinois, 1987, *citado por* Shi., C., Studies of several factors affecting hydration and properties of lime-pozzolan cements, *Journal of Materials in Civil Engineering*, November, December 2001
- [84] Helmuth, R. - Some questions concerning ASTM standards and methods of testing fly ash for use with portland cement, *Cement and Concrete Aggregates*, 5(2), 1983, pp. 103-110, *citado por* Shi., C., Studies of several factors affecting hydration and properties of lime-pozzolan cements, *Journal of Materials in Civil Engineering*, November, December 2001
- [85] Henriques, F., Vilhena, A. - Caracterização de argamassas de reboco para edifícios antigos, Proc.º 083/531/381. Relatório 254/95 - NCCt, LNEC, Lisboa, Portugal, Setembro 1995
- [86] Hernandez, J., Martirena; F., Middendorf, B; Gehrke, M.; Budelmann, H. - Use of wastes of the sugar industry as pozzolana in lime-pozzolana binders: study of the reaction, *Cement and Concrete Research*, 28, n.11, 1998, p. 1525-1536
- [87] Holm, P.M., Wilson, J.R., Christensen, B.P., Hansen, L., Hansen, K., Hein, K.M., Mortensen, A.K., Pedersen, R., Plesner, S., Runge, M.K. - Sampling the Cape Verde Mantle Plume: Evolution of Melt Compositions on Santo Antão, Cape Verde Islands, *Journal of Petrology*, Oxford University Press, 47, n.1, 2006, p. 145 -189
- [88] Holmes, M.; Wingate, H. - Building with Lime. A practical Introduction, Intermediate Technology Publications, London, UK, 1997
- [89] Huertas, M. Ortega; Torre, M. J. - La microscopia electrónica de barrido. Aplicaciones en el estudio y conservación del patrimonio histórico, Cuadernos Técnicos, Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico, Sevilla, 2, 1996, p. 25-33

- [90] Humphries, D.W. - The Preparation of Thin Sections of Rocks, Minerals and Ceramics, Oxford Science Publications, New York, 1992
- [91] Iler, A. K. - The chemistry of silica. Solubility, Polymerization, Colloid and Surface Properties and Biochemistry., John Wiley and Sons, 1979
- [92] Ilic, M.; Cheeseman, C.; Sollars, C.; Knight, J. - Mineralogy and microstructure of sintered lignite coal fly ash, Fuel, 82, 2003, p. 331-336
- [93] Illston, J.M. - Construction Materials, their nature and behaviour, E&FN SPON, London, 1996
- [94] Ingo, G.M.; Fragalà, I.; Bultrini, G.; Caro, T.; Riccucci, C.; Chiozzini, G. - Thermal and microchemical investigation of Phoenician-Punic mortars used for lining cisterns at Tharros (western Sardinia, Italy), Thermochimica Acta, 418, 2004, p. 53-60
- [95] IPQ, NP EN 196-2 - Métodos de ensaio de cimentos. Parte 2: análise química dos cimentos, 1996
- [96] IPQ, NP 4220 - Pozolanas para betão. Definições, especificações CT-104 e verificação da conformidade, 1993
- [97] IPQ, NP EN 196-5 - Métodos de ensaio de cimentos. Parte 5: Ensaio de pozolanicidade dos cimentos pozolânicos, 1996
- [98] IPQ, NP EN 459-1 - Cal de construção. Parte 1: Definições, especificações e critérios de conformidade, 2002
- [99] IPQ, NP EN 197-1 - Cimento. Parte 1: Definições, especificações e critérios de conformidade para cimentos correntes, 2001
- [100] Jackson, P.J., Portland Cement - Classification and manufacture., Lea's Chemistry of Cement and Concrete, Arnold, 1998
- [101] Jalali, S. - A study of factors affecting the mechanical behaviour of lime fly-ash mixtures, Thesis submitted in partial fulfilment of the requirements of the Council for National Academic Awards for the degree of Ph.D., 1991
- [102] James, J.; Rao, M. S. - Reactivity of Rice Husk Ash, Cement and Concrete Research, 16, 1986, p. 296-302
- [103] James, J.; Rao, M. S. - Reaction Product of Lime and Silica from Rice Husk Ash, Cement and Concrete Research, 16, 1986, p. 67-73
- [104] Jędrzejewska, H., Old Mortars in Poland: A New Method of Investigation, Studies in Conservation, 5, n.4, 1960, p. 132-138
- [105] Kakali, G.; Perraki, T.; Tsvilis, S.; Badogiannis, E. - Thermal treatment of kaolin: the effect of mineralogy on the pozzolanic activity, Applied Clay Science, 20, 2001, p. 73-80
- [106] Keeling, P.S. - The Geology and Mineralogy of Brick Clays, Brick Development Association Limited, Nottingham, England, 1963

- [107] Kokko, P.; Pentti, M. - A new freeze-thaw test method for mortars used in nordic climate, RILEM Workshop Repair Mortars for Historic Masonry, Delft, January 2005
- [108] Koliás, E. - The building materials of the monuments of the medieval city of Rhodes and the compatibility problems with maintenance, *Compatible Materials for the protection of European Cultural Heritage*, Athens, 1998
- [109] Kostuch, J.A., Walters, V., Jones, T.R. - High performance concretes incorporating metakaolin: a review, Dhir, R.K., Jones, M.R. (Eds.), *Concrete 2000, Economic and Durable Construction through Excellence*. E&FN SPON, London, 2000, p. 1799-1811, *citado por* Kakali, G.; Perraki, T.; Tsvilis, S.; Badogiannis, E., Thermal treatment of kaolin: the effect of mineralogy on the pozzolanic activity, *Applied Clay Science*, 20, 2000, p. 1799-1811
- [110] Lanás, J.; Sirera, R.; Alvarez, J.J. - Compositional changes in lime-based mortars exposed to different environments, *Thermochimica Acta*, 2005, p. 219-226
- [111] Larbi, J.A - Microscopy applied to the diagnosis of the deterioration of brick masonry, *Construction and Building Materials*, 18, 2004, p. 299-307
- [112] Largent, R.- Estimation d l'activité pouzzolanique, *Bull. Liasons Lab, Pont Chaussees*, 1993, , pg 61-65, *citado por* Kakali, G.; Perraki, T.; Tsvilis, S.; Badogiannis, E., Thermal treatment of kaolin: the effect of mineralogy on the pozzolanic activity, *Applied Clay Science*, 20, 2000, p. 1799-1811
- [113] Lawry, J.; Ray, A.; Klimesch, D.; Thomas, P.; Guerbois, J.P.; Harrison, J. - Thermal characterization of Portland Cement-Magnesia blends, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 80, 2005, p. 637-641
- [114] Lea, F.M. - The chemistry of pozzolanas, *Symposium on the chemistry of cements*, Stockholm, 1938, *citado por* Coutinho, A.S., *Pozolanas, betões com pozolanas e cimentos pozolânicos*, 1958
- [115] Lea, F.M. - *The chemistry of cements and concrete*, Edward Arnold Publishers, Ltd, Glasgow, GB, 1970
- [116] Leitão, L. A. - *Curso Elementar de Construções*, Imprensa Nacional, Lisboa, Portugal, 1896
- [117] Liebig, E.; Althaus, E.- Pozzolanic activity of volcanic tuff and suevite: effects of calcination, *Cement and Concrete Research*, 28, n.4, 1998, p. 567-575
- [118] LNEC - *Revestimentos de ligantes minerais para paredes. Ensaio de susceptibilidade à fendilhação*. Fe Pa 37, LNEC, Lisboa, 1998
- [119] LNEC - *Revestimentos de paredes. Caracterização da capacidade de impermeabilização*. Fe Pa 38, LNEC, Lisboa, 1999
- [120] Lourenço, J.; Ferraz, E.; Coroado, J. - Metodologia para a determinação das vantagens de argamassas sob efeito pozolânico de metacaulinos, 1º Congresso Nacional de Argamassas de Construção, APFAC, Lisboa, 2005

- [121] Lu, P.; Sun, G.; Young, J.F. - Phase composition of hydrated DSP cement pastes, *Journal of the American Ceramic Society*, 76 (1), 1993, p.1003-1007
- [122] Lubelli, B.; van Hees, R.P.J.; Groot, C.J.W.P.- The role of sea salts in the occurrence of different damage mechanisms and decay patterns on brick masonry, *Construction and Building Materials*, 18, 2004, p.119-124
- [123] Lubelli, B.; van Hees, R.P.J.; Huinink, H.P.; Groot, C.J.W.P. - Irreversible dilation of NaCl contaminated lime-cement mortar due to crystallization cycles, *Cement and Concrete Research*, 36, 2006, p. 678-687
- [124] Luxán, M.P.; Dorrego, F. - Ancient XVI century mortar from the Dominican Republic: its characteristics, microstructure and additives, *Cement and Concrete Research*, 26, n.6 , 1996, p.841-849
- [125] Luxan, M.P.; Madruga, F.; Saavedra, J - Rapid evaluation of pozzolanic activity of natural products by conductivity measurement, *Cement and Concrete Research*, 19, 1989, p. 63-68,
- [126] Mackenzie, R.C. - The differential thermal investigation of clays , *Mineralogical Society*, London, 1957
- [127] Maravelaki-Kalaitzaki, P.; Bakolas, A.;Moroupoulou, A. - Physico-chemical study of Cretan ancient mortars, *Cement and Concrete Research*, 33, 2003, p. 651-661
- [128] Margalha, M.G; Veiga, M.R.; Brito, J. - The Time Factor in Lime Quality, 7th International Masonry Conference, London, 2006, aceite para publicação
- [129] Massaza, F.; Costa, U. - Aspects of the pozzolanic activity and properties of pozzolanic cements, *Il Cemento*, 1, 1979, p. 3-17
- [130] Mateos, M; Davidson, D.T. - Physical and mineralogical factors in stabilization of Iowa soils with lime and fly ash; Progress report, Iowa State University, , August 1961 *citado por* Jalali, S. - A study of factors affecting the mechanical behaviour of lime fly-ash mixtures, Thesis submitted in partial fulfilment of the requirements of the Council for National Academic Awards for the degree of Ph.D., 1991
- [131] Mateus, J.M. - Técnicas Tradicionais de Construção de Alvenarias. A literatura técnica de 1750 a 1900 e o seu contributo para a conservação de edifícios históricos, *Livros Horizonte*, Lisboa, Portugal, Novembro 2002
- [132] Maurenbecker, A.H.P.; Trischuk, K.; Subercaseaux, M.I.; Suter, G.T. - Preliminary evaluation of the freeze-thaw resistance of hydraulic lime mortars, *RILEM Workshop Repair Mortars for Historic Masonry*, Delft, January 2005
- [133] McCarter, W.J.; Tran, D. - Monitoring pozzolanic activity by direct activation with calcium hydroxide, *Construction and Building Materials*, 10, n. 3, 1996, p.179-184
- [134] Middendorf, B.; Martirena, J.F.; Gehrke, M.; Day, R.L. - Lime Pozzolan Binders: An Alternative to OPC?, *International Building Lime Symposium* , National Lime Association. Building Lime Group, Orlando, 2005

- [135] Misra, M. K.; Ragland, K. W.; Baker, A. J. - Wood ash composition as a function of furnace temperature, Biomass and bioenergy, Pergamon Press, Great Britain, 1992
- [136] Moropoulou, A.; Bakolas, A.; Aggelakopoulou, E. - Evaluation of pozzolanic activity of natural and artificial pozzolans by thermal analysis, Thermochemica Acta, 420, 2004, p. 135 - 140
- [137] Moropoulou, A.; Bakolas, A.; Anagnostopoulou, S. - Composite materials in ancient structures, Cement and Concrete Composites, 27, 2005, p. 295-300
- [138] Moropoulou, A.; Maravelaki-Kalaitzaki, P.; Borboudakis, M.; Bakolas, A.; Michailidis, P.; Chronopoulos, M. - Historic mortars technologies in Crete and guidelines for compatible restoration mortars, Compatible Materials for the protection of European Cultural Heritage, Athens, 1998
- [139] Moropoulou, A.; Bakolas, A.; Bisbikou, K. - Investigation of the technology of hydraulic mortars, Journal of Cultural Heritage, 1, 2000, p. 45-58
- [140] Moropoulou, A.; Bakolas, A.; Bisbikou, K. - Characterization of ancient, byzantine and later historic mortars by thermal and X-ray diffraction techniques, Thermochemica Acta, 269/270, 1995, p. 779-795
- [141] Moropoulou, A.; Bakolas, A.; Moundoulas, P.; Aggelakopoulou, E. - Reverse Engineering: A proper methodology for compatible restoration mortars, RILEM Workshop Repair Mortars for Historic Masonry, Delft, January 2005
- [142] Moropoulou, A.; Cakmak, A.S.; Biscontin, G. - Criteria and Methodology to Evaluate the Hagia Sophia crushed brick/lime mortars
- [143] Moropoulou, A.; Cakmak, A.; Labropoulos, K.C.; Van Grieken, R.; Torfs, K. - Accelerated microstructural evolution of calcium-silicate-hydrate (C-S-H) phase in pozzolanic pastes using fine siliceous sources: Comparison with historic pozzolanic mortars, Cement and Concrete Research, , 2004, 34, pgs. 1-6,
- [144] Moropoulou, A.; Bakolas, A. - Range of acceptability limits of physical, chemical and mechanical characteristics deriving from the evaluation of historic mortars, Compatible Materials for the protection of European Cultural Heritage, Athens, 1998
- [145] Moropoulou, A.; Bakolas, A. ; Moundoulas, P.; Cakmak, A.S. - Compatible restoration mortars, preparation, and evaluation for Hagia Sophia earthquake protection, Compatible Materials for the protection of European Cultural Heritage, Athens, 1998
- [146] Mostafa, N.Y.; El-Hemaly, S.A.S.; Al-Wakeel, E.I.; El-Korashy, S.A.; Brown, P.W.- Characterization and evaluation of the pozzolanic activity of Egyptian industrial by-products. I: Silica fume and de-aluminated kaolin , Cement and Concrete Research, 31, 2001, p. 457-474
- [147] Neville, A.M. - Properties of Concrete, Addison Wesley Longman Limited, Essex, England, 1995
- [148] NISTIR 5755 - Guide for X-Ray diffraction analysis of Portland Cement and Clinker,

March 1996

- [149] Nonat, A. - The structure and stoichiometry of C-S-H, *Cement and Concrete Research*, 34, 2004, p. 1521-528
- [150] Notícias sobre as pozolanas dos Açores da Casa Commercial Oliveira Machado de Lisboa. Suas propriedades e usos., Lisboa, Portugal, 1867
- [151] Dicionário da Língua Portuguesa, Dicionário da Língua Portuguesa, Porto Editora
- [152] Palma, J. - Aparelho detector de humidade com base na variação da condutibilidade, Relatório 56/93-GEEt, LNEC, Lisboa, 1992
- [153] Papayianni, I.; Stefanidou, M - Characteristics of Bricks of Old Masonries, Proceedings from the Workshop on Materials for Restoration, Thessaloniki, 1995, Editor I. Papayianni, P. Astrenidou, p 35-48, *citado por* Papayianni, I. - Criteria and Methodology for Manufacturing Compatible Repair Mortars and Bricks, Athens, 1998
- [154] Papayianni, I. - Design and manufacture of repair mortars for interventions on monuments and historical buildings, RILEM Workshop Repair Mortars for Historic Masonry, Delft, January 2005
- [155] Papayianni, I.; Mauroudi, E. - Technology of renderings dated from the 19th Century, Papayianni, I., 5th International Congress on Restoration of Architectural Heritage, Firenze, 2000
- [156] Papayianni, I.; Miltiadou, A.; Charkiolakis, N. - Study of the existing old mortars of the cells of Hosios Loukas Monastery and proposal of compatible repair mortars, 5th International Congress on Restoration of Architectural Heritage, Firenze, 2000
- [157] Papayianni, I.; Stefanidou, M. - Repair mortars for monuments in Byzantine architecture, 5th International Congress on Restoration of Architectural Heritage, Firenze, 2000
- [158] Pardo, E. S. - Interés de la difracción de rayos x (DRX) en la conservación del patrimonio cultural, Cuadernos Técnicos, 2, Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico, Sevilla, 1996, p. 8-13,
- [159] Pecchioni, E.; Malesani, P.; Bellucci, B.; Fratini, F.- Artificial stones used in Florence historical palaces between the XIX and XX centuries, *Journal of Cultural Heritage*, 6, 2005, p. 227-233, ,
- [160] Pera, J. - Metakaolin and calcined clays, Guest Editorial, *Cement and Concrete Composites*, 23, 2001
- [161] Pinto, A. - Sistemas ligantes obtidos por activação alcalina do metacaulino, Dissertação apresentada na Universidade do Minho para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil, Fev. 2004
- [162] Pinto, J. Bessa; Silva, A. Santos - Emprego de pozolanas em argamassas de cal. O exemplo dos Fortes de S. Julião da Barra e da Ericeira, 3^o ENCORE, Encontro sobre Conservação e Reabilitação de Edifícios, Vol.1, LNEC, Lisboa, p. 337-344

- [163] Ramlochan, T.; Thomas, M.D.A.;Hooton, R.D. - The effect of pozzolans on the expansion of mortars cured at elevated temperature. Part II: Microstructural and microchemical investigations, *Cement and Concrete Research*, 33, 2003, p 1341-1356
- [164] Rayment,D.L. - The electron microprobe analysis of thr C-S-H phases in a 136 year old cement paste, *Cement and Concrete Research*, 16, 1986, p. 341-344
- [165] Regio Decreto del 16/11/1939, N 2230 - Norme per l'acettazione delle pozzolane e dei materiali a comportamento pozzolanico, *Gazzetta Ufficiale* , n. 92, 18/04/1940
- [166] República Portuguesa - Caderno de Encargos para o Fornecimento e Recepção de Pozolanas, 1960, Regulamento de Betões e Ligantes Hidráulicos, Porto Editora,1991, p. 117-176
- [167] Riccardi, M.P.; Duminuco, P.; Tomasi, C.; Ferloni, P. - Thermal, microscopic and X-ray diffraction studies on some ancient mortars, *Thermochimica Acta*, 321, 1998, p. 207-214
- [168] Rodríguez, J.M.F.; Fernández, J.A.F, Caracterización físico-química de los morteros romanos de El Ruedo (Almedinilla, Córdoba), *Materiales de Construcción*, 54, n. 275, 2004, p. 39-51
- [169] Rodrigues, J.D. - In the search for tentative recommendations recommendation mortars, *Compatible Materials for the protection of European Cultural Heritage*, Athens, 1998
- [170] Rodrigues, P. F.- Resistance to salts of lime and pozzolana mortars, *RILEM Workshop Repair Mortars for Historic Masonry*, Delft, January 2005
- [171] Rodrigues, P. F. - Argamassas de revestimento para alvenarias antigas. Contribuição para o estudo da influência dos ligantes, Tese para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil pela Universidade Nova de Lisboa, Faculdade de Ciências e Tecnologia, 2004
- [172] Rojas, M.; Rojas, M.I. - The effect of high curing temperature on the reaction kinetics in MK/lime and MK-blended cement matrices at 60°C, 33, 2003, p. 643-649
- [173] Rojas, M.F., Cabrera, J. - The effect of temperature on the hydration rate and stability of the hydration phases of metakaolin - lime-water systems, *Cement and Concrete Research*, 32, 2002, p. 133-138
- [174] Rua, H. - Os dez livros de arquitectura de Vitruvio, IST, Lisboa, 1998
- [175] Sabbioni, C.; Bonazza, A.; Zappia, G. - Damage on hydraulic mortars: The Venice Arsenal, *Journal of Cultural Heritage*, 3, 2002, p. 83-88
- [176] Sabbioni, C.;Zappia, G.; Riontino, C.; Blanco-Varela, M.T.; Aguilera, J.; Puertas, F.; Van Balen, K.; Toumbakari, E.E. - Atmospheric deterioration of ancient and modern hydraulic mortars, *Atmospheric environment*, 2001, 35, p.539-548
- [177] Sabir, B.B; Wild, S.; Bai, J. - Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete: a review, *Cement and Concrete Composites*, 23, 2001, p. 441-454

- [178] Sampaio, J.; Sousa Coutinho, J.; Sampaio, M.N. - Portuguese rice husk ash as a partial cement replacement, International Conference:Sustainable Construction into the next Millennium: Environmentally friendly and innovative cement based materials, N.P. Barbosa, R.N.Swamy, C. Lynsdale, 2000, João Pessoa, Brasil, p.125-137
- [179] Sanchez-Moral, S.; Luque,L.; Cañaveras, J.C.; Soler, V.; Garcia-Guinea, J.; Aparicio, A. - Lime pozzolana mortars in Roman catacombs: composition, structures and restoration, Cement and Concrete Research, in press
- [180] Sánchez-Moral, S.;García-Guinea, J.; Luque, L.; González-Martín, R.; López-Arce, P.- Cinética de carbonatación de morteros experimentales de cal de tipo romano, Materiales de Construccion, 54, n.275, 2004, p. 23-37,
- [181] Santos Silva, A.; Paiva, M.; Ricardo, J.; Salta, M.; Monteiro, A.M.; Candeias; A.E. - Characterisation of roman mortars from the archeological site of Tróia (Portugal), Materiais 2005, Aveiro, Portugal, 2005
- [182] Santos, P. S. - Tecnologia das Argilas, Vol. 2, Aplicações, Editora Edgard Blücher Ltda S. Paulo, Brasil, 1975
- [183] Sarbak, Z.; Stanczyk, A.;Kramer-Wachowiak, M. - Characterization of surface properties of various fly ashes, Powder Technology, 145, 2004, p. 82-87
- [184] Schminke, H.U.; Weibel, M. - Chemical study of rocks from Madeira, Porto Santo and Terceira (Azores), Neues Jahrbuch für Mineralogie, 117, 1972, p. 253-281
- [185] Segurado, J.E. - Materiais de Construção, Bertrand, Lisboa, 1908
- [186] Segurado, J.E. - Alvenaria e Cantaria, Bertrand, Lisboa, 1947
- [187] Shayan, A.; Xu, A. - Value-added utilisation of waste glass in concrete, Cement and Concrete Research, 34, Is. 1, 2004, p. 81-89
- [188] Shayan, A.; Xu, A. - Performance of glass powder as a pozzolanic material in concrete: A field trial on concrete slabs, Cement and Concrete Research, in press
- [189] Shi, C.- Studies on several factors affecting hydration and properties of lime-pozzolan cements, Journal of Materials in Civil Engineering, November/December 2001, p. 441-445
- [190] Shi, C.; Day, R.L.- Pozzolanic reaction in the presence of chemical activators, Part I, Reaction kinetics, Cement and Concrete Research, 30, 2000, p. 91-98
- [191] Shi, C.; Day, R.L.- Pozzolanic reaction in the presence of chemical activators, Part II, Reaction products and mechanism, Cement and Concrete Research, 30, 2000, p.607-613
- [192] Shi, C.; Wu, Y.; Riefler, C.; Wang, H.- Characteristics and pozzolanic reactivity of glass powders, Cement and Concrete Research, 35, 2005, p.987-993
- [193] Shvarzam, A. Kovler, K.; Grader, G.S.; Shter, G.E. - The effect of dehydroxylation/amorphization degree on pozzolanic activity of kaolinite, Cement and Concrete Research, 33, 2003, p. 405-416

- [194] Sibbick, T.; Fenn, D.; Crammond, N.- The occurrence of thaumasite as a product of seawater attack, *Cement and Concrete Composites*, 25, 2003, p.1059-1066
- [195] Silva, A. S. - Nova abordagem na caracterização de argamassas antigas, 3º ENCORE, Encontro sobre Conservação e Reabilitação de Edifícios, Vol. 2, LNEC, Lisboa, Portugal, p. 917-926
- [196] Silva, A. Santos; Reis, O. Braga - Caracterização de Argamassas do Centro Histórico de Castelo Rodrigo, Nota Técnica n.º93/97, DMC/LNEC, Lisboa, Portugal, 1997
- [197] Silva, D.A.; Wenk; H.R.; Monteiro, P.J.M. - Comparative investigation of mortars from Roman Colosseum and cistern, *Thermochimica Acta*, 438, 2005, p. 35-40
- [198] Smeaton, J., Narrative of the construction of the Eddystone Lighthouse, H.Hughes, 1791, *citado em* nota do tradutor de Vicat, L.J., *Mortars and Cements*, Donhead, Dorset, 1997, Traduzido por J.T. Smith, , first published by John Weale, Architectural Library, London, 1837
- [199] Splittgerber, F.; Mueller, A. - Proceedings of the 11th International Congress on the Chemistry of Cement, Durban, South Africa, 2003
- [200] Stätling, Malquori, Cirili - Pozzolana e cementi pozzolanici, *L'industria Italiani del Cemento*, Junho, Julho, Agosto, Setembro e Outubro 1948, *citado por* Coutinho, A.S., *Pozolanas, betões com pozolanas e cimentos pozolânicos*, 1958
- [201] Stroeven, P.; Bui, D. D.; Sabuni, E. - Ash of vegetable waste used for economic production of low to high strength hydraulic binders, *Fuel*, 78, 1999, p. 153-159
- [202] Suryavanshi, A.K.; Swamy, R. Narayan - Stability of Friedel's salt in carbonated concrete structural elements, *Cement and Concrete Research*, 25, n.2, 1996, p. 729-741
- [203] Talero, R. - Qualitative Analysis of Natural Pozzolanas, Fly Ashes and Blast Furnace Slag, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2, n.2, May 1990, p. 106-115
- [204] Tavares, M.; Magalhães, A.C.; Veiga, M.R.; Aguiar, J. - Métodos de diagnóstico para revestimientos de edificios antiguos. Importancia y aplicabilidad de los ensayos in situ, *PH Boletín del Instituto Andaluz del Patrimonio Historico*, 53, Abril 2005, p.11-17
- [205] Tavasci - Struttura della malta di calce e pozzolana di Segni, *Il Cemento*, 8/9, Agosto/Setembro 1948 *citado por* Coutinho, A. S. - *Pozolanas, betões com pozolanas e cimentos pozolânicos*, LNEC, Lisboa, 1958
- [206] Tay, J.- Ash from oil-palm waste, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2, n.2, May 1990, p. 94-105
- [207] Taylor, H.F.W. - Identification of the cementing material in a lightweight sand-lime block, *Journal of Applied Chemistry*, London, 1952, Vol.2, *citado por* Coutinho, A.S., *Pozolanas, betões com pozolanas e cimentos pozolânicos*, 1958
- [208] Taylor, H.F.W. - *The chemistry of cements*, Academic Press, 1972

- [209] Teutonico, J.M.; McCraig, I.; Burns, C.; Ashurst, J. - The Smeaton Project: Factors affecting the properties of lime-based mortars, *Bulletin of the Association for Preservation Technology (APT)*, Albany, N.Y., 25, n. 3-4, September 1994
- [210] Teutonico, J.M.; McCraig, I.; Burns, C.; Ashurst, J. - Factors affecting the properties of lime-based mortars for use in the repair of historic buildings, *English Heritage, The Smeaton Project, Research Project ACI, Phase I Report*, Published by English Heritage, Architectural Conservation Branch, Science and Conservation Division, March 1994
- [211] Torraca, G. - Lime technology in architectural conservation, *Lime News*, 4. n.1, p. 34-41
- [212] Torre, M. José - *Estudio de los Materiales de Construcción en la Alhambra*, Universidad de Granada, Granada, 1995
- [213] Toumbakari, E.E.; Malami, C.; Adami, C.; Vintzileou, E. - Development of lime-pozzolanic cement compositions for the repair and strengthening of historic structures, *RILEM Workshop Repair Mortars for Historic Masonry*, Delft, January 2005
- [214] Toumbakari, E.E.; Van Ge.; Tassios, T.P., Mert, D. - Methodology for the design of injection grouts for consolidation of ancient masonry, *PRO 12, Historic Mortars: Characteristics and Tests*, Proceedings of the International RILEM Workshop, RILEM Publications S.A.R.L., Cachan Cedex, France, 1999, p. 395-405,
- [215] Triães, R. P. - *Estudo composicional e tipológico de materiais cerâmicos da civitas de Conímbriga*, Dissertação apresentada na Universidade de Aveiro para obtenção do grau de Mestre em Minerais e Rochas Industriais, 2003
- [216] Turnali, L.; Bektas, F.; Monteiro, P.J.M. - Use of ground clay brick as a pozzolanic material to reduce alkali-silica reaction, *Cement and Concrete Research*, 33, 2003, p. 1539-1542
- [217] Udoeyo, F. F.; Dashibil, P. U. - Sawdust Ash as Concrete Material, *Journal of Materials in Civil Engineering*, March/ April 2002, p. 173-176
- [218] Valek, J. - Compatibility of mortars with historic masonry, mortars, renders and plasters, 11th International Conference on Built Heritage Conservation, Tusnad 23-29 March 2003, p. 178-183
- [219] Válek, J.; Hughes, J.; Bartos, P.J.M. - Compatibility of historic and modern lime mortars, 12th International Brick/Block Masonry Conference, June 2000
- [220] Válek, J.; Slizková, Z. - Tests on lime and metakaolinite mortars intended for application on historic buildings, *RILEM Workshop Repair Mortars for Historic Masonry*, Delft, January 2005
- [221] Valek, J.; Veiga, M. R. - Characterisation of mechanical properties of historic mortars., *STREMAH 2005 – Ninth International Conference on Structural Studies, Repairs and Maintenance of Heritage Architecture*, Malta , 22-24 June 2005

- [222] Van Balen, K. ; Toumbakari, E.E.; Blanco, M.T.; Aguilera, J.; Puertas, F.; Sabbioni, C.; Zappia, G.; Riontino, C.; Gobbi, G. - Procedure for a mortar type identification: a proposal, PRO 12, Historic Mortars: Characteristics and Tests, Proceedings of the International RILEM Workshop, RILEM Publications S.A.R.L., Cachan Cedex, France, 1999, p.61-70
- [223] Van Hees, R.P.J.; Wijffels, T.J.; Van der Klugt, L.J.A.R. - Thaumaside swelling in historic mortars: field observations and laboratory research, Cement and Concrete Composites, 25, 2003, p.1165-1171
- [224] Varum, H., Martins, T., Velosa, A. - Caracterização do adobe em construções existentes na região de Aveiro, SIACOT, Monsaraz, 2005
- [225] Veiga, M. R.; Velosa, A.; Magalhães, A. - Experimental application of mortars with pozzolanic additions. Characterization and performance evaluation, para publicação
- [226] Veiga, M. R.; Velosa, A.; Magalhães, A – Mechanical compatibility of renders to apply on old walls based on a restrained shrinkage test, para publicação
- [227] Veiga, M.R. - Argamassas para revestimento de paredes de edifícios antigos. Características e campo de aplicação de algumas formulações correntes, 3º Encore, Encontro sobre conservação e reabilitação de edifícios, LNEC, Maio 2003
- [228] Veiga, M.R. - Comportamento de Argamassas de Revestimento de Paredes. Contribuição para o estudo da sua resistência à fendilhação, Dissertação para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil pela Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, LNEC, 1998
- [229] Veiga, M.R. - Influence of Application Conditions on Cracking Susceptibility of Renderings, Concrete Science and Engineering, RILEM Publications S.A.R.L., Vol 2, 2000, pp. 134-140,
- [230] Veiga, M.R.; Carvalho, F. - Some performance characteristics of lime mortars for rendering and repointing ancient buildings, 5th International Masonry Conference, London, 1998, , ,
- [231] Veiga, R. - Characteristics of repair mortars for historic buildings concerning water behaviour, quantification and requirements, RILEM Workshop Repair Mortars for Historic Masonry, Delft, January 2005, , ,
- [232] Velosa, A.L., Coroado, J., Veiga, R.; Rocha, F. - Homenagem ao Prof. Coteló Neiva, Coimbra, 2003
- [233] Velosa, A.L.; Coroado, J., Veiga, R.; Rocha, F. - Characterisation of Roman mortars from Conímbriga with respect to their repair, 10th Euroseminar on Microscopy Applied to Building Materials, Paisley, 2005
- [234] Velosa, A.L., Veiga, M.R. - Desempenho de argamassas de cal com pó de tijolo. Influência da temperatura de cozedura dos tijolos, 3º ENCORE, Encontro sobre Conservação e Reabilitação de Edifícios, LNEC, Lisboa, Portugal, p. 459-545

- [235] Velosa, A.L.; Veiga, M.R. - Development of artificial ageing tests for renders - application to conservation mortars , 7th International Masonry Conference, London, 2006, aceite para publicação
- [236] Velosa, A.L.; Veiga, M.R. - Uso de pozolanas como adições em argamassas de cal para reabilitação de edifícios antigos, Relatório 02/02- NCCT, LNEC, 2002
- [237] Velosa, A.L.; Veiga, M.R.- The use of pozzolans in lime mortars for employment in building rehabilitation, Historical Constructions. Possibilities of Numerical and Experimental Techniques., Guimarães, 2001
- [238] Velosa, A.L.; Veiga, M.R.- Use of additivated lime mortars for old building rehabilitation, 9th Durability of Building Materials and Constructions, Brisbane, 2002
- [239] Velosa, A.L.; Veiga, M.R. - Parameters influencing the performance of lime mortars with pozzolanic additives: a testing campaign, 10th International Conference on Deterioration and Conservation of Stone, Stockholm, 2003
- [240] Vicat, L.J. - Mortars and Cements, Donhead, Dorset, 1997, Traduzido por J.T. Smith, first published by John Weale, Architectural Library, London, 1837
- [241] Villar-Cociña, E.; Valencia-Morales, E.; González-Rodríguez, R.; Hernández-Ruíz, J., Kinetics of the pozzolanic reaction between lime and sugar cane straw ash by lectrical conductivity measurement: A Kinetic diffusive model, Cement and Concrete Research, 33, 2003, p. 517-524
- [242] Voglis, N. A.;Kakali, G. T.; Tsivilis, S. G. - Identification of Composite Cement Hydration Products by Means of X-Ray Diffraction, Mikrochima Acta, 136, 2001, p. 181-183
- [243] White, W.M.; Tapia, M.D.M; Schilling, J.G. - The petrology and geochemistry of the Azores Islands, Contributions to Mineralogy and Petrology, 69, n..3, 1979, p. 201-213
- [244] Wiemin, J; Roy, D.M. - Hydrothermal Processing of New Fly Ash Cement, American Ceramic Society Bulletin, 71, 1992, p. 642-647
- [245] Xio, Z.; Xi, Y. - Use of recycled glass as a raw material in the manufacture of Portland Cement, Materials and Structures, 35, Is. 252, Rilem Publications, SARL, 2002
- [246] Zacharopoulou, G., The renaissance of lime based mortar technology. An appraisal of a bibliographical study, Materials for the protection of European Cultural Heritage, Athens, 1998

Websites

- [247] Ashurst, J. - The technology and use of hydraulic lime,
www.buildingconservation.com/articles/lime/hylime.html
- [248] Ellis, P.R. - Gauging Lime Mortars,
www.buildingconservation.com/articles
- [249] Pat Gibbons, Pozzolans for Lime Mortars
www.buildingconservation.com/articles/pozzo/pozzo.htm
- [250] Palladio, A., Architectura
www.andrea.gsd.harvard.edu/palladio
- [251] Rondelet, Jean Baptiste, Traité théorique et pratique de l'art de bâtir, 1802-1817,
www.rondelet.biblio.polimi.it
- [252] Vitruvius Pollio, M., De Architectura
www.penelope.uchicago.edu/Thayer/E/Roman/Texts/Vitruvius/home.html
- [253] Vitruvius Pollio, M., De Architectura
www.vitruvius.be
- [254] Vitruvius Pollio, M., De Architectura
<http://remacle.org/bloodwolf/erudits/Vitruve>
Tradução M.Ch. L. Maufra; C.L.F. Panchoucke, 1847
- [255] www.catalhoyuk.com
- [256] www.minervaconservation.com/articles/abriefhistoryoflime.php
- [257] www.ricehuskash.com

ANEXO 1

Classificação das amostras obtidas

Amostra n.º	Local da amostra	Função	Estado de conservação	Datação
TR 1 (30)	Tróia Cetária do núcleo principal da fábrica de salga	Revestimento de parede exterior	Bom estado de conservação	Séc. I a VI
TR 2 (31)	Tróia Cetária junto ao estuário	Revestimento (1ª camada)	Coesa. Bom estado de conservação. Dificuldade na retirada da amostra	Séc. I a VI
TR 3 (33)	Tróia Cetária junto ao estuário	Argamassa de assentamento	Bom estado de conservação	Séc. I a VI
TR 4 (34)	Tróia Balneário – tanque de água fria	Revestimento de impermeabilização horizontal	Bom estado de conservação	Séc. I a VI
TR 5 (35)	Tróia Núcleo principal fábrica salga	Revestimento interior (2ª camada)	Bom estado de conservação	Séc. I a VI
SM 1 (36)	Ponta Delgada /Fundição / Fachada sul	Reboco exterior	Parte facilmente mas encontra-se coesa	Séc. XIX
SM 2 (37)	Ponta Delgada Casa Rua Eng.º José Cordeiro, 93	Reboco exterior	Desagrega-se com facilidade	
SM 3 (38)	Ponta Delgada / Forte de S. Brás	Revestimento exterior	Bom estado de conservação	Séc. XVI
SM 4 (39)	Ponta Delgada / Forte de S. Brás	Revestimento exterior		
SM 5 (40)	Ponta Delgada / Forte de S. Brás	Revestimento exterior	Estado de conservação médio. Desagrega-se com alguma facilidade ao toque	Séc. XVI
SM 6 (41)	Ponta Delgada / Forte de S. Brás	Revestimento exterior	Bom estado de conservação	Séc. XVI?
SM 7 (42)	Ponta Delgada / Forte de S. Brás	Revestimento exterior	Bom estado de conservação	
SM 8 (44)	Ponta Delgada / Forte de S. Brás	Revestimento exterior	Bom estado de conservação	Séc. XVI
SM 9 (45)	Ponta Delgada / Fábrica da Chicória	Reboco de junta na fachada sul	Mau estado de conservação. Desagregação imediata	Séc. XIX

SM 10 (46)	Ponta Delgada / Fábrica da Chicória	Reboco exterior	Estado de conservação médio/mau. Esfarela-se facilmente	Séc. XIX
SM 11 (47)	Ponta Delgada / Fundição de Ferro	Reboco interior	Estado de conservação médio/mau. Desagregação fácil	Séc. XIX
SM 12 (48)	Ponta Delgada / Fundição de Ferro	Reboco interior	Estado de conservação médio/mau. Esfarela-se facilmente	Séc. XIX
SM 13 (49)	Furnas, Rua das Águas Quentes, 29	Reboco exterior	Bom estado de conservação.	
SM 14 (50)	Furnas, Travessa entre os n.º 29 e 37 da Rua das Águas Quentes, n.º 31	Reboco exterior	Estado de conservação médio. Desagregação fácil	
SM 15 (51)	Ponta Delgada, Doca	Argamassas de junta	Bom estado de conservação junto ao mar, contrastando com mau estado de conservação da pedra	Séc. XIX (?)
SM 16	Forte da Praia do Pópulo	Reboco exterior	Bom estado de conservação, junto ao mar	
CON 1 (52)	Conímbriga Termas do Sul / <i>Natatio</i>	Reboco exterior	Bom estado de conservação	Séc. II
CON 2 (53)	Conímbriga Termas do Sul / <i>Natatio</i>	Reboco exterior	Bom estado de conservação	Séc. II
CON 3 (54)	Conímbriga Termas do Sul / Piscina de Água Fria	Reboco exterior	Bom estado de conservação.	Séc. II
CON 4 (55)	Conímbriga Termas do Sul / Piscina de Água Fria	Reboco	Bom estado de conservação.	Séc. II
CON 5 (56)	Conímbriga Termas do Sul / Piscina de Água Fria	Reboco	Bom estado de conservação	Séc. II
CON 6 (57)	Conímbriga Termas Augustanas / <i>Frigidarium</i>	Reboco	Bom estado de conservação	Séc. I
CON 7 (58)	Conímbriga Termas Augustanas / <i>Frigidarium</i>	Reboco	Bom estado de conservação	Séc. I

CON 8 (59)	Conímbriga Casa Cantaber / Banhos	Reboco.	Bom estado de conservação	Séc. II a IV
CON 9 (60)	Conímbriga Casa Cantaber / Banhos	Reboco.	Bom estado de conservação	Séc. II a IV
CON 10 (61)	Conímbriga Casa Cantaber / Banhos	Reboco.	Bom estado de conservação	Séc. II a IV
CON 11 (62)	Conímbriga Tanque da Casa de Cantaber	Argamassa de revestimento de parede	Bom estado de conservação	Séc. II a IV
CON 12 (63)	Conímbriga Peristilo da Casa de Cantaber	Argamassa de pavimento	De fácil desagregação	Séc. II
CON 13 (64)	Conímbriga C24	Revestimento interior	Bom estado de conservação	
CON 14 (65)	Conímbriga C24	Revestimento pintado	Bom estado de conservação	
CON 15 (66)	Conímbriga C34	Revestimento interior	Bom estado de conservação	
CSC 1 (67)	Convento de Santa Cruz, Coimbra	Argamassa de reboco	Bom estado de conservação	Séc. XVII
CSC 2 (68)	Convento de Santa Cruz, Coimbra	Argamassa de junta	Bom estado de conservação	Séc. XVII
BR (69)	Betão Romano	Argamassa de assentamento de pavimento. Camada <i>Rudus</i> .	Bom estado de conservação	
FR 1 (70)	Frielas	Reboco de espelho de canal de água à volta do peristilo	Bom estado de conservação	Séc. III/IV
FR 2 (71)	Frielas	Reboco interior. Limites do peristilo de uma habitação	Bom estado de conservação	Séc. III/IV
FR 3 (73)	Frielas	Reboco de espelho de canal de água à volta do peristilo	Bom estado de conservação	Séc. III/IV
SF 1 (74)	Safara, Igreja Matriz	Argamassa de reboco interior	Fácil desagregação	
MC3 (75)	Museu Machado de Castro Subcave, criptopórtico	Argamassa de reboco.	Bom estado de conservação	Séc. I?

ANEXO 1

MC4 (76)	Museu Machado de Castro Subcave, fundo do corredor	Argamassa de junta de alvenaria de tijolo.	Estado de conservação médio/mau – esfarela-se com alguma facilidade	Séc. I
BA (77)	Barragem do Álamo, Algarve	Argamassa de revestimento	Bom estado de conservação	

Ficha 1 - TR 1

Amostragem



Descrição

Revestimento de parede exterior de cetária contendo fragmentos cerâmicos.



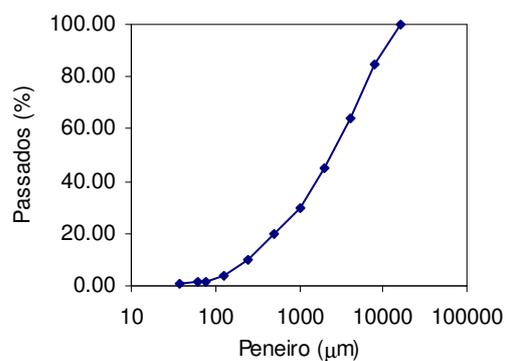
Dissolução ácida (ácido acético)

Percentagem solúvel: 37%

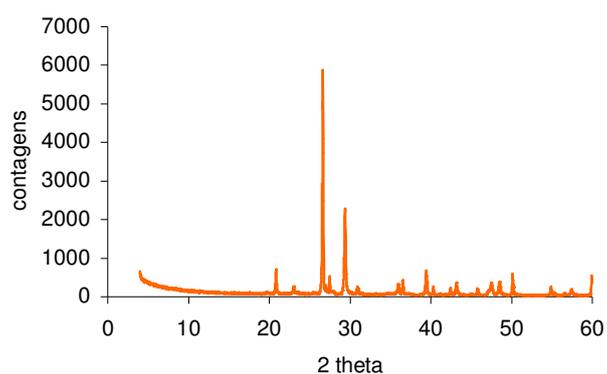
Resíduo: 63%

Resíduo composto por areia siliciosa e fragmentos cerâmicos.

Análise Granulométrica

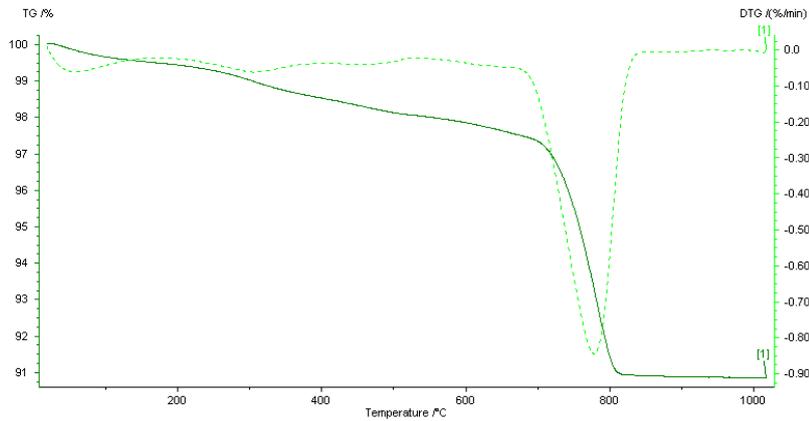


Difracção de Raios X



Quartzo, Calcite, Pirite, Feldspato potássico, Dolomite, Filossilicatos, Plagioclase, Anidrite, Pirite

Análise Termogravimétrica



Desidratação e desidroxilação de minerais argilosos e/ou compostos hidráulicos até aos 600°C e descarbonatação de carbonatos (pico principal correspondente a 6,3%).

Composição Química

Fe ₂ O ₃	MnO	TiO ₂	CaO	K ₂ O	P ₂ O ₅	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	P.R.
2,04	0,03	0,33	19,80	1,15	0,25	43,04	6,58	2,96	0,82	19,51

Resistência à compressão

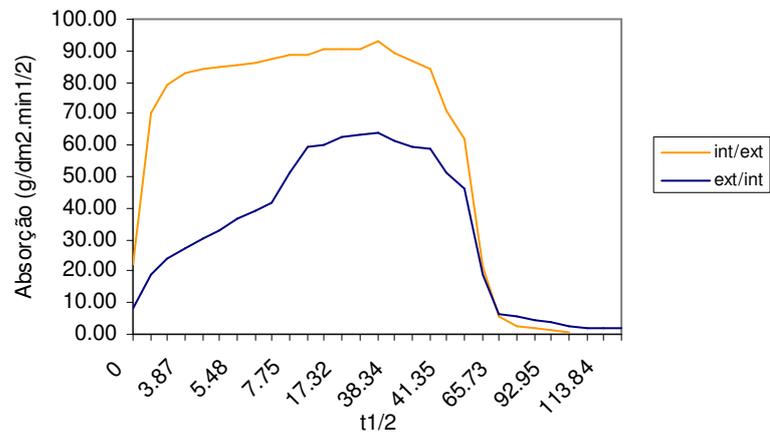
R_c = 3,6 MPa

Coefficiente de Capilaridade

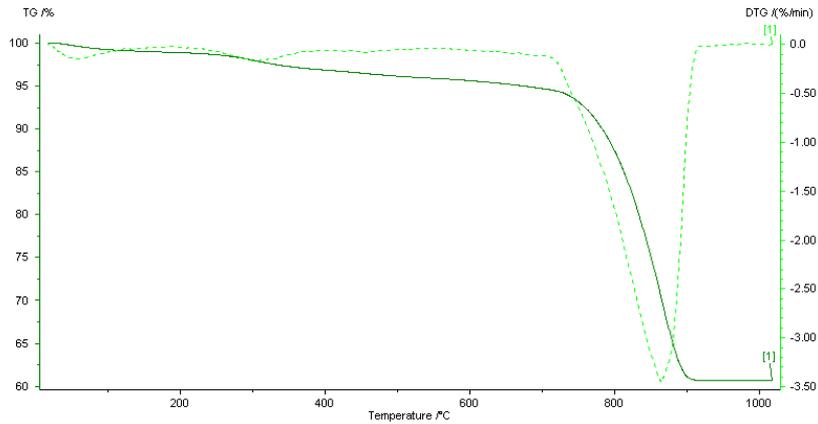
Do exterior para o interior: 5,64 g/dm².min^{1/2}

Do interior para o exterior: 1,48 g/dm².min^{1/2}

Absorção e secagem



Análise Termogravimétrica



Desidratação e desidroxilação de minerais argilosos e/ou compostos hidráulicos até aos 600°C e descarbonatação de carbonatos (pico principal correspondente a 33%).

Composição Química

Fe ₂ O ₃	MnO	TiO ₂	CaO	K ₂ O	P ₂ O ₅	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	P.R.
0,59	0,02	0,04	31,49	0,10	0,05	1,09	0,55	16,25	1,19	45,18

Resistência à compressão

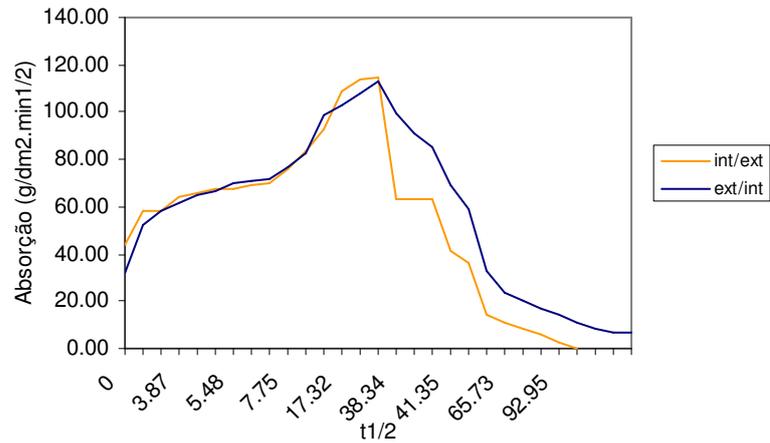
R_c = 5,8 MPa

Coefficiente de Capilaridade

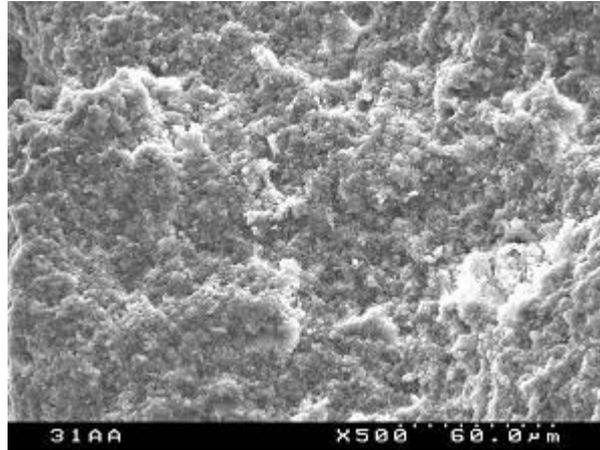
Do exterior para o interior: 3,96 g/dm².min^{1/2}

Do interior para o exterior: 3,92 g/dm².min^{1/2}

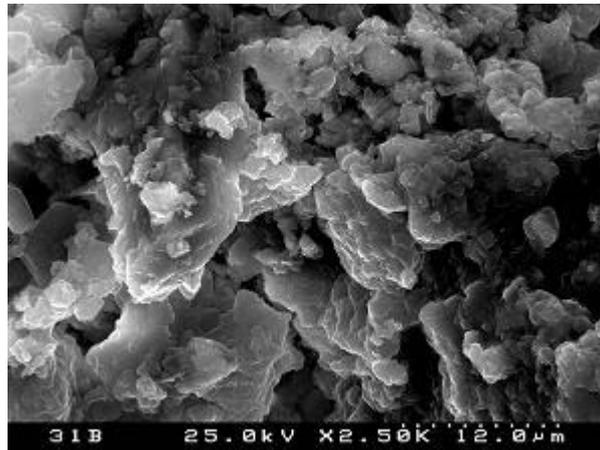
Absorção e secagem



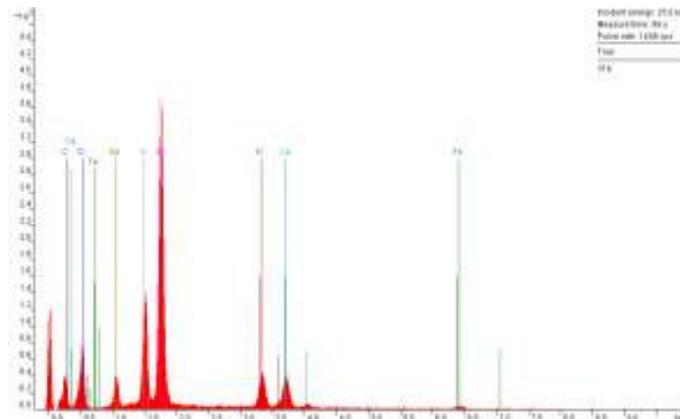
Microscopia Electrónica Varrimento (MEV/EDS)

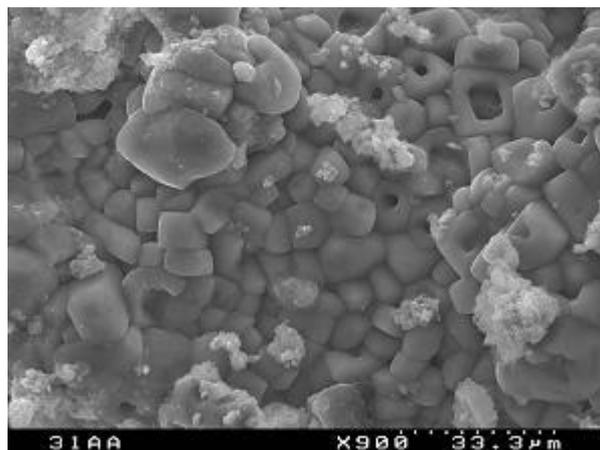


Morfologia geral.

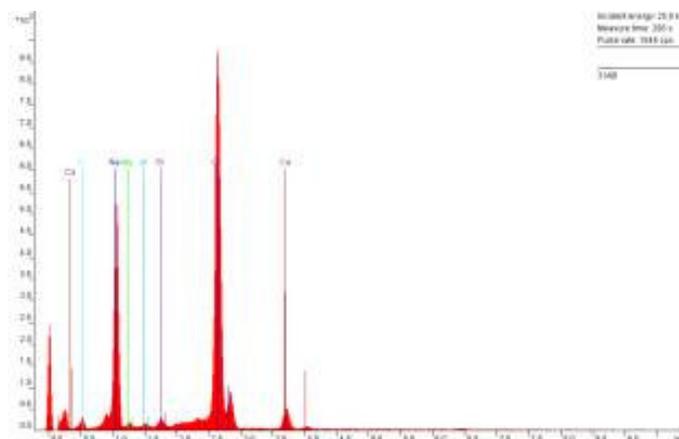


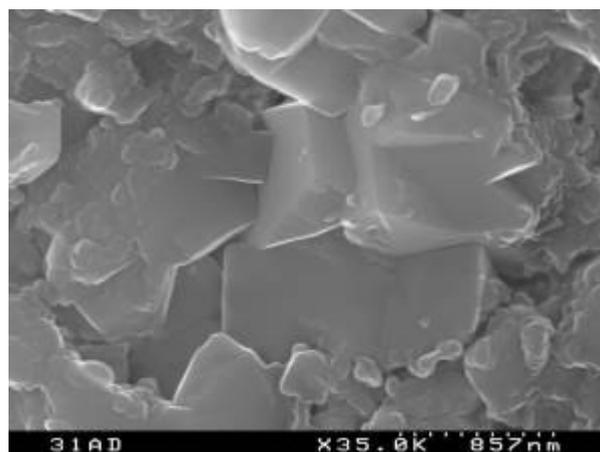
Ampliação revelando morfologia predominante e principais componentes da argamassa.



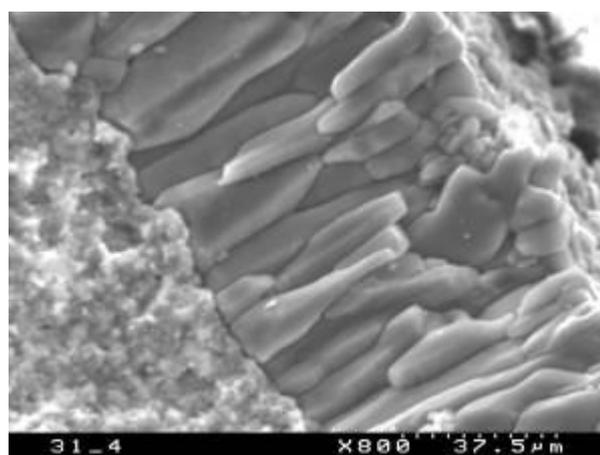
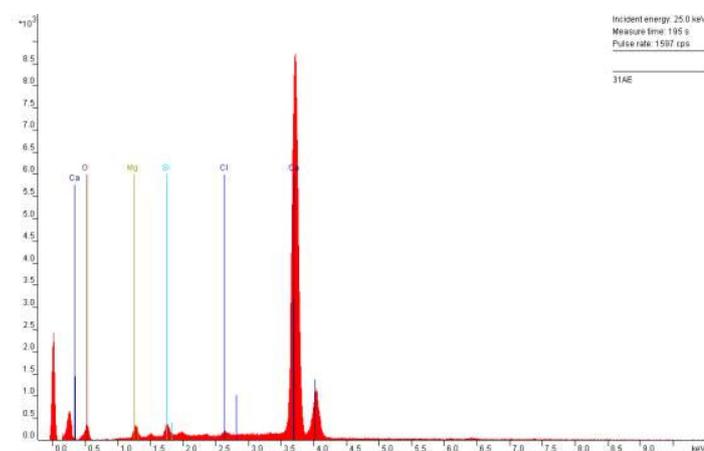


Presença de cloreto de sódio (halite).





Cristais de calcite.



Re-precipitação de calcite no preenchimento de zonas de descontinuidade (fendilhação ou dissolução dos componentes iniciais).

Ficha 3 - TR 3

Amostragem

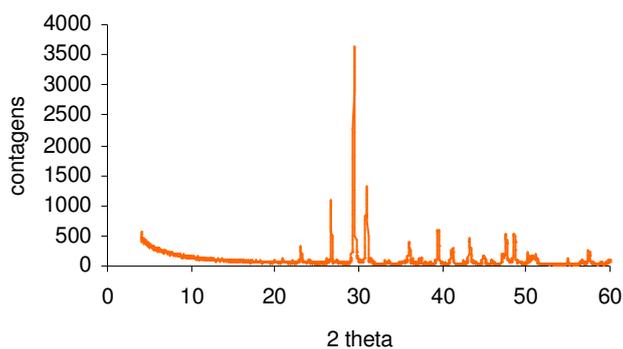


Descrição

Argamassa de revestimento interior com agregado grosseiro (areão) de cor cinza.



Difracção de Raios X



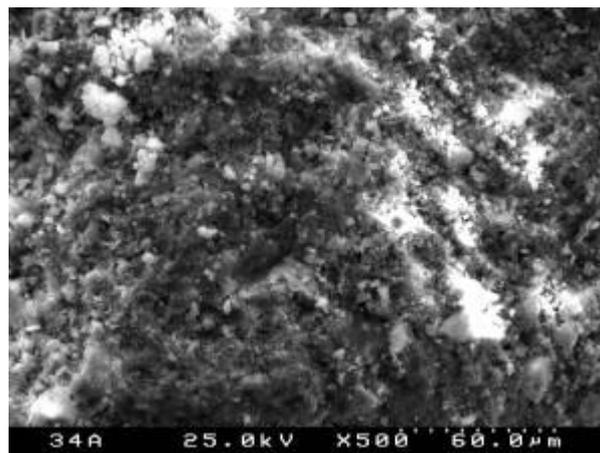
Calcite, quartzo, dolomite, aragonite, pirite, halite, feldspatos potássicos, filossilicatos, augite, trona, opala.

Composição Química

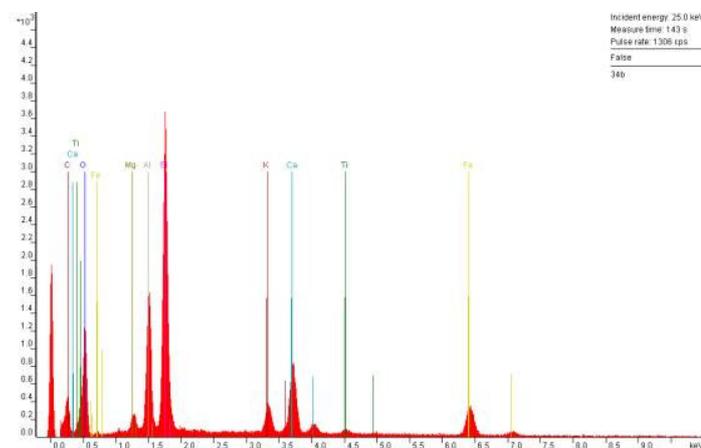
Fe ₂ O ₃	MnO	TiO ₂	CaO	K ₂ O	P ₂ O ₅	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	P.R.
1,02	0,02	0,19	36,52	0,20	0,15	8,01	1,28	8,51	0,32	39,28

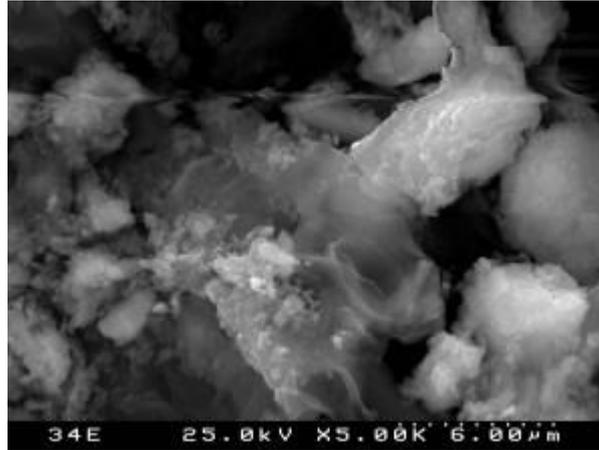
Ficha 4 - TR 4**Amostragem****Descrição**

Argamassa de revestimento horizontal, contendo partículas de cerâmico moído e agregado de cor cinzenta.

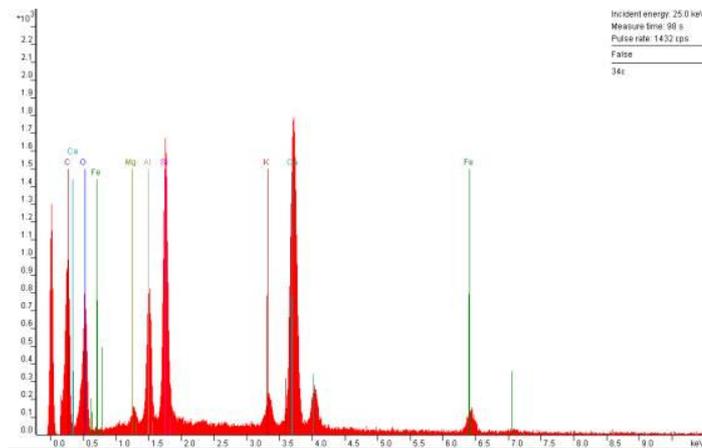
Microscopia Electrónica Varrimento (MEV/EDS)

Morfologia geral.





Aproximação, visualização de estrutura tipo alveolar, possivelmente composta por silico-aluminatos de cálcio hidratados.



Ficha 5 - TR 5**Amostragem****Descrição**

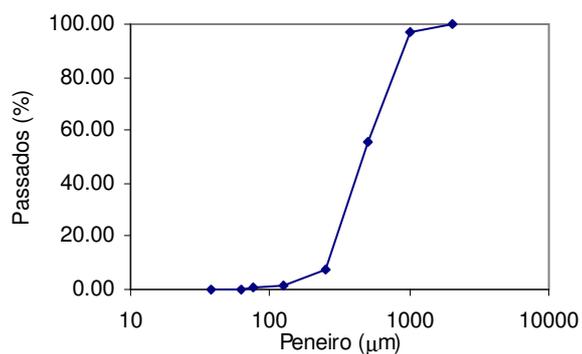
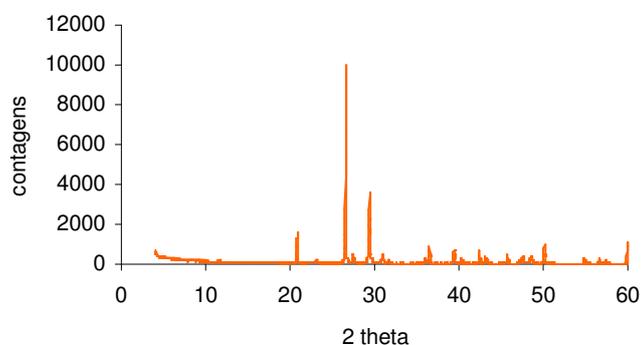
Argamassa uniforme, branca, com agregado fino (areia) e partículas cerâmicas.

Dissolução ácida (ácido acético)

Percentagem solúvel: 28%

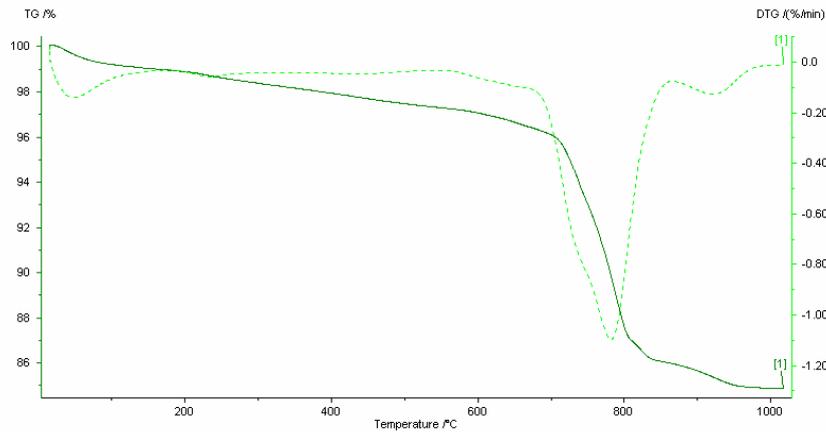
Resíduo: 72%

Resíduo composto por areia siliciosa e partículas cerâmicas.

Análise Granulométrica**Difração de Raios X**

Quartzo, calcite, dolomite, feldspatos potássicos, halite, anidrite, plagioclase, vestígios de pirite, gesso e filossilicatos.

Análise Termogravimétrica



Desidratação e desidroxilação de minerais argilosos e/ou compostos hidráulicos até aos 580°C e descarbonatação de carbonatos de cálcio (pico principal correspondente a 11,5%).

Composição Química

Fe ₂ O ₃	MnO	TiO ₂	CaO	K ₂ O	P ₂ O ₅	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	P.R.
0,21	0,01	0,03	17,50	0,81	0,16	52,13	1,56	1,58	1,07	18,58

Resistência à compressão

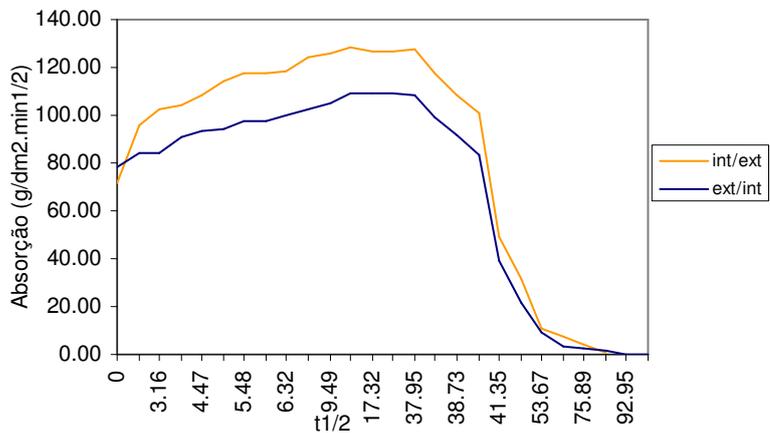
R_c = 5,0 MPa

Coefficiente de Capilaridade

Do exterior para o interior: 3,29 g/dm².min^{1/2}

Do interior para o exterior: 3,73 g/dm².min^{1/2}

Absorção e secagem



Ficha 6 - SM 1

Amostragem



Descrição



Argamassa terrosa, de cor castanha, com agregado negro de origem vulcânica e coberta por caiação.

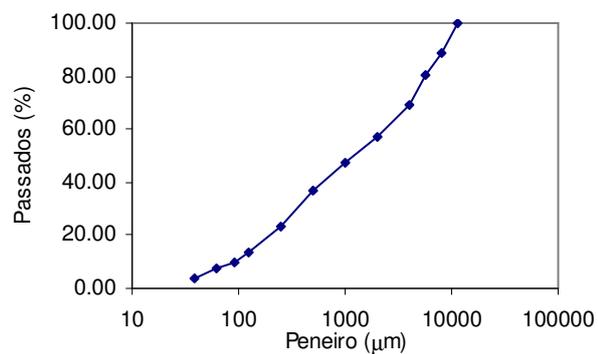
Dissolução ácida (ácido clorídrico)

Percentagem solúvel: 26%

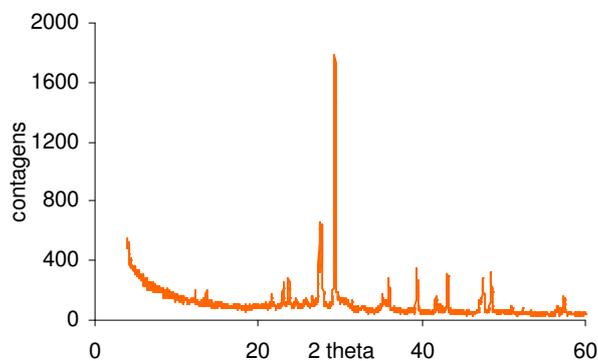
Resíduo: 74%

Resíduo composto por agregado basáltico e silte cinzento.

Análise Granulométrica

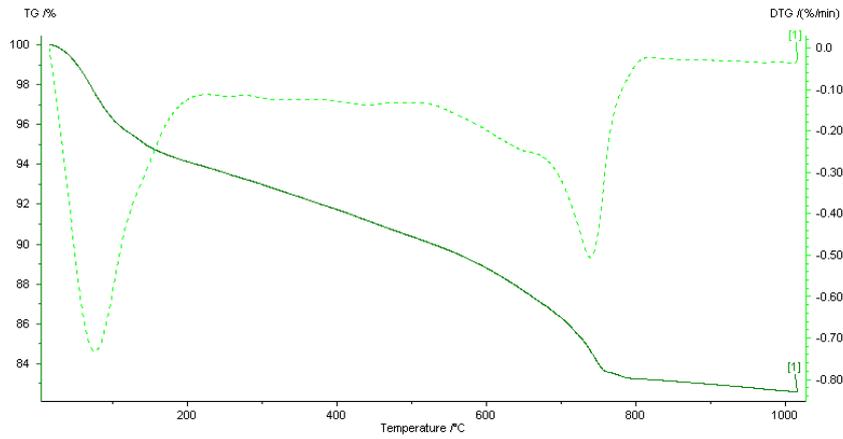


Difracção de Raios X



Calcite, feldspatos (anortoclase, feldspato potássico), piroxenas (augite), magnesite, halite vestígios de caulinite e anidrite

Análise Termogravimétrica



Desidratação e desidroxilação de minerais argilosos e/ou compostos hidráulicos até 500°C e descarbonatação de carbonatos (pico principal correspondente a 7,5%).

Composição Química

Fe ₂ O ₃	MnO	TiO ₂	CaO	K ₂ O	P ₂ O ₅	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	P.R.
7.07	0.15	1.85	15.29	2.24	0.29	39.00	13.25	3.76	3.42	13.30

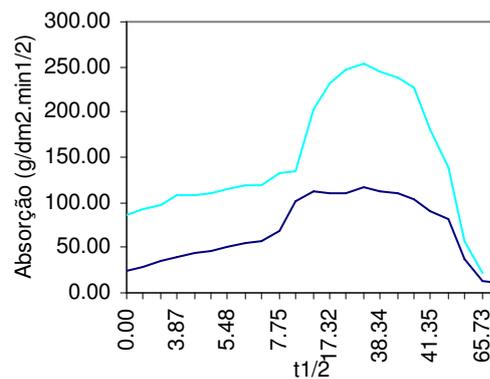
Resistência à compressão

R_c = 1,7MPa

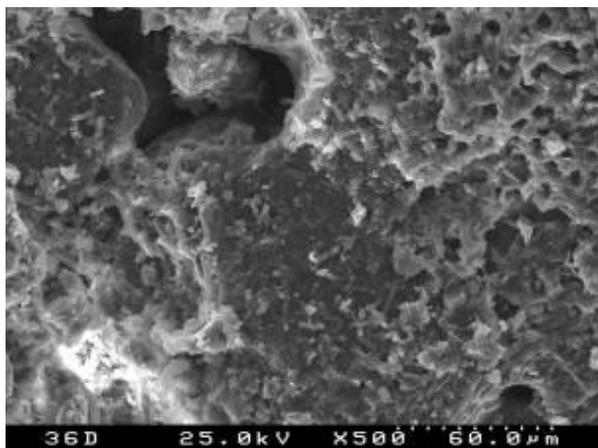
Coefficiente de Capilaridade

Do exterior para o interior: 8,22 g/dm².min^{1/2}

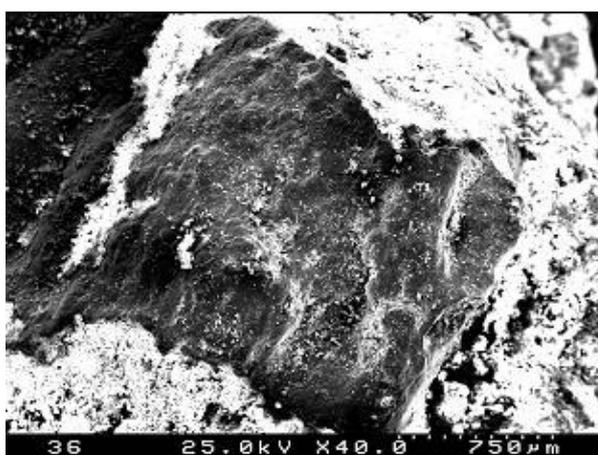
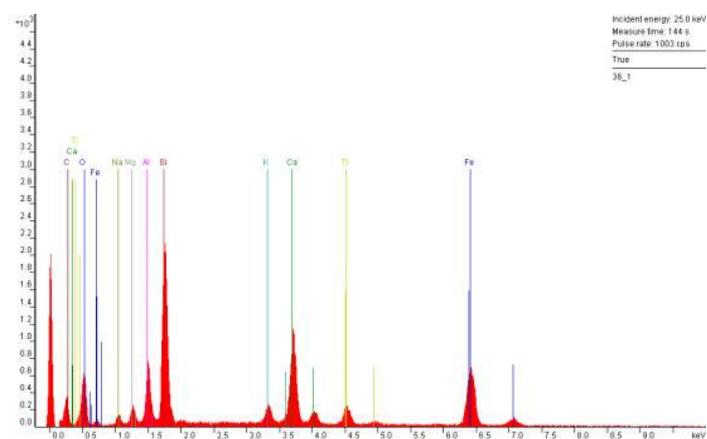
Absorção e secagem



Microscopia Electrónica Varrimento (MEV/EDS)



Morfologia geral.



Agregado contido na argamassa.

Ficha 7 - SM 2

Amostragem



Descrição



Argamassa de cor castanha, terrosa, com grãos de cal.

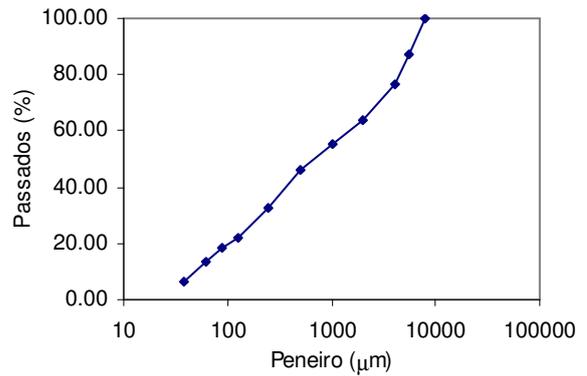
Dissolução ácida (ácido clorídrico)

Percentagem solúvel: 39%

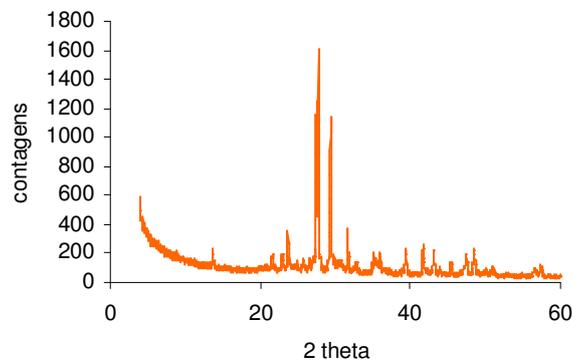
Resíduo: 61%

Resíduo composto por fundamentalmente por silte castanho com alguns fragmentos de basalto.

Análise Granulométrica

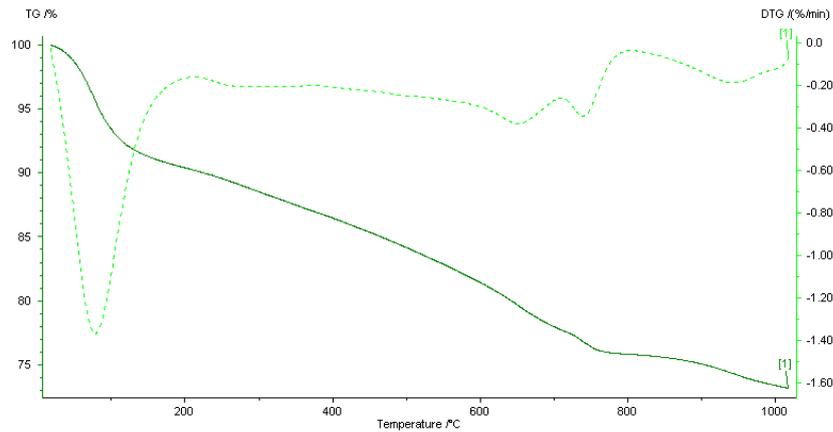


Difracção de Raios X



Feldspatos (anortoclase, feldspato potássico), calcite, halite, piroxenas (augite), quartzo, magnesite

Análise Termogravimétrica



Desidratação e desidroxilação de minerais argilosos e/ou compostos hidráulicos até 500°C e descarbonatação de carbonatos (dois picos entre 600 e 800°C correspondentes a 5,8%).

Composição Química

Fe ₂ O ₃	MnO	TiO ₂	CaO	K ₂ O	P ₂ O ₅	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	P.R.
4.93	0.18	1.04	13.89	2.78	0.27	39.02	13.82	1.69	4.95	16.60

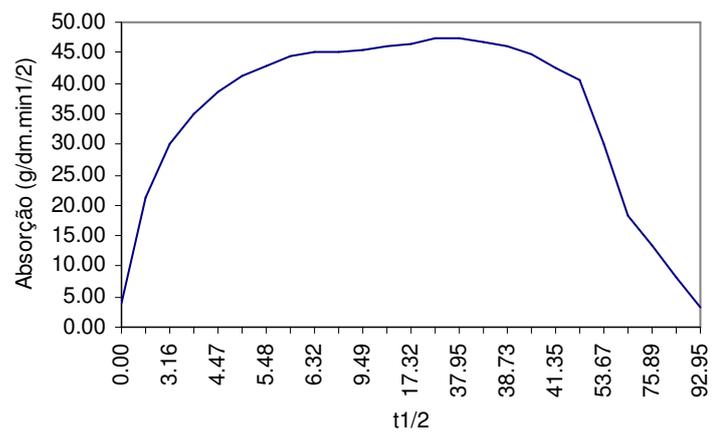
Resistência à compressão

$R_c = 1,7 \text{ MPa}$

Coefficiente de Capilaridade

Do exterior para o interior: 2,41
g/dm².min^{1/2}

Absorção e secagem



Microscopia Electrónica Varrimento (MEV/EDS)

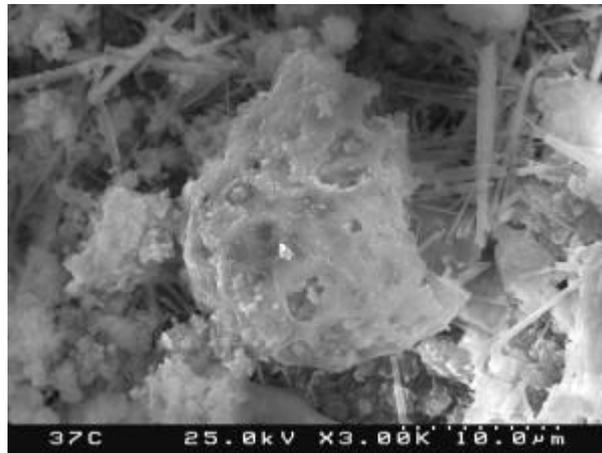
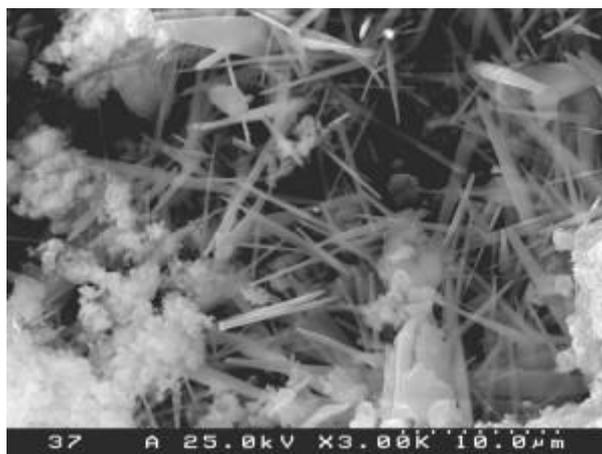
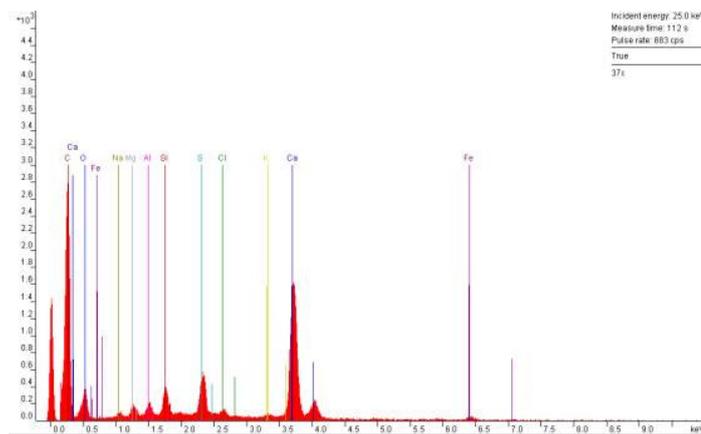
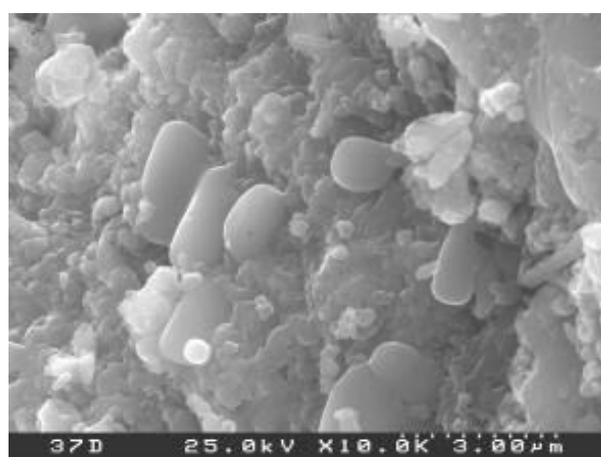
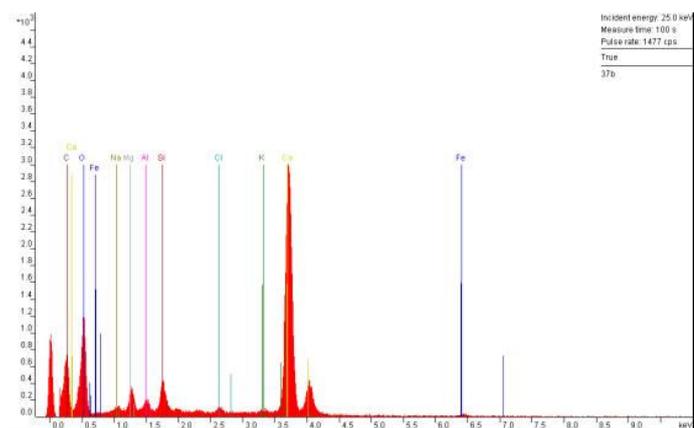


Imagem de partícula de origem vulcânica, alveolar, sendo o EDS correspondente.



Agulhas compostas fundamentalmente por Ca.



Presença de cloreto de sódio (halite).

Ficha 8 - SM 3

Amostragem



Descrição



Argamassa branca, de cal, com incorporação de pó negro de material vulcânico, provavelmente pozolânico.

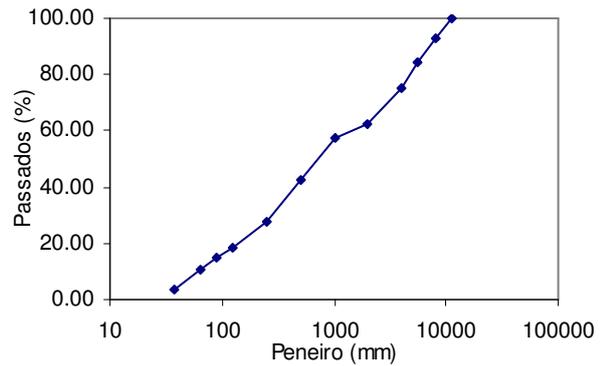
Dissolução ácida (ácido clorídrico)

Percentagem solúvel: 33%

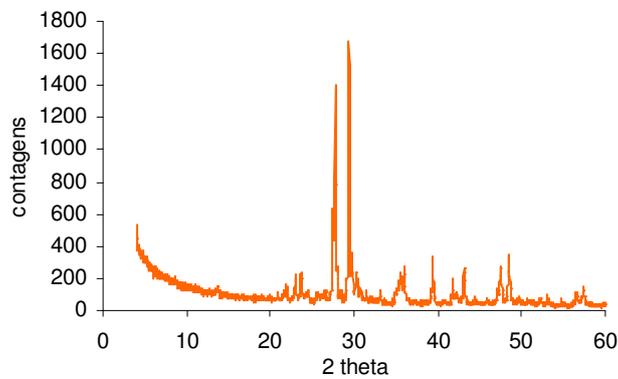
Resíduo: 67%

Resíduo composto por silte castanho e fragmentos de basalto.

Análise Granulométrica

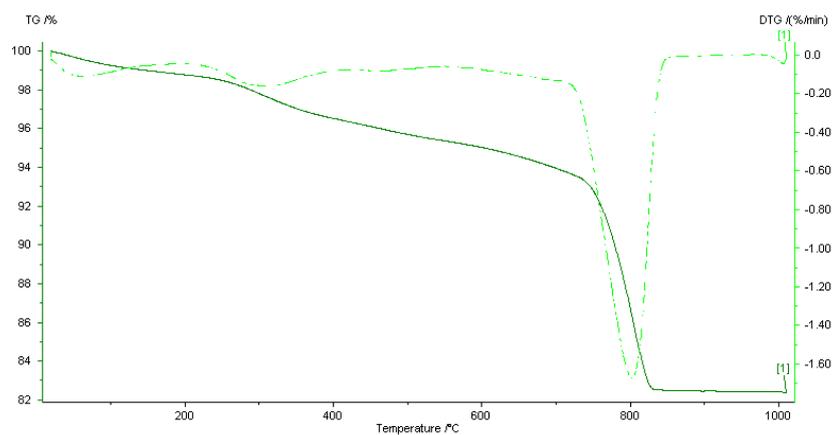


Difração de Raios X



Calcite, feldspatos (anortoclase, plagioclase), hematite, piroxena (diopsido), quartzo, vestígios de halite

Análise Termogravimétrica



Desidratação e desidroxilação de minerais argilosos e/ou compostos hidráulicos até 500°C e descarbonatação de carbonatos (um pico entre 600°C e 1000°C correspondente a 11,7%).

Composição Química

Fe ₂ O ₃	MnO	TiO ₂	CaO	K ₂ O	P ₂ O ₅	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	P.R.
6.47	0.12	1.78	21.86	1.66	0.37	33.39	10.10	4.66	1.98	16.30

Ficha 9 - SM 4

Amostragem



Descrição



Argamassa de cal, compacta, com agregado rolado de cor escura.

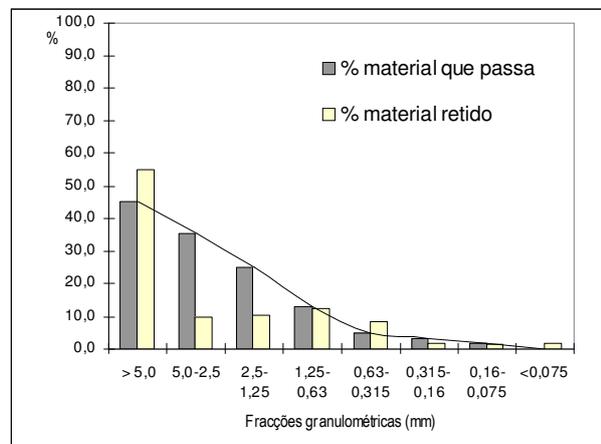
Dissolução ácida (ácido clorídrico)

Percentagem solúvel: 30%

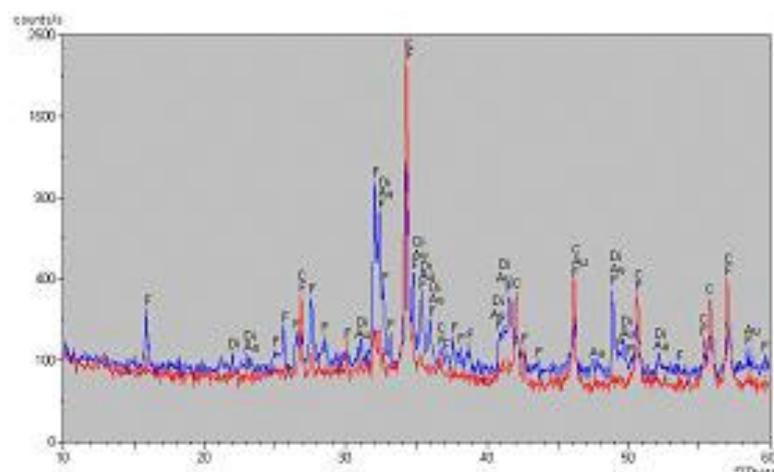
Resíduo: 70%

Agregado composto por basalto rolado.

Análise Granulométrica

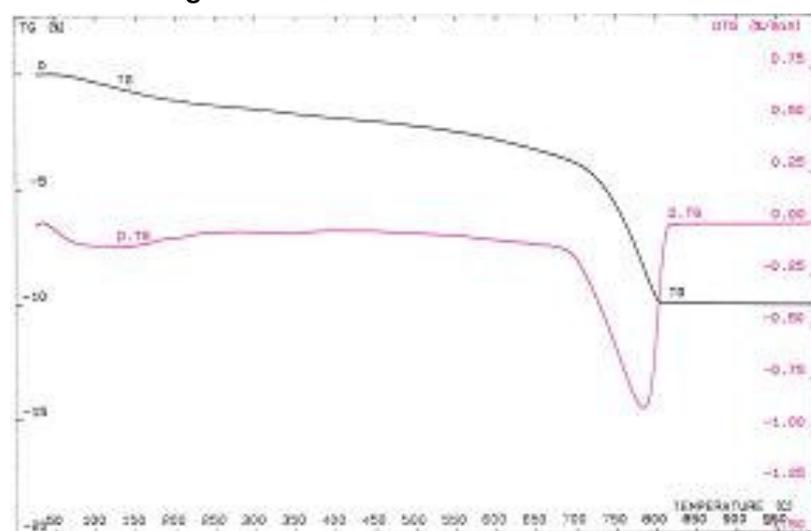


Difração de Raios X



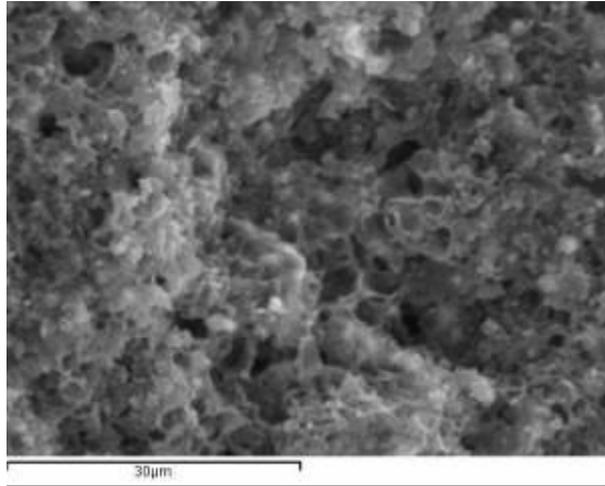
Global (azul): Feldspatos, Piroxenas (augite e diopsido), calcite
Fracção fina (vermelho): Calcite, Feldspatos e vestígios de Piroxenas

Análise Termogravimétrica

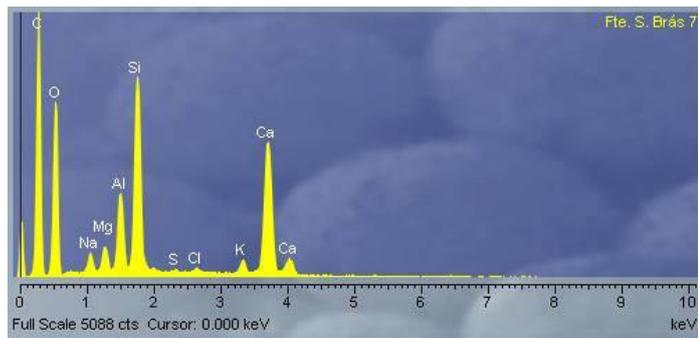


Desidratação e desidroxilação de minerais argilosos até 500°C e
descarbonatação do carbonato de cálcio até 900°C.

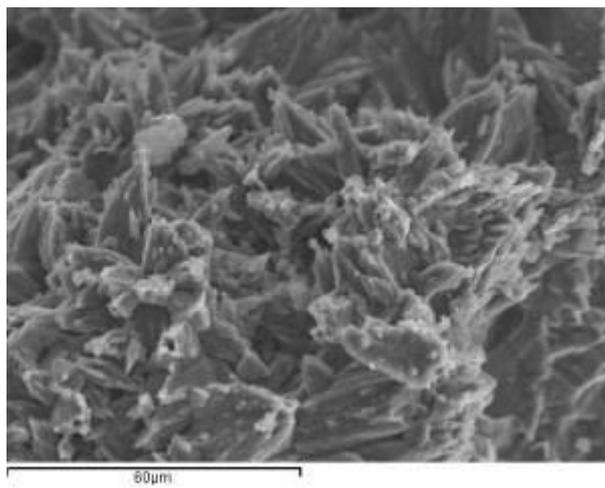
Microscopia Electrónica Varrimento (MEV/EDS)



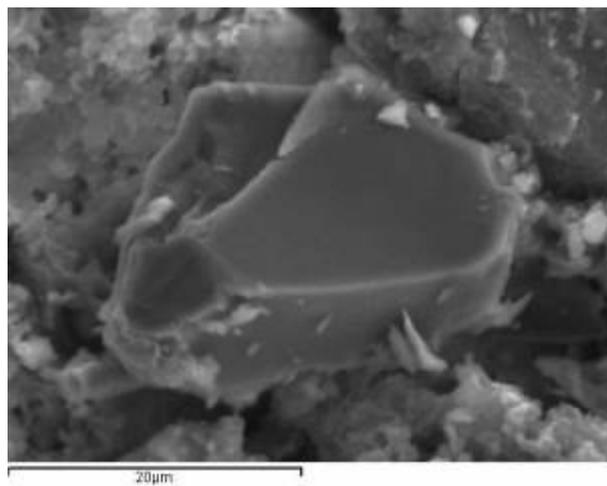
Morfologia geral, sendo evidente a existência de uma estrutura alveolar.



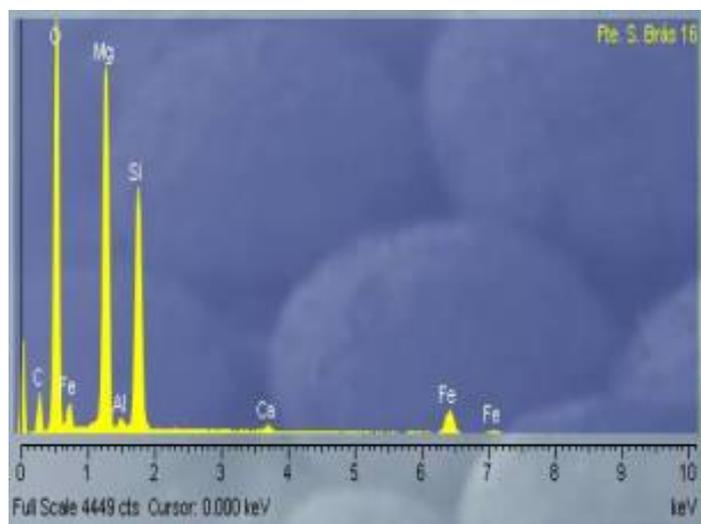
Espectro EDS indicativo da presença de aluminossilicatos de cálcio.



Cristais de calcite recristalizada.

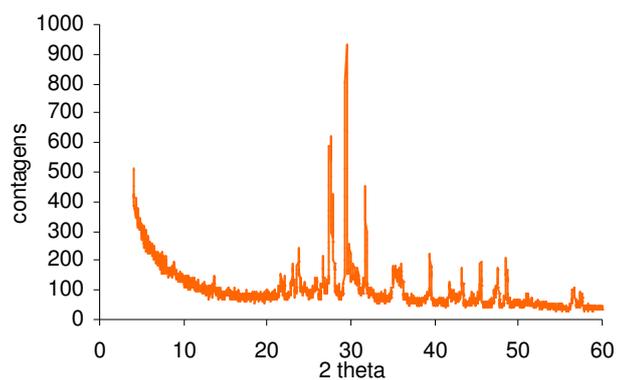


Grão de piroxena e EDS correspondente.



Ficha 10 - SM 5**Amostragem****Descrição**

Argamassa de cor castanha, terrosa, com agregado de dimensão variada e coloração escura.

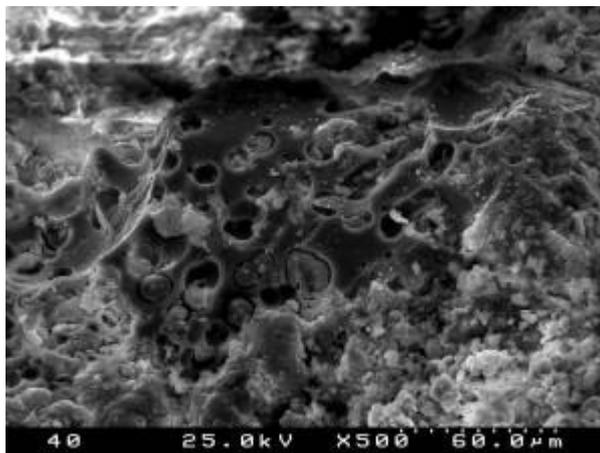
Difracção de Raios X

Calcite, feldspatos (anortoclase, plagioclase), piroxenas (augite e diopsido), halite, mica/ilite

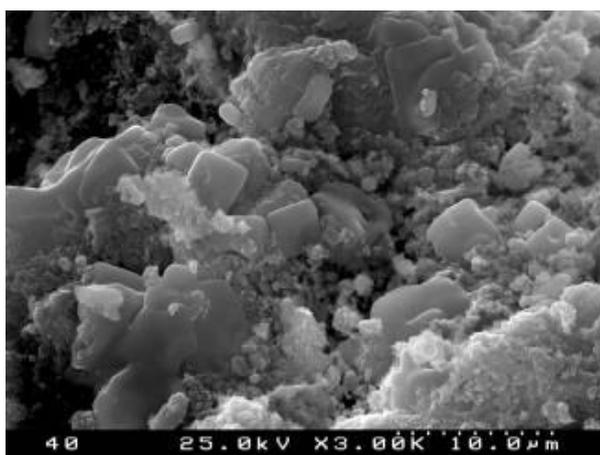
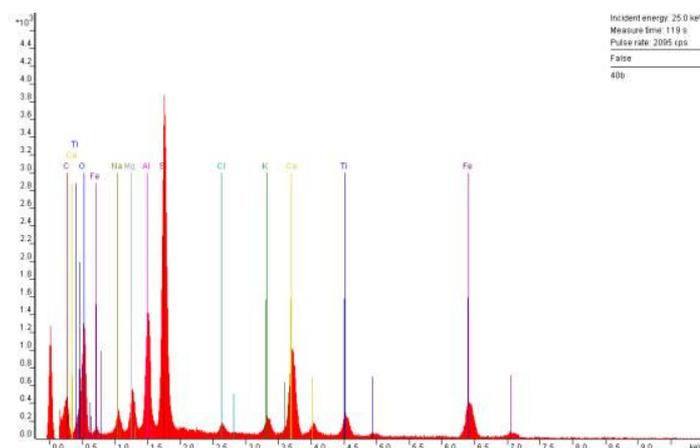
Composição Química

Fe ₂ O ₃	MnO	TiO ₂	CaO	K ₂ O	P ₂ O ₅	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	P.R.
8.65	0.17	2.37	12.82	1.85	0.44	40.10	13.26	5.13	4.35	10.40

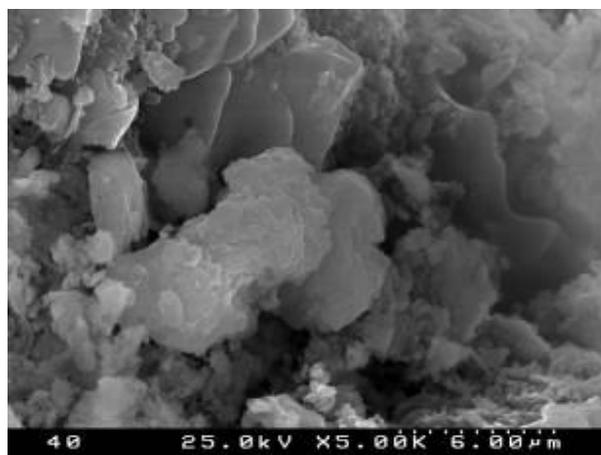
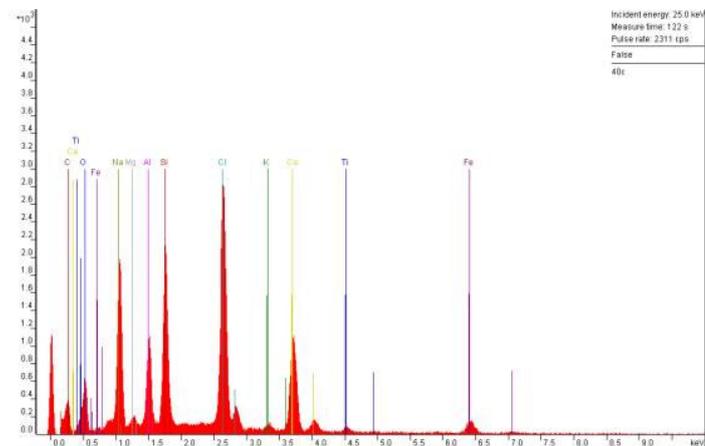
Microscopia Electrónica Varrimento (MEV/EDS)



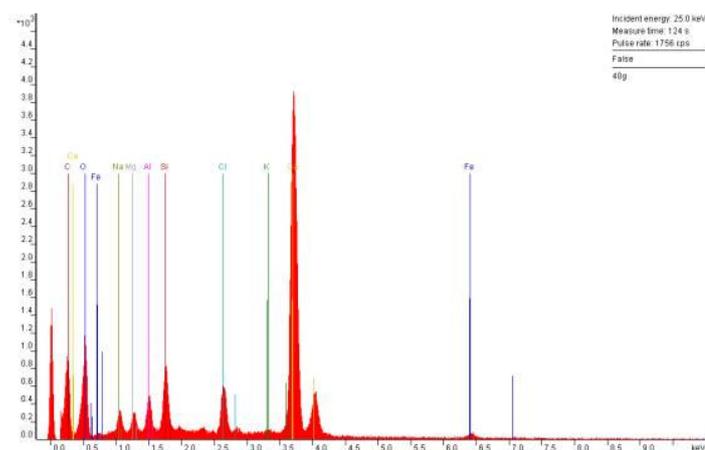
Agregado de origem vulcânica e espectro EDS correspondente.



Cloreto de sódio (halite) presentes na argamassa.



Matriz calcária com presença de cloreto de sódio (halite).



Ficha 11 - SM 6**Amostragem****Descrição**

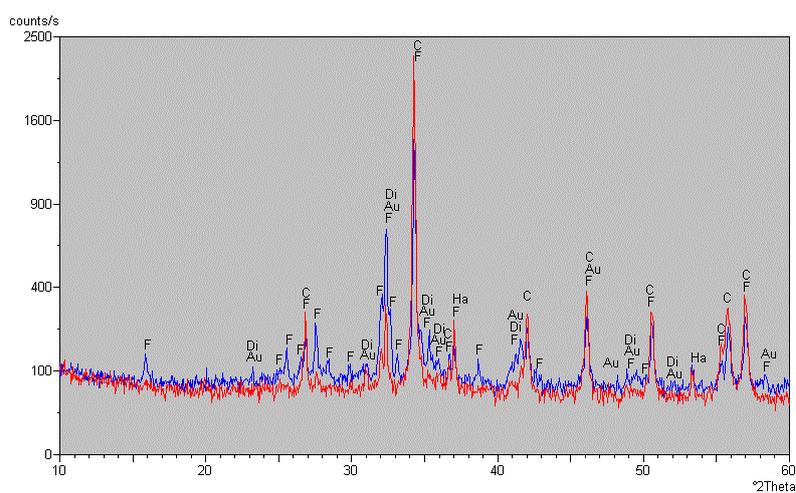
Argamassa com agregado constituído por tufo vulcânicos.

Dissolução ácida (ácido clorídrico)

Percentagem solúvel: 45%

Resíduo: 55%

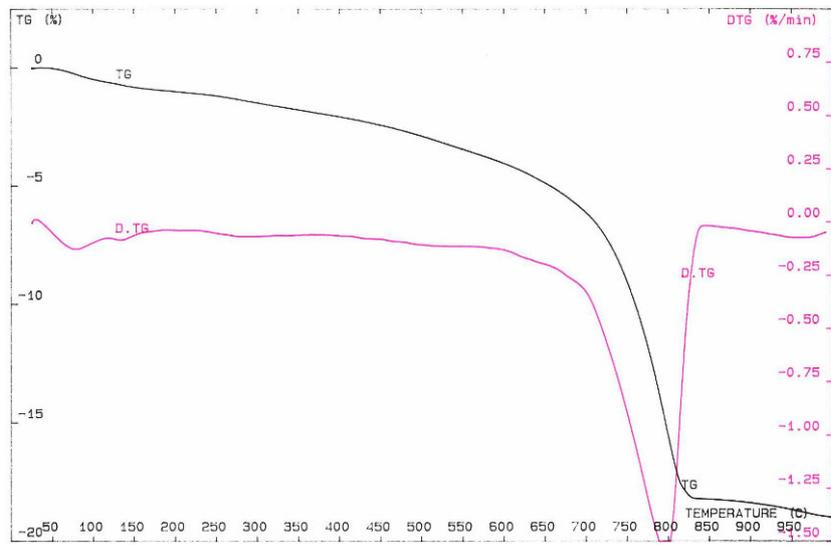
Agregado composto por tufo vulcânico.

Difracção de Raios X

Global (azul) – Calcite, Feldspatos, Piroxenas (augite, diopside), vestígios Halite.

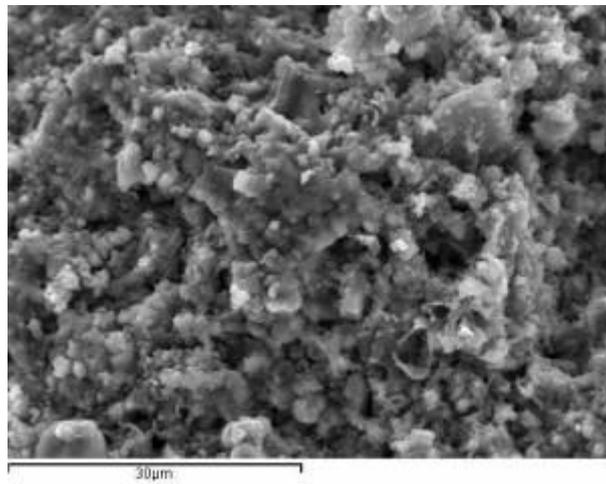
Fracção fina (vermelho) – Calcite, Feldspatos, Halite, vestígios Piroxenas.

Análise Termogravimétrica

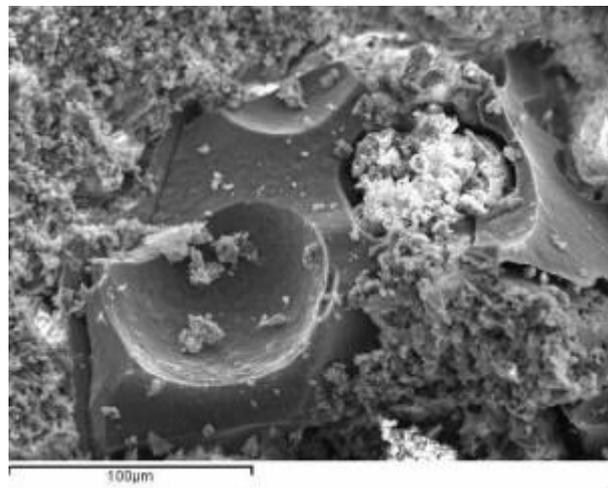
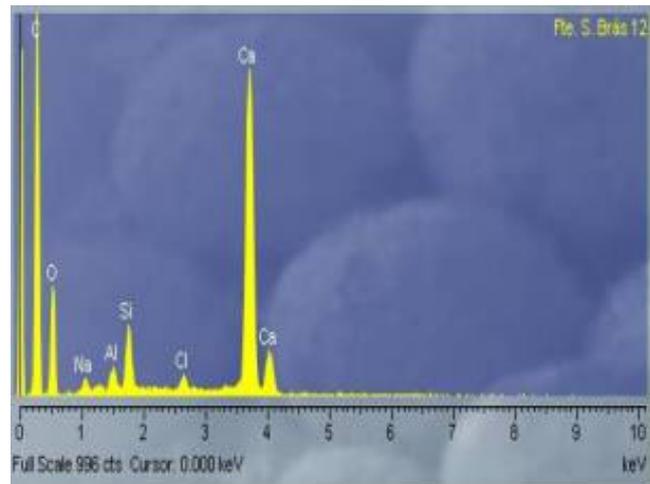


Desidratação e desidroxilação de minerais argilosos até 500°C e descarbonatação do carbonato de cálcio até 900°C.

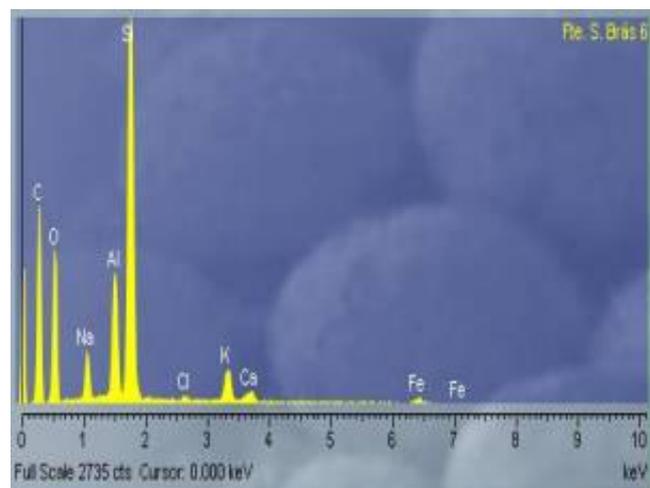
Microscopia Electrónica Varrimento (MEV/EDS)

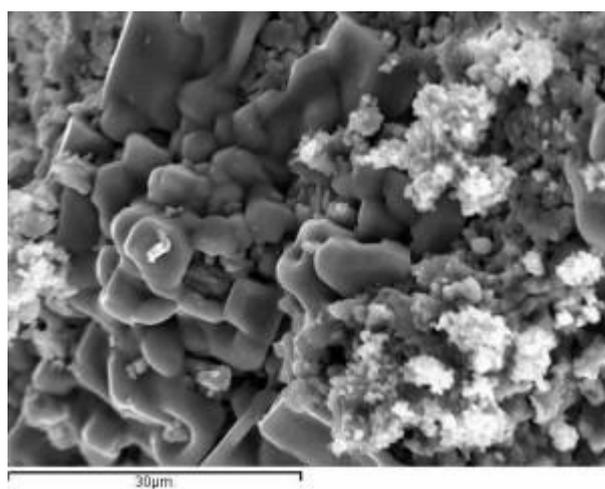


Aspecto da microestrutura.

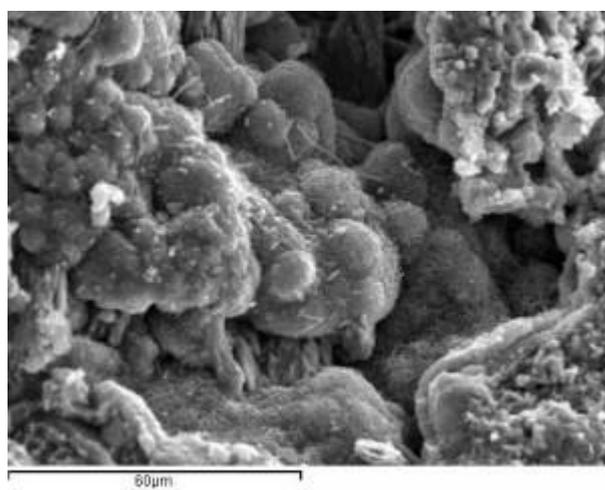


Agregado vítreo de origem vulcânica e EDS correspondente.

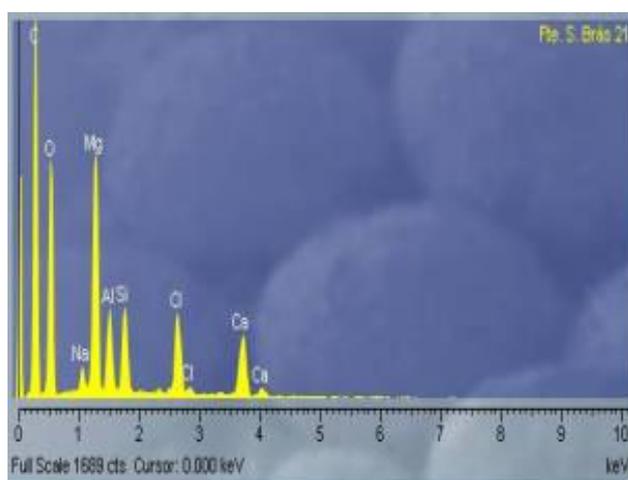


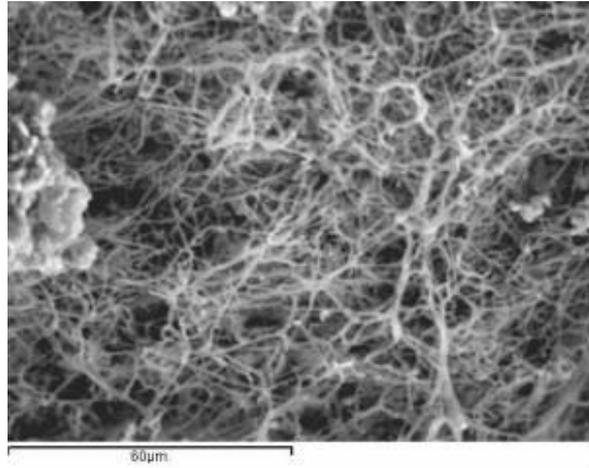


Presença de cloreto de sódio (halite).



Microestrutura apresentando aluminossilicatos de cálcio (EDS).





Filamentos de origem microorgânica.

Ficha 12 - SM7

Amostragem

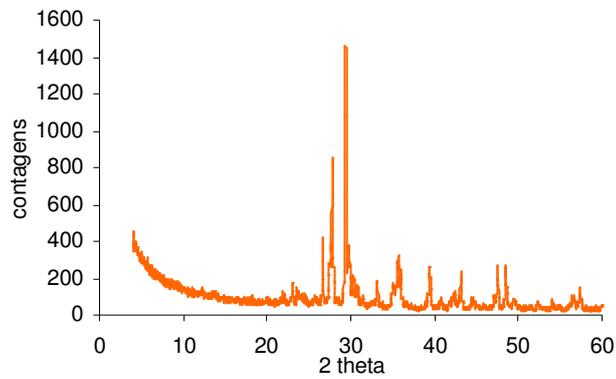


Descrição



Argamassa de cal com predominância de agregado castanho/avermelhado, usualmente designado por bagacina.

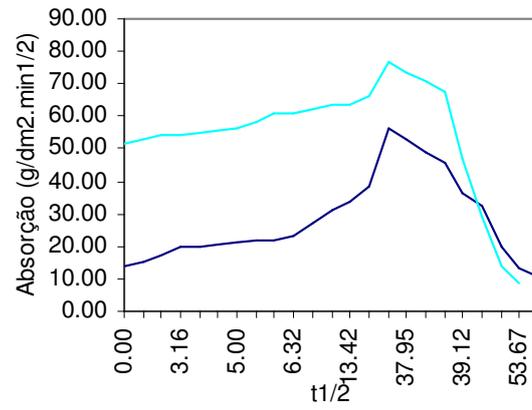
Difração de Raios X



Calcite, feldspatos (anortoclase, plagioclase), piroxenas, hematite
 vestígios quartzo

Composição Química

Fe ₂ O ₃	MnO	TiO ₂	CaO	K ₂ O	P ₂ O ₅	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	P.R.
8.28	0.13	2.36	20.22	1.35	0.36	36.41	10.72	5.32	2.49	12.40

Resistência à compressão $R_c = 2,6\text{MPa}$ **Coefficiente de Capilaridade**Do exterior para o interior: $1,41$
 $\text{g/dm}^2 \cdot \text{min}^{1/2}$ **Absorção e secagem**

Ficha 13 - SM8

Amostragem



Descrição



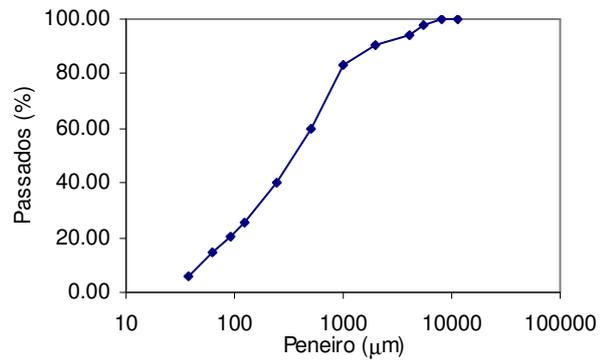
Argamassa terrosa com pó negro e partículas arenosas com coloração castanha/cinza.

Dissolução ácida (ácido clorídrico)

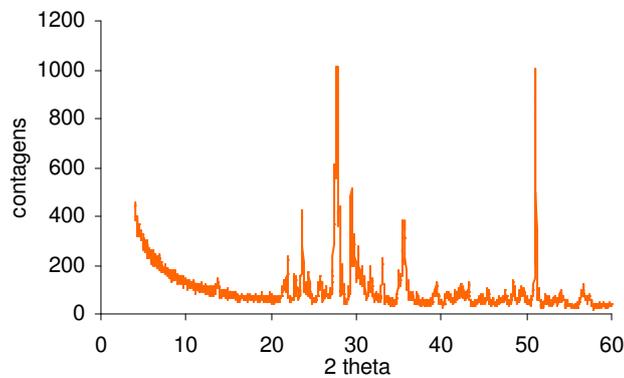
Percentagem solúvel: 21%
Resíduo: 79%

Resíduo composto por pó (silte) castanho e tufo vulcânico.

Análise Granulométrica

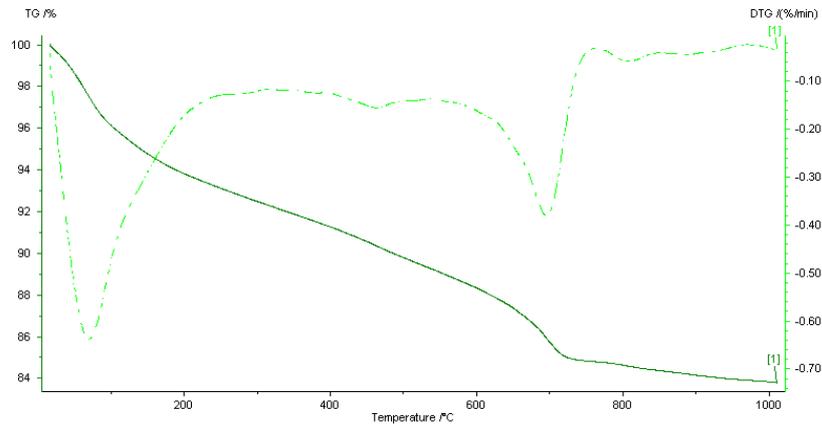


Difracção de Raios X



Calcite, feldspatos (anortoclase, plagioclase, feldspato potássico), halite, hematite, augite

Análise Termogravimétrica



Desidratação e desidroxilação de minerais argilosos e/ou compostos hidráulicos até 550°C e descarbonatação de carbonatos (pico a cerca de 700°C correspondente a 4,2%).

Composição Química

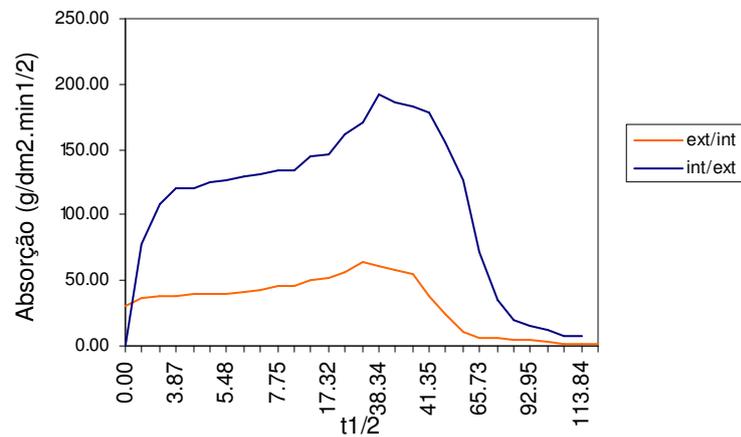
Fe ₂ O ₃	MnO	TiO ₂	CaO	K ₂ O	P ₂ O ₅	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	P.R.
8.36	0.16	3.46	10.35	2.48	0.76	43.32	14.65	4.02	5.42	7.40

Absorção e secagem

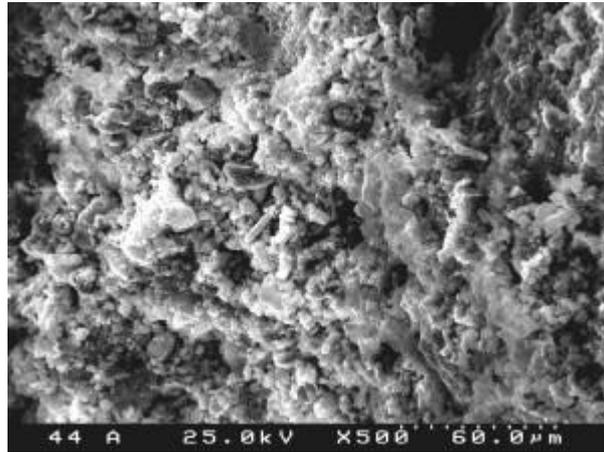
Coefficiente de Capilaridade

Do exterior para o interior:
11,99 g/dm².min^{1/2}.

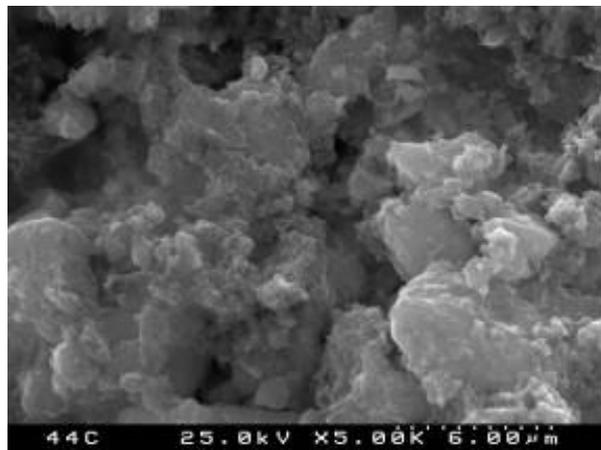
Do interior para o exterior:
37,42 g/dm².min^{1/2}



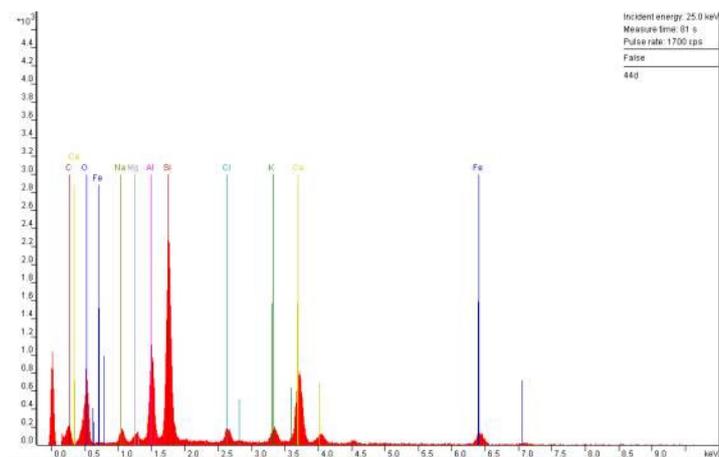
Microscopia Electrónica Varrimento
(MEV/EDS)



Morfologia geral



Ampliação morfologia geral argamassa.



Ficha 14 - SM9

Amostragem



Descrição



Argamassa extremamente terrosa com agregado composto por partículas escuras

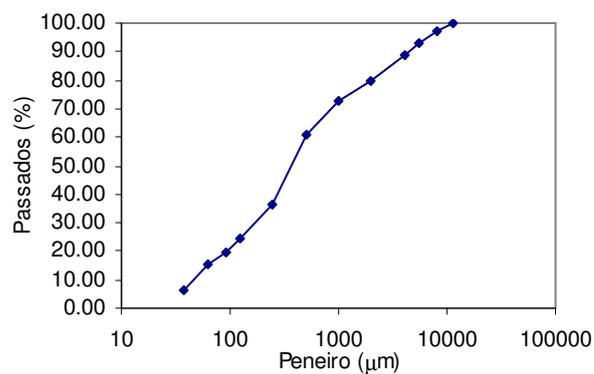
Dissolução ácida (ácido clorídrico)

Percentagem solúvel: 37%

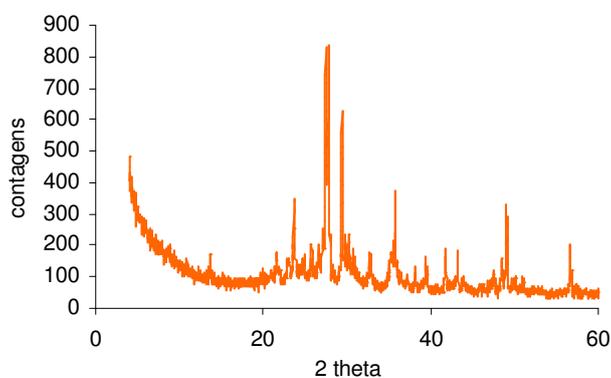
Resíduo: 63%

Resíduo composto por pó (silte) castanho e agregado basáltico.

Análise Granulométrica

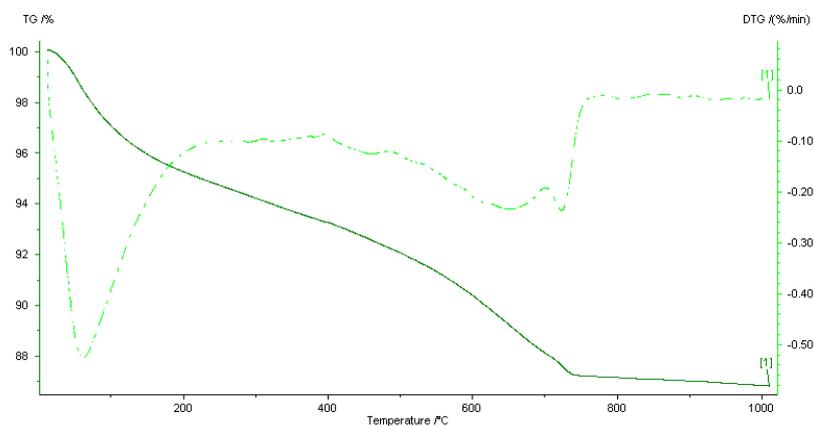


Difracção de Raios X



Feldspatos (anort., plag.), calcite, piroxena (diópsido), quartzo, magnesite

Análise Termogravimétrica



Desidratação e desidroxilação de minerais argilosos e/ou compostos hidráulicos até aos 500°C e decarbonatação de carbonatos (picos entre 500°C e 800°C correspondentes a 5,0%).

Composição Química

Fe ₂ O ₃	MnO	TiO ₂	CaO	K ₂ O	P ₂ O ₅	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	P.R.
7.00	0.18	1.80	12.49	2.57	0.26	43.61	14.94	3.16	3.54	10.40

Ficha 15 - SM10**Amostragem****Descrição**

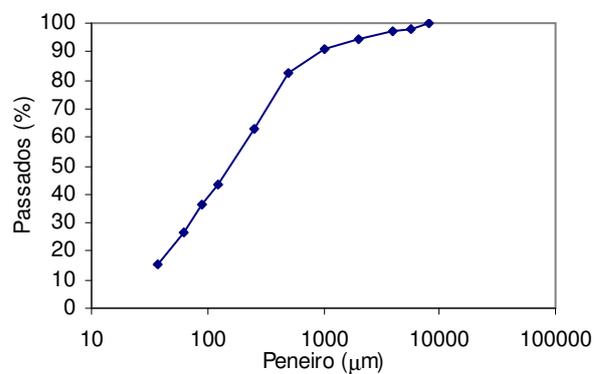
Argamassa terrosa com partículas arenosas castanho/cinza com dimensão inferior a 1cm e contendo grãos de cal

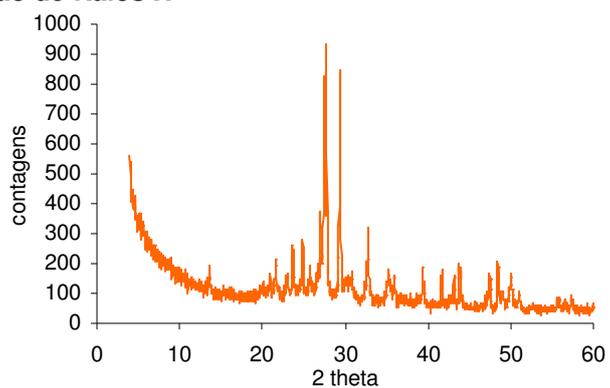
Dissolução ácida (ácido clorídrico)

Percentagem solúvel: 23%

Resíduo: 77%

Resíduo composto por agregado basáltico, tufo vulcânico e silte castanho claro, similar à pozolana.

Análise Granulométrica

Difracção de Raios X

Feldspatos (anortoclase, feldspato potássico, plagioclase), piroxenas (diopsido), quartzo, mica/ilite

Composição Química

Fe ₂ O ₃	MnO	TiO ₂	CaO	K ₂ O	P ₂ O ₅	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	P.R.
5.53	0.17	1.23	13.96	2.52	0.12	42.36	15.38	1.57	2.71	13.40

Ficha 16 - SM11**Amostragem****Descrição**

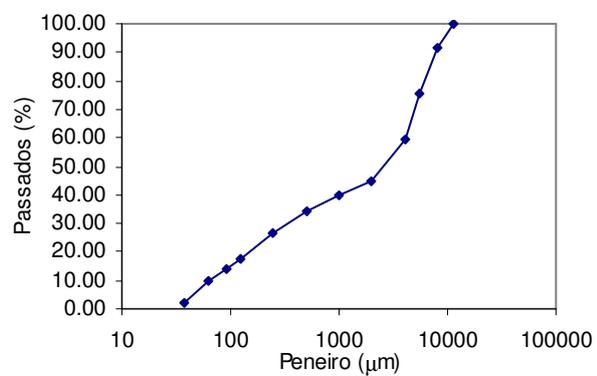
Argamassa terrosa com partículas arenosas de cor negra, angulosas e com dimensão inferior a 1cm; contém grãos de cal.

Dissolução ácida (ácido clorídrico)

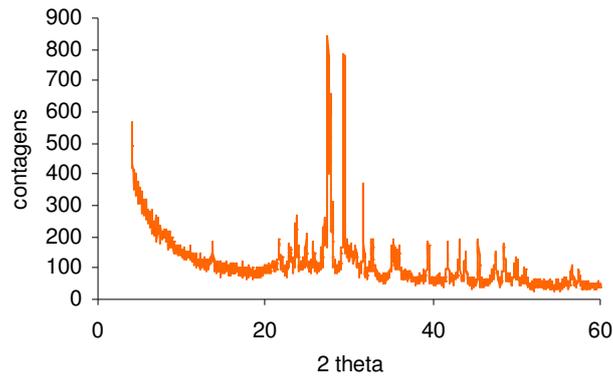
Percentagem solúvel: 37%

Resíduo: 63%

Resíduo composto por tufo vulcânico e silte castanho claro, similar à pozolana.

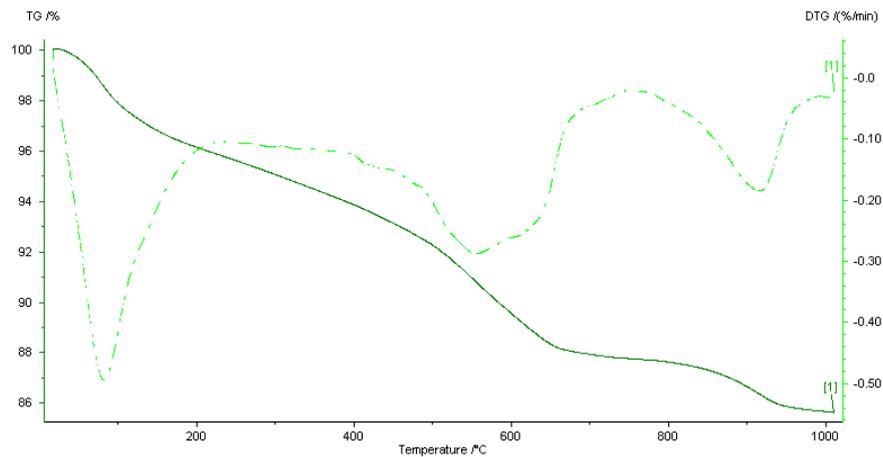
Análise Granulométrica

Difracção de Raios X



Calcite, feldspatos (anortoclase, plagioclase), piroxena (diopsido), magnesite, halite, quartzo

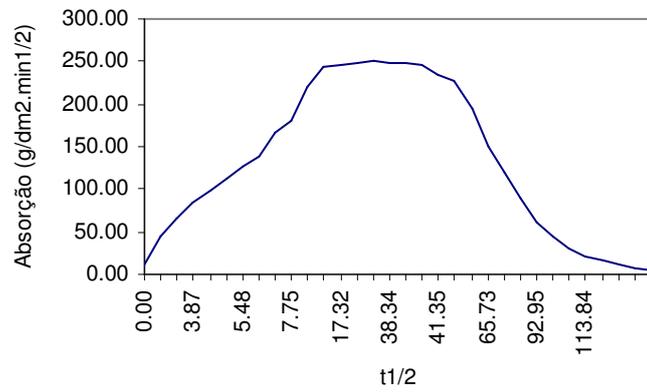
Análise Termogravimétrica



Desidratação e desidroxilação de minerais argilosos e/ou compostos hidráulicos até aos 500°C e decarbonatação de carbonatos (dois picos entre 500°C e 1000°C correspondentes a 5,0%).

Composição Química

Fe ₂ O ₃	MnO	TiO ₂	CaO	K ₂ O	P ₂ O ₅	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	P.R.
7.07	0.16	1.83	12.92	2.35	0.32	41.04	13.76	3.62	4.27	11.90

Resistência à compressão $R_c = 0,3 \text{ MPa}$ **Coefficiente de Capilaridade**Do exterior para o interior: $24,15 \text{ g/dm}^2 \cdot \text{min}^{1/2}$ **Absorção e secagem**

Ficha 17 - SM12

Amostragem



Descrição



Argamassa terrosa com vestígios de grãos de cal e contendo agregado de cor clara (cinza/castanho), anguloso e com dimensões variadas mas inferiores a 1cm. Colonização biológica.

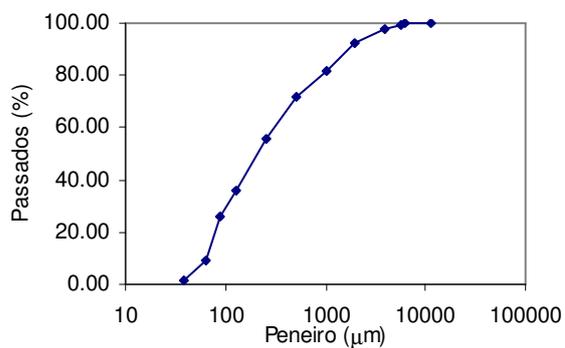
Dissolução ácida (ácido clorídrico)

Percentagem solúvel: 25%

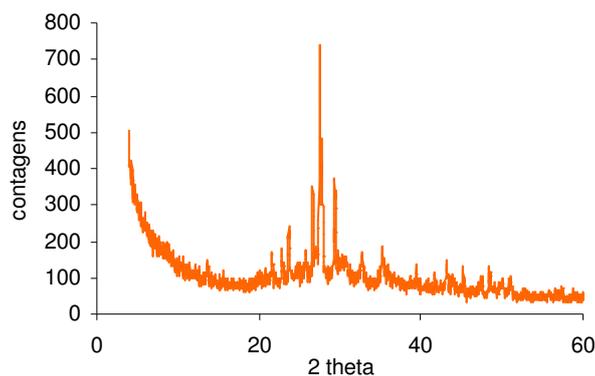
Resíduo: 75%

Resíduo composto por pó (silte) castanho e tufo vulcânico.

Análise Granulométrica

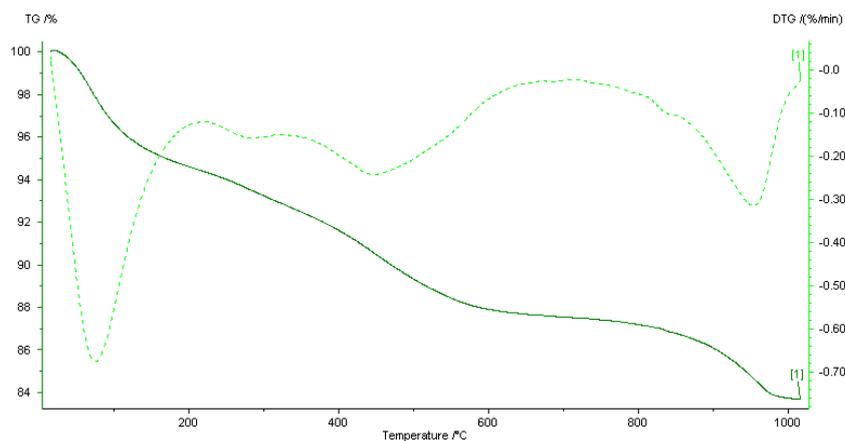


Difracção de Raios X



Feldspatos (anortoclase, plagioclase), calcite, magnesite, quartzo

Análise Termogravimétrica



Desidratação e desidroxilação de minerais argilosos e/ou compostos hidráulicos até aos 700°C e decarbonatação de carbonatos (dois picos entre 700°C e 1000°C correspondentes a 4,0%).

Composição Química

Fe ₂ O ₃	MnO	TiO ₂	CaO	K ₂ O	P ₂ O ₅	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	P.R.
5.19	0.17	1.17	9.10	3.00	0.16	42.74	15.44	1.62	7.08	14.50

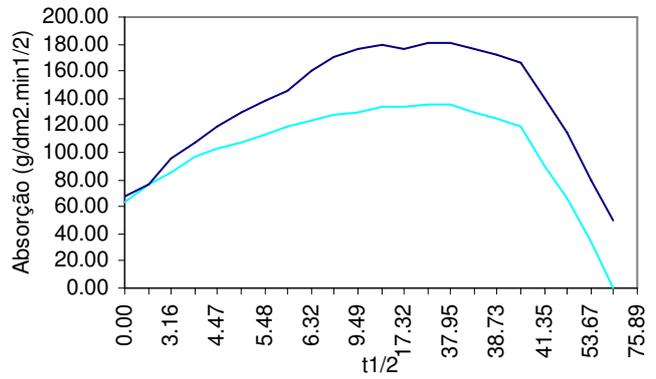
Resistência à compressão

$R_c = 0,6 \text{ MPa}$

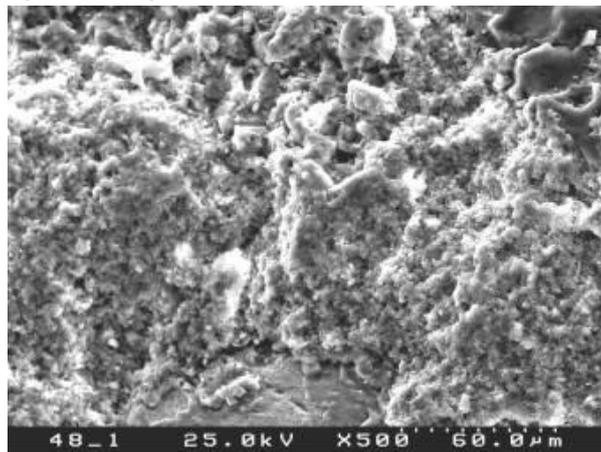
Coefficiente de Capilaridade

Do exterior para o interior: $6,97 \text{ g/dm}^2 \cdot \text{min}^{1/2}$

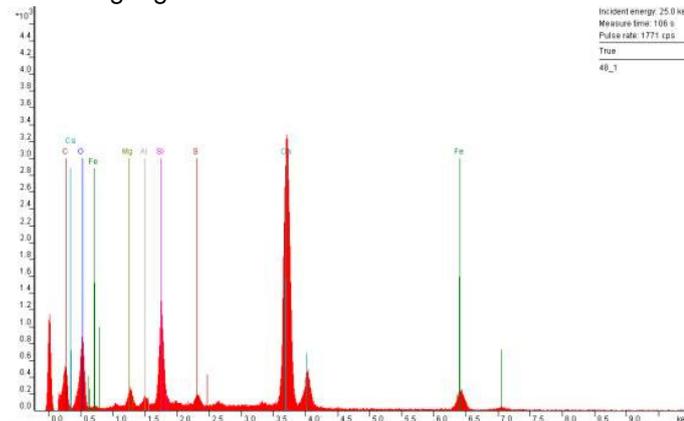
Absorção e secagem

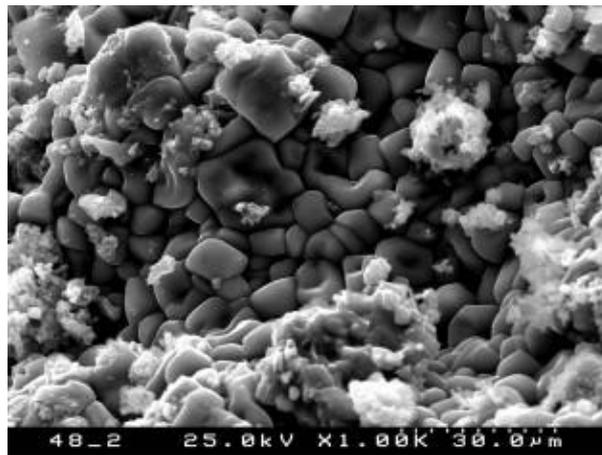


Microscopia Electrónica Varrimento (MEV/EDS)



Morfologia geral.





Presença de cloreto de sódio (halite).

Ficha 18 - SM13

Amostragem



Descrição



Duas camadas; camada exterior (barramento) composta por cal e pó negro; camada interior cinza com pó negro, com pequenos grãos de cal.

Dissolução ácida (ácido clorídrico)

Camada exterior:

Percentagem solúvel: 54%

Resíduo: 46%

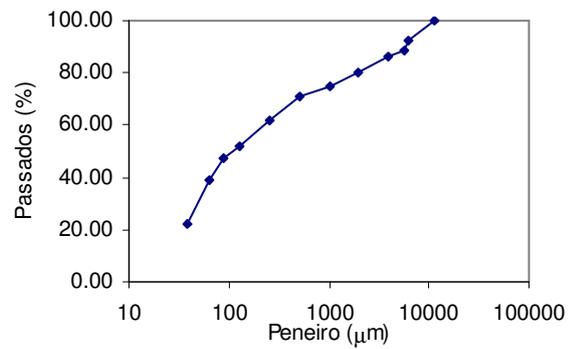
Camada interior:

Percentagem solúvel: 50%

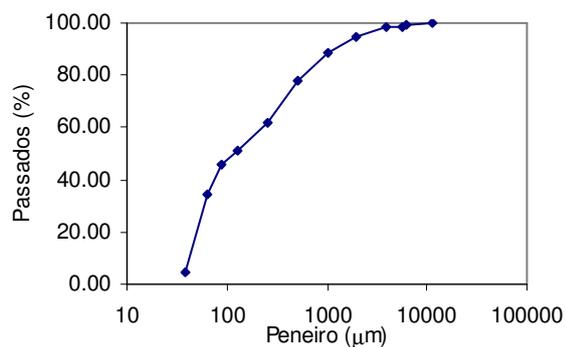
Resíduo: 50%

Análise Granulométrica

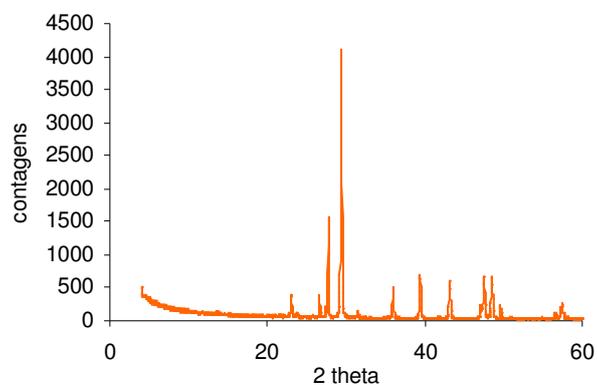
(camada exterior/camada interior)



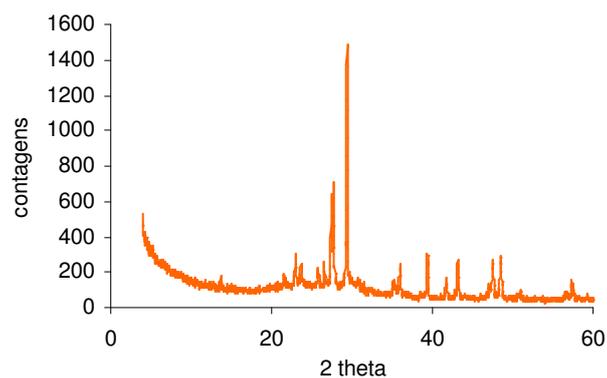
Agregado composto por pó negro (silte) e tufo vulcânico em ambas as camadas.



Difracção de Raios X (Ext/Int)



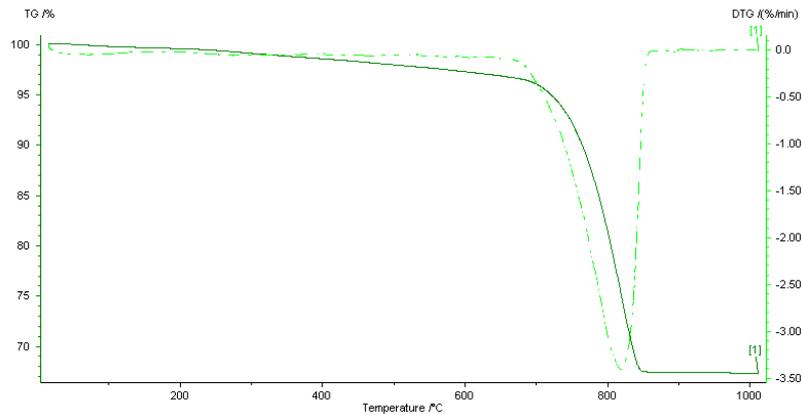
Calcite, feldspato potássico, plagioclase, quartzo.



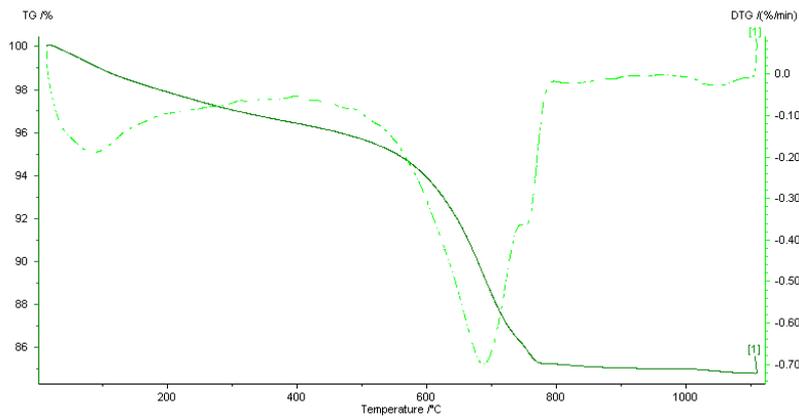
Calcite, anortoclase, feldspato potássico, quartzo

Análise Termogravimétrica

Camada exterior



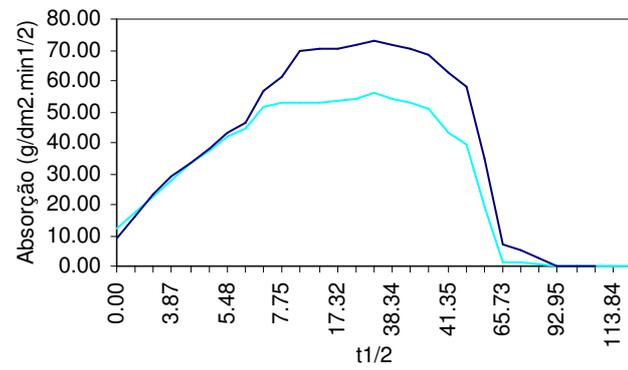
Desidratação e desidroxilação de minerais argilosos e/ou de compostos hidráulicos até aos 600°C e decarbonatação de carbonatos (pico a cerca de 820°C correspondente a 30,5%).



Desidratação e desidroxilação de minerais argilosos e/ou de compostos hidráulicos até aos 550°C e decarbonatação de carbonatos (pico duplo a cerca de 680°C correspondente a 10,7%).

Composição Química (Ext/Int)

Fe ₂ O ₃	MnO	TiO ₂	CaO	K ₂ O	P ₂ O ₅	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	P.R.
1.05	0.06	0.22	40.45	1.43	0.07	17.06	4.78	0.51	1.83	32.70
3.31	0.17	0.59	12.24	4.26	0.11	47.74	13.93	0.61	4.87	11.50

Resistência à compressão $R_c = 1,8 \text{ MPa}$ **Coefficiente de Capilaridade**Do exterior para o interior: $6,06 \text{ g/dm}^2 \cdot \text{min}^{1/2}$ **Absorção e secagem**

Ficha 19 - SM14

Amostragem



Descrição



Argamassa composta por duas camadas; camada exterior (barramento de cal) com 1 a 2mm, com colonização biológica; camada interior cinza. Vestígios de pigmentação vermelha (fingidos laterais).

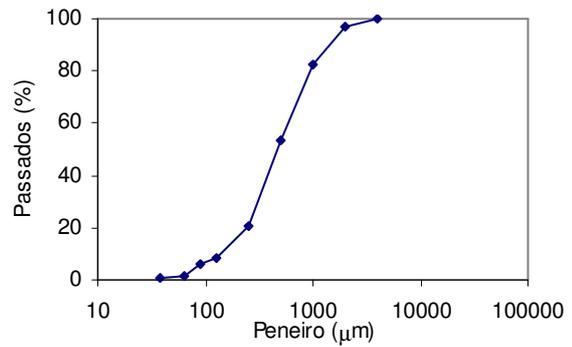
Dissolução ácida (ácido clorídrico)

Percentagem solúvel: 53%

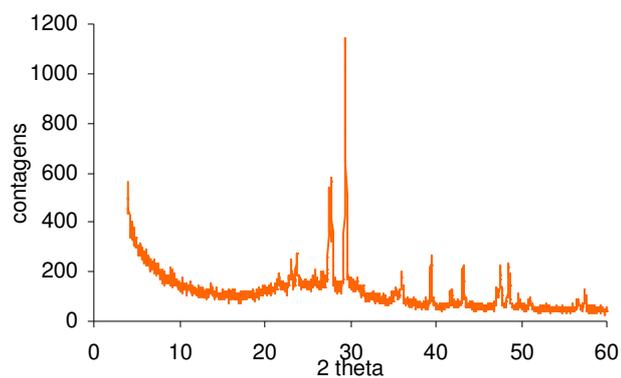
Resíduo: 47%

Agregado composto por pó negro (silte) e tufo vulcânico.

Análise Granulométrica

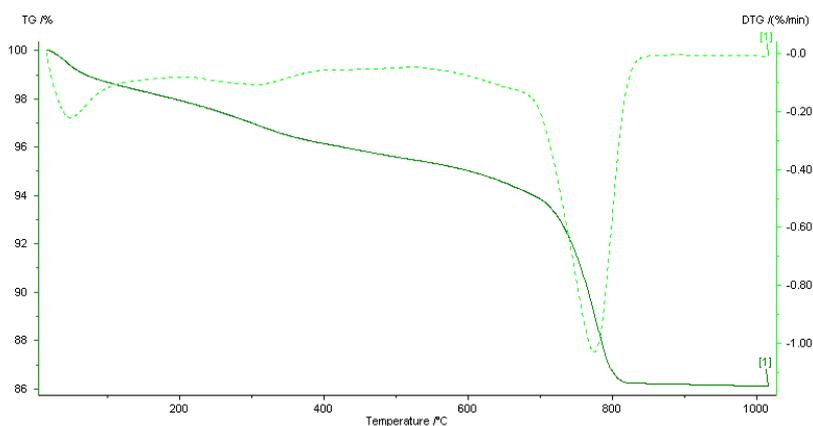


Difracção de Raios X



Calcite, feldspatos (anortoclase, feldspato potássico), halite, mica/ilite

Análise Termogravimétrica



Desidratação e desidroxilação de minerais argilosos e/ou compostos hidráulicos até aos 600°C e decarbonatação de carbonatos (pico a cerca de 790°C correspondente a 8,8%).

Composição Química

Fe ₂ O ₃	MnO	TiO ₂	CaO	K ₂ O	P ₂ O ₅	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	P.R.
3.11	0.16	0.49	15.33	3.87	0.17	43.53	12.33	0.79	4.59	14.60

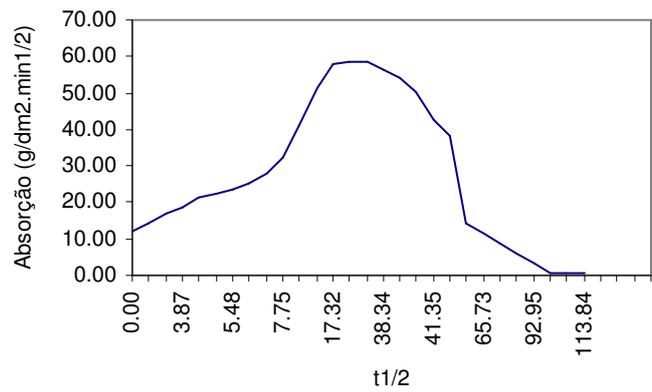
Resistência à compressão

$R_c = 2,0 \text{ MPa}$

Coefficiente de Capilaridade

Do exterior para o interior: $3,75 \text{ g/dm}^2 \cdot \text{min}^{1/2}$

Absorção e secagem



Ficha 20 - SM15**Amostragem****Descrição**

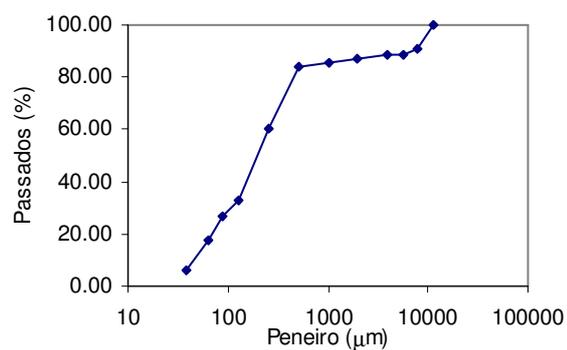
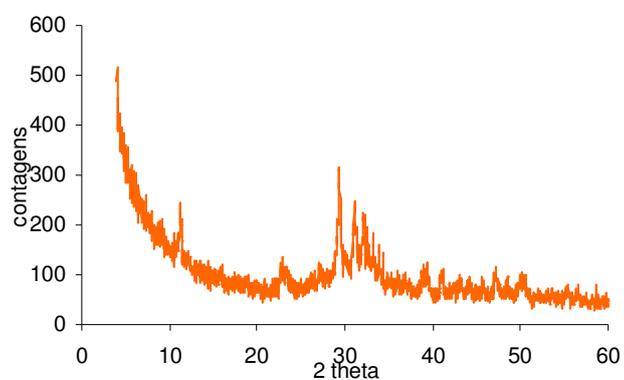
Argamassa muito compacta de cor cinza, com agregado fino.

Dissolução ácida (ácido clorídrico)

Percentagem solúvel: 59%

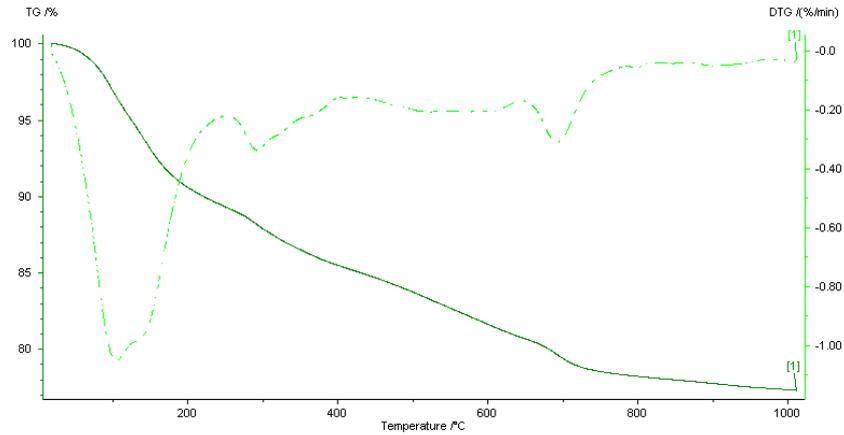
Resíduo: 41%

Resíduo composto por pó claro.

Análise Granulométrica**Difracção de Raios X**

Calcite, feldspato, mica/ilite

Análise Termogravimétrica



Desidratação e desidroxilação de minerais argilosos e/ou compostos hidráulicos até aos 600°C e decarbonatação de carbonatos (pico a cerca de 700°C correspondente a 4,5%).

Composição Química

Fe ₂ O ₃	MnO	TiO ₂	CaO	K ₂ O	P ₂ O ₅	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	P.R.
3.30	0.06	0.37	42.27	0.09	0.20	20.56	7.18	1.45	1.09	18.40

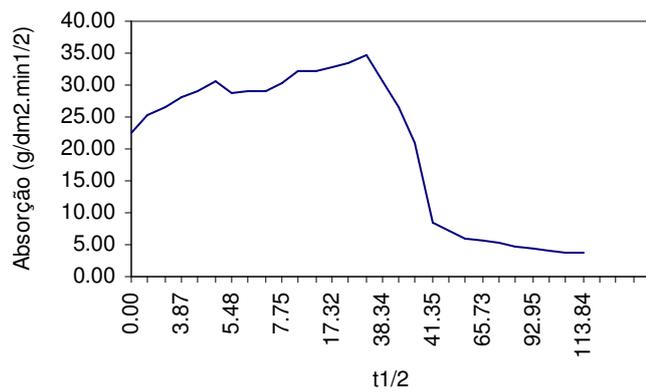
Resistência à compressão

R_c = 0,9 MPa

Coefficiente de Capilaridade

Do exterior para o interior: 0,88 g/dm².min^{1/2}

Absorção e secagem



Ficha 21 - SM 16**Amostragem****Descrição**

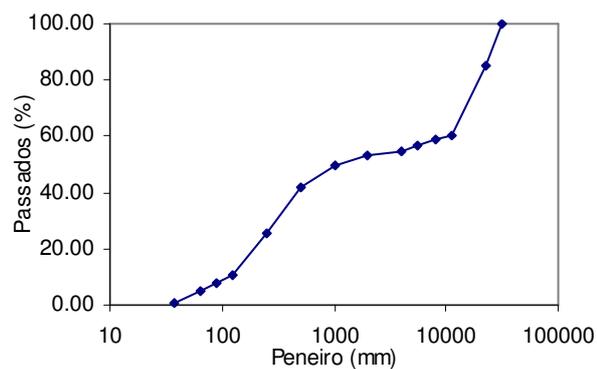
Argamassa de cal contendo tufo vulcânico com dimensão até 3cm.

Dissolução ácida (ácido clorídrico)

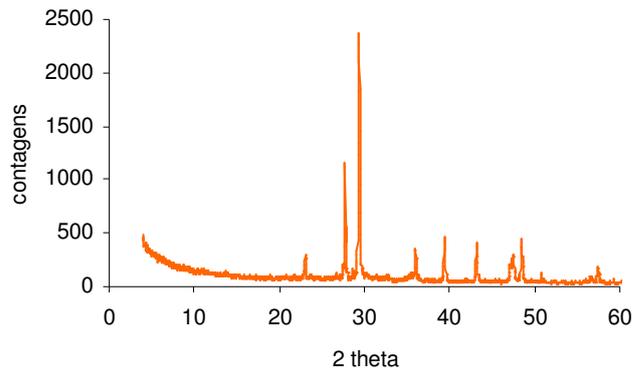
Percentagem solúvel: 27%

Resíduo: 73%

Resíduo composto fundamentalmente por tufo vulcânico de dimensões superiores a 1cm e pó cinza/acastanhado com algumas partículas de dimensão intermédia.

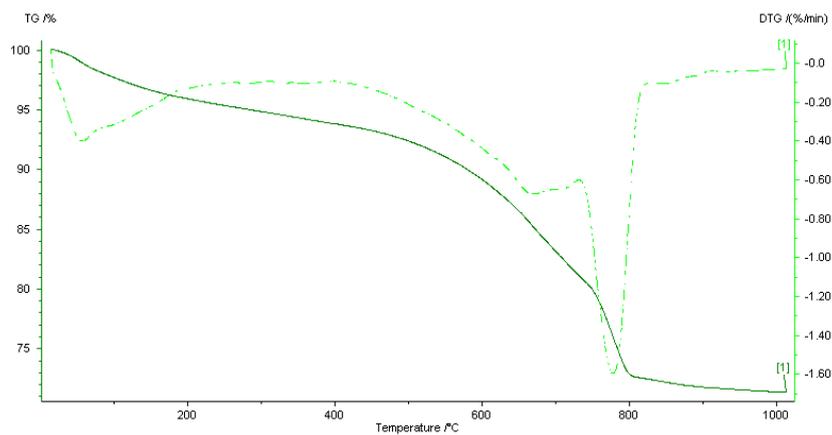
Análise Granulométrica

Difração de Raios X



Calcite, feldspato potássico

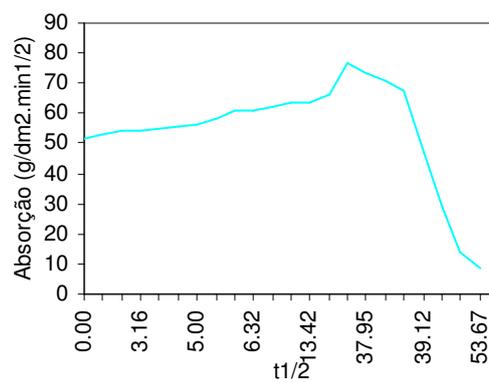
Análise Termogravimétrica



Desidratação e desidroxilação de minerais argilosos e/ou compostos hidráulicos até aos 550°C e decarbonatação de carbonatos (picos a cerca de 650°C e 790°C correspondente a 21,0%).

Composição Química

Fe ₂ O ₃	MnO	TiO ₂	CaO	K ₂ O	P ₂ O ₅	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	P.R.
4.36	0.11	1.09	26.61	1.22	0.23	26.52	9.11	4.59	2.96	22.7

Resistência à compressão $R_c = 2,9\text{MPa}$ **Coefficiente de Capilaridade**Do exterior para o interior: $1,25$
 $\text{g/dm}^2 \cdot \text{min}^{1/2}$ **Absorção e secagem**

Ficha 22 - CON1

Amostragem



Descrição



Argamassa com várias camadas. Camada exterior composta por barramento de 3 camadas brancas de 1mm cada. Camada interior branca com partículas de cerâmica vermelha pequenas, até 5mm.

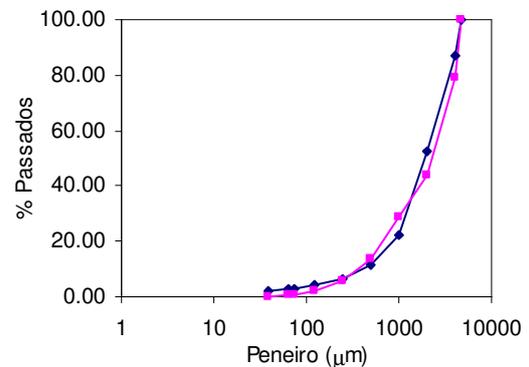
Dissolução ácida (ácido acético)

Percentagem solúvel: 30%

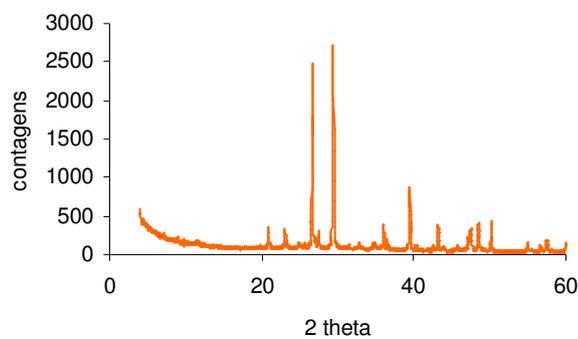
Resíduo: 70%

Resíduo composto por areia siliciosa e fragmentos cerâmicos

Análise Granulométrica

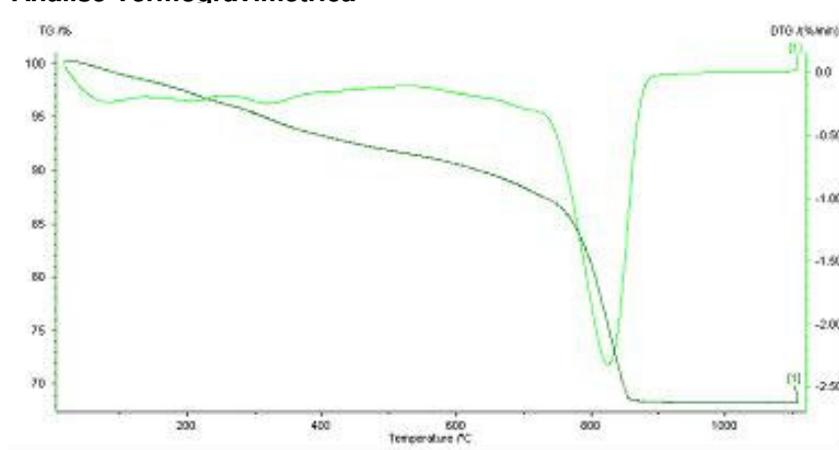


Difracção de Raios X



Calcite, quartzo, feldspatos potássicos, filossilicatos, magnesite, anidrite, gesso, halite, zeólitos, dolomite, vestígios de pirite.

Análise Termogravimétrica



Perdas iniciais devido à desidratação e desidroxilação de minerais argilosos e descarbonatação de carbonatos (pico principal correspondente a 20,0%).

Composição Química

Fe ₂ O ₃	MnO	TiO ₂	CaO	K ₂ O	P ₂ O ₅	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	P.R.
2,29	0,03	0,34	20,32	1,16	0,32	35,48	8,93	2,51	0,69	21,06

Resistência à compressão

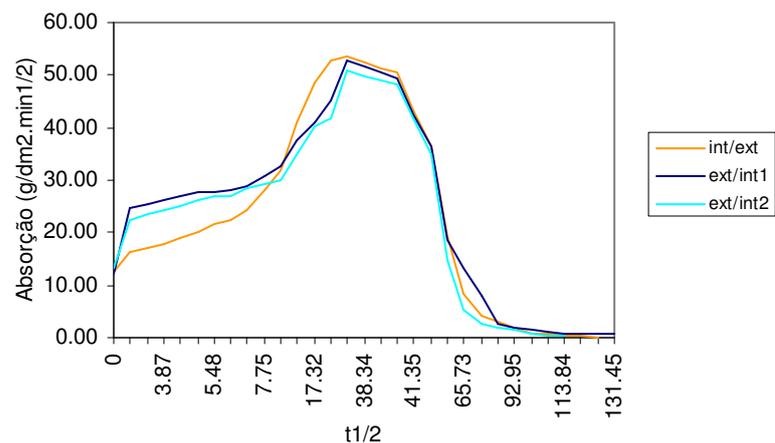
$R_c = 2,4\text{MPa}$

Coefficiente de Capilaridade

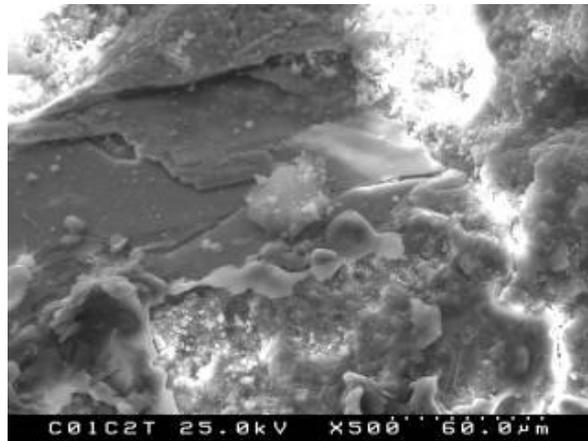
Do exterior para o interior: $1,05\text{ g/dm}^2 \cdot \text{min}^{1/2}$

Do interior para o exterior: $0,24\text{ g/dm}^2 \cdot \text{min}^{1/2}$

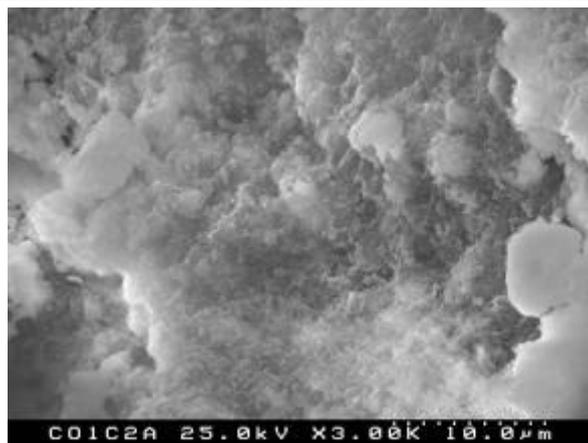
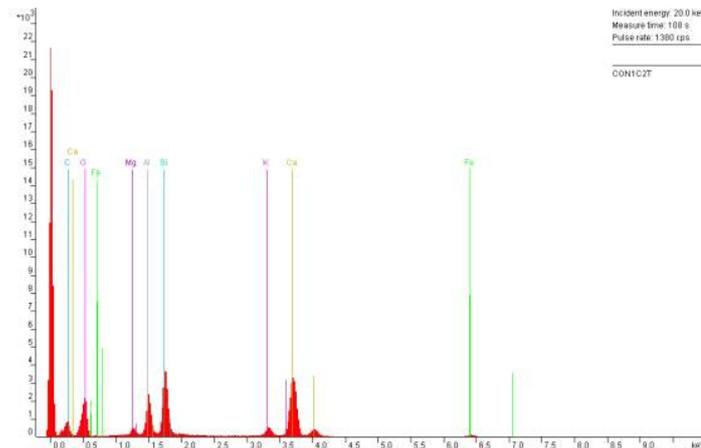
Absorção e secagem



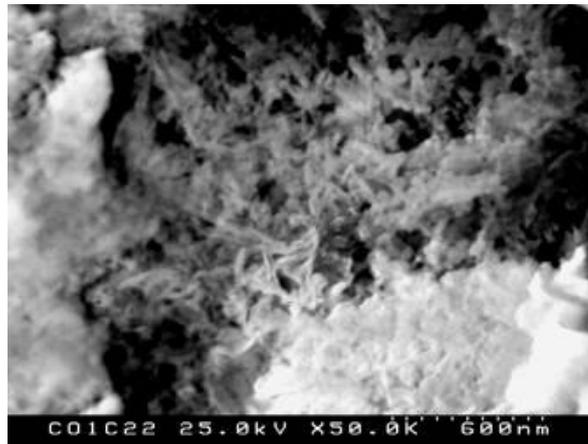
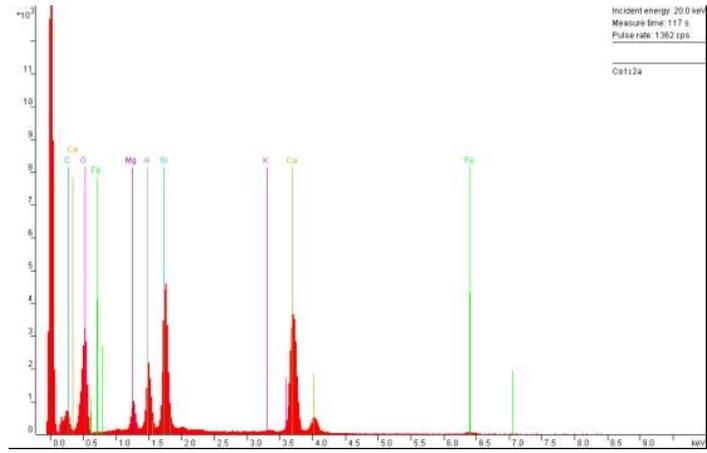
Microscopia Electrónica Varrimento (MEV/EDS)



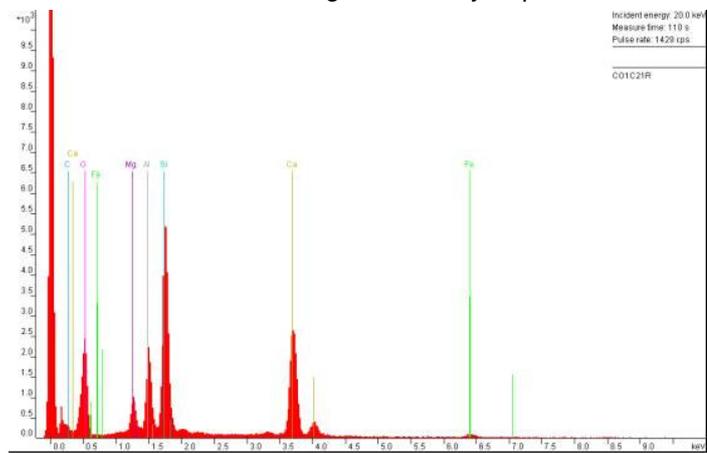
Morfologia geral da argamassa incorporando fragmento de tijolo.



Morfologia da zona de ligante com maior ampliação.



Pormenor da interface fragmento de tijolo/pasta.



Ficha 23 - CON2**Amostragem****Descrição**

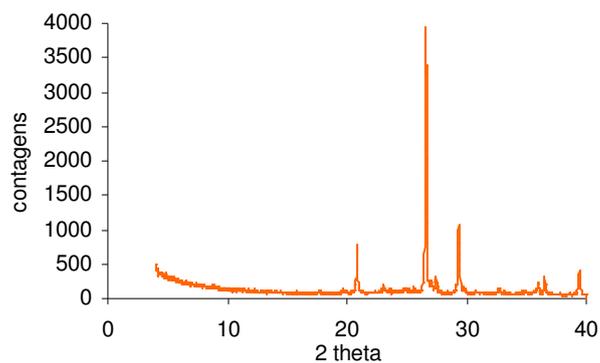
Argamassa tipo *opus signinum*, uniforme, com partículas de cerâmica vermelha até 5mm.

Dissolução ácida (ácido acético)

Percentagem solúvel: 29%

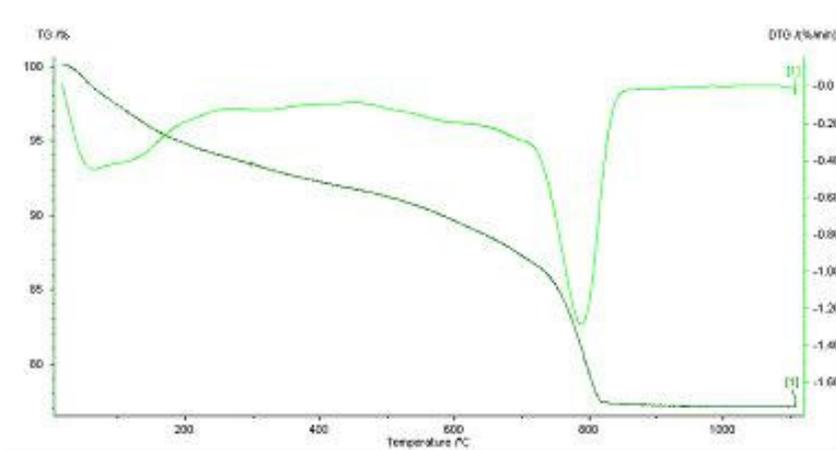
Resíduo: 71%

Resíduo composto por areia siliciosa e fragmentos cerâmicos.

Difracção de Raios X

Quartzo, calcite, filossilicatos, magnesite, feldspatos potássicos, anidrite, dolomite, halite, pirite, zeólitos.

Análise Termogravimétrica



Perdas iniciais devido à desidratação e desidroxilação de minerais argilosos e descarbonatação de carbonatos (pico principal correspondente a 10,5%).

Composição Química

Fe ₂ O ₃	MnO	TiO ₂	CaO	K ₂ O	P ₂ O ₅	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	P.R.
3,59	0,02	0,63	12,95	1,36	0,35	51,21	11,31	1,46	0,58	14,48

Resistência à compressão

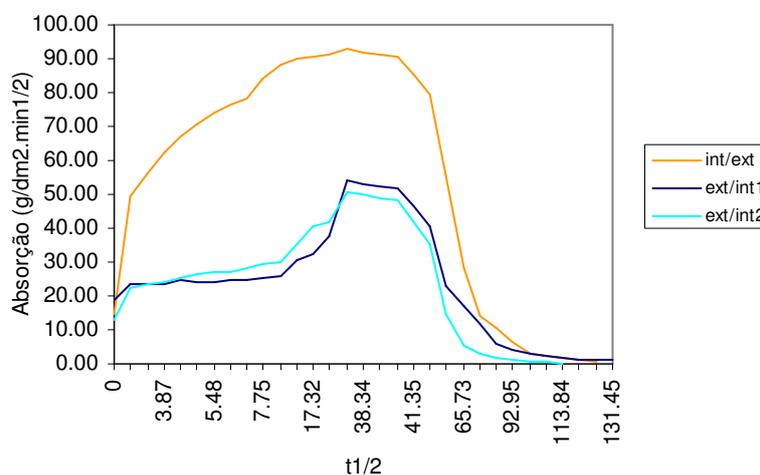
$R_c = 2,0\text{MPa}$

Coefficiente de Capilaridade

Do exterior para o interior: $0,36\text{ g/dm}^2 \cdot \text{min}^{1/2}$

Do interior para o exterior: $4,97\text{ g/dm}^2 \cdot \text{min}^{1/2}$

Absorção e secagem



Ficha 24 - CON3

Amostragem



Descrição



Argamassa *opus signinum* com partículas cerâmicas de dimensão e forma variada e coberta por colonização biológica.

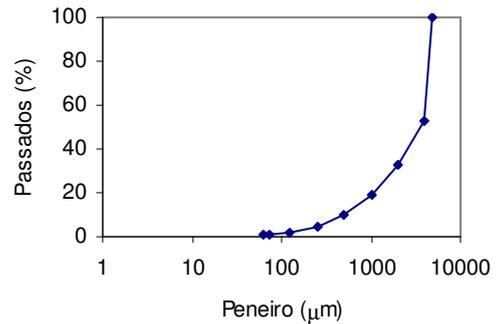
Dissolução ácida (ácido acético)

Percentagem solúvel: 20%

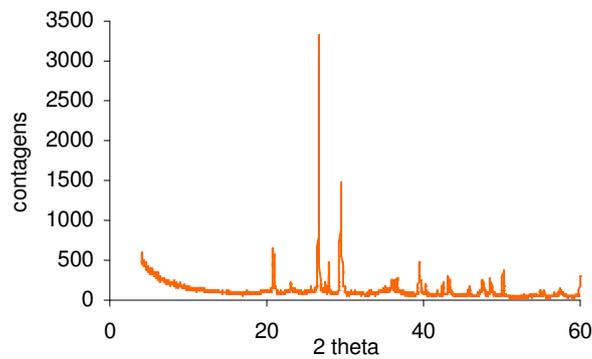
Resíduo: 80%

Resíduo composto por areia siliciosa e fragmentos cerâmicos.

Análise Granulométrica

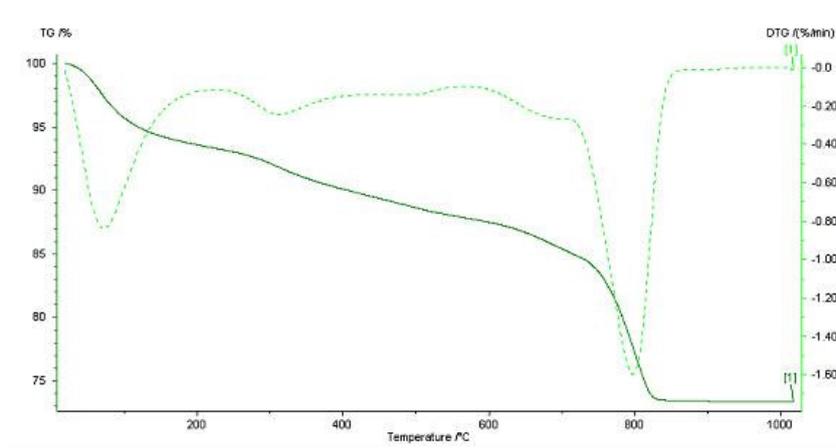


Difração de Raios X



Quartzo, calcite, plagioclase, filossilicatos, feldspatos potássicos, magnesite, anidrite, halite, dolomite.

Análise Termogravimétrica



Perdas iniciais devido à desidratação e desidroxilação de minerais argilosos e descarbonatação de carbonatos (pico principal correspondente a 14,0%).

Composição Química

Fe ₂ O ₃	MnO	TiO ₂	CaO	K ₂ O	P ₂ O ₅	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	P.R.
3,88	0,05	0,57	12,05	0,94	0,26	42,61	10,87	4,66	0,38	15,67

Resistência à compressão

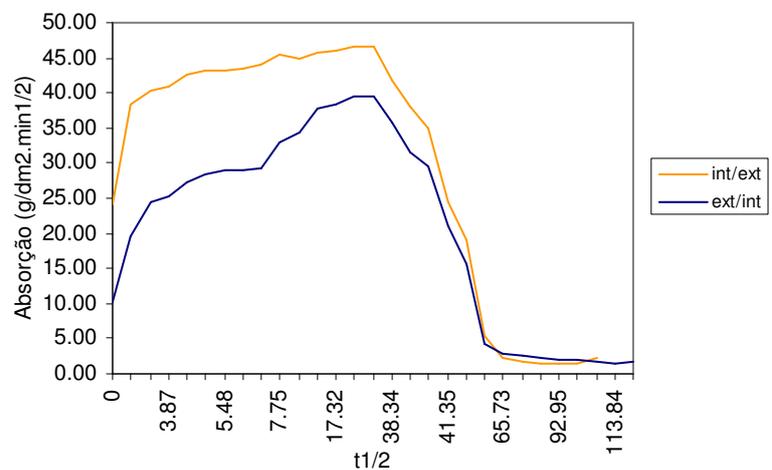
$R_c = 4,5\text{MPa}$

Coefficiente de Capilaridade

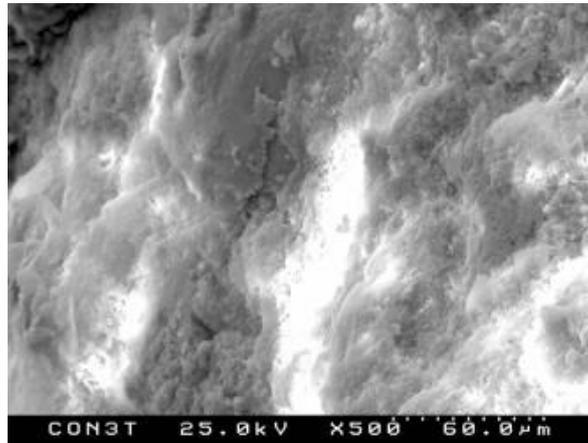
Do exterior para o interior: $1,58\text{ g/dm}^2 \cdot \text{min}^{1/2}$

Do interior para o exterior: $0,72\text{ g/dm}^2 \cdot \text{min}^{1/2}$

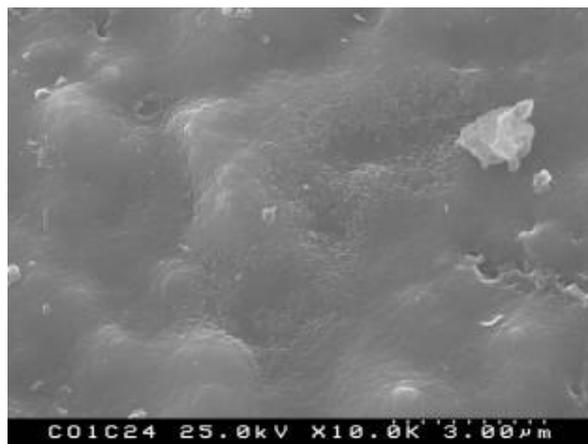
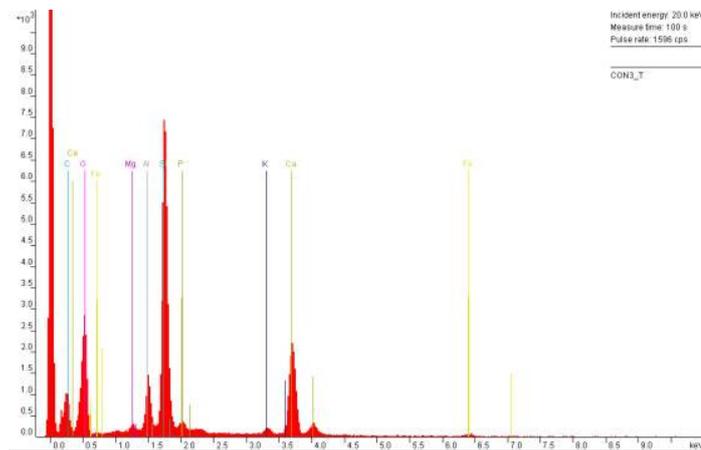
Absorção e secagem



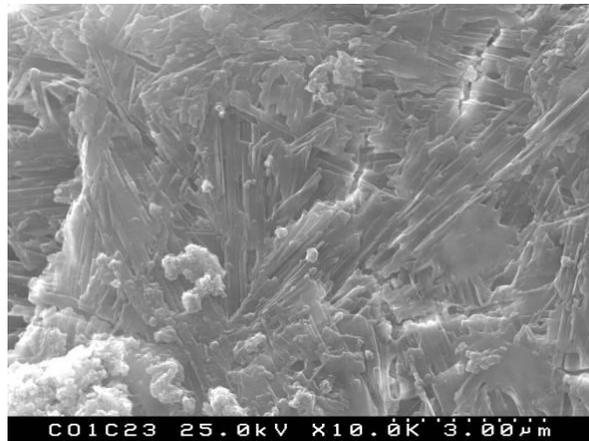
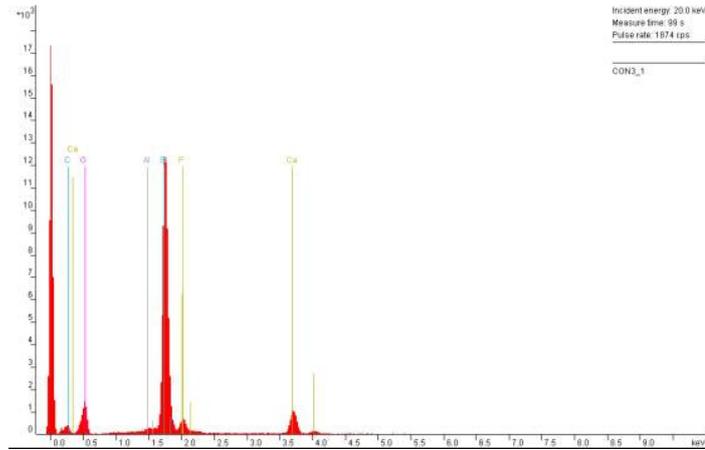
Microscopia Electrónica Varrimento (MEV/EDS)



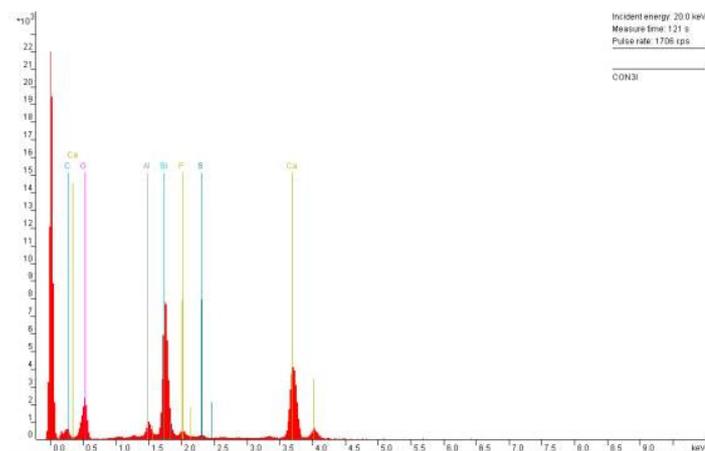
Aspecto geral da argamassa com fragmento de tijolo.



Presença de gel (aluminossilicato de cálcio) na argamassa.



Estruturas de silicatos de calcite re-cristalizada na interface tijolo/pasta.



Ficha 25 - CON4

Amostragem



Descrição



Opus signinum uniforme com profusão de partículas de cerâmica até 5mm.

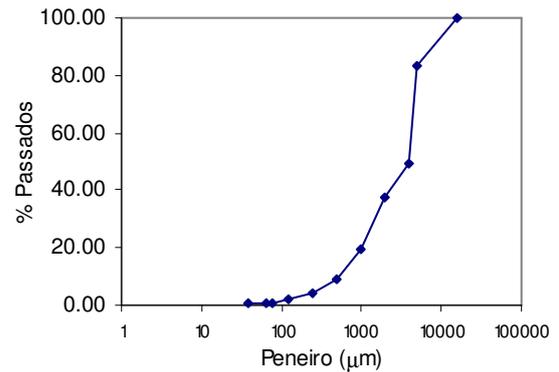
Dissolução ácida (ácido acético)

Percentagem solúvel: 19%

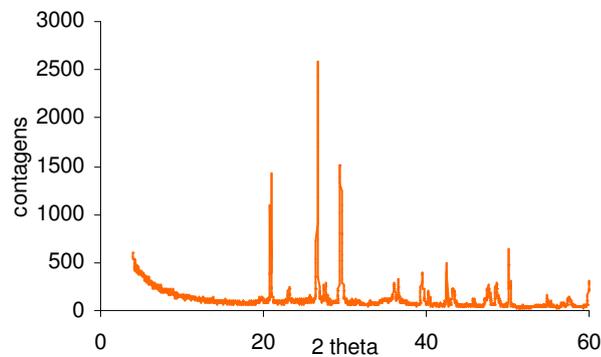
Resíduo: 81%

Resíduo composto por areia siliciosa e fragmentos cerâmicos.

Análise Granulométrica

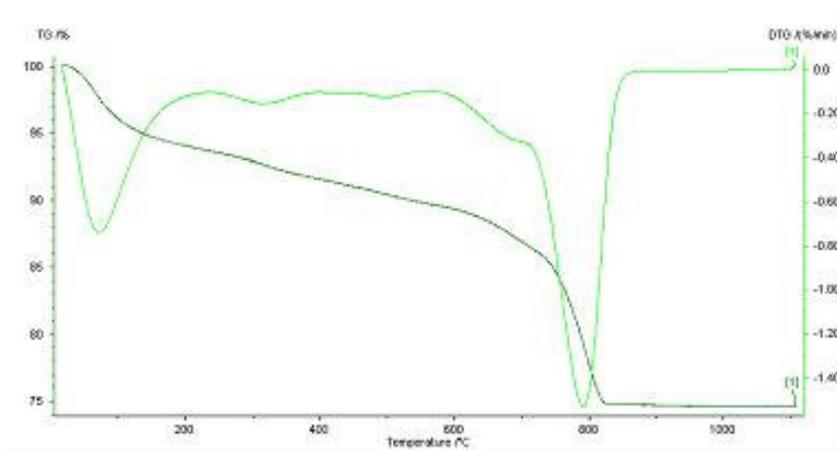


Difracção de Raios X



Quartzo, calcite, flossilicatos, feldspatos potássicos, anidrite, plagioclase, halite, pirite.

Análise Termogravimétrica



Perdas iniciais devido à desidratação e desidroxilação de minerais argilosos e descarbonatação de carbonatos (pico principal correspondente a 14,8%).

Composição Química

Fe ₂ O ₃	MnO	TiO ₂	CaO	K ₂ O	P ₂ O ₅	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	P.R.
2,93	0,05	0,45	13,90	1,03	0,31	41,21	9,41	4,48	0,39	17,13

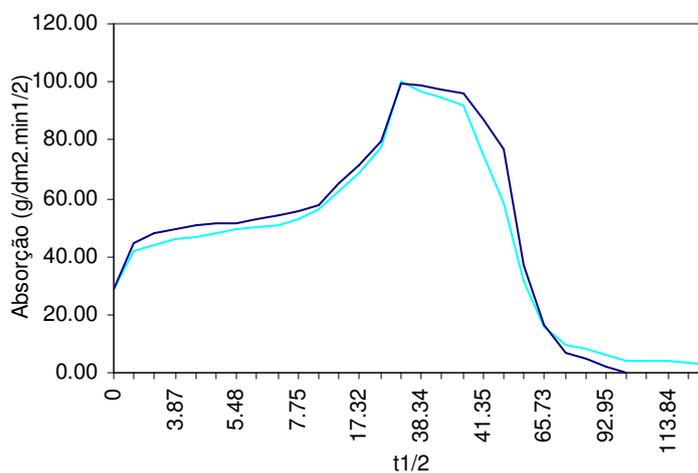
Resistência à compressão

$R_c = 1,6\text{MPa}$

Coefficiente de Capilaridade

Do exterior para o interior: $1,75\text{ g/dm}^2 \cdot \text{min}^{1/2}$

Absorção e secagem



Ficha 26 - CON 5

Amostragem



Descrição



Argamassa com 3 camadas. Primeira camada, branca com 5mm, de cal. Segunda camada de argamassa rosada com 1cm e terceira de *opus signinum* com partículas cerâmicas angulosas até 1cm.

Dissolução ácida (ácido acético)

Camada exterior (2ª camada)

Percentagem solúvel: 30%

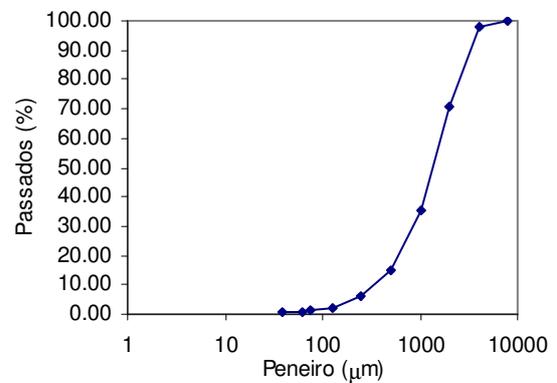
Resíduo: 70%

Camada interior (3ª camada)

Percentagem solúvel: 27%

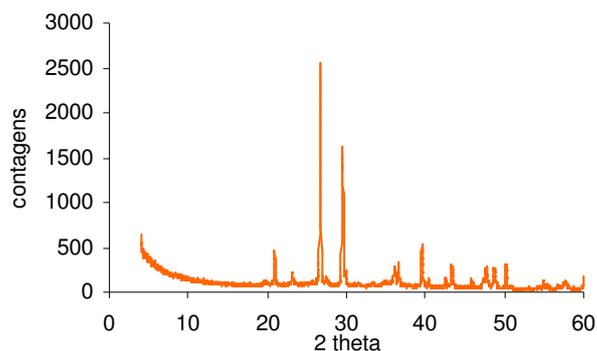
Resíduo: 73%

Análise Granulométrica (2ª camada/3ª camada)

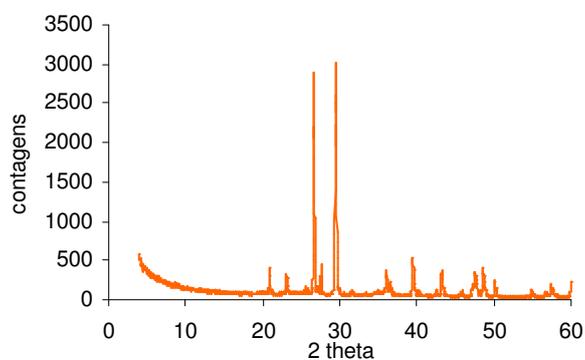


Resíduo composto por areia siliciosa e fragmentos cerâmicos em ambas as camadas.

Difracção de Raios X (2ª camada/3ª camada)

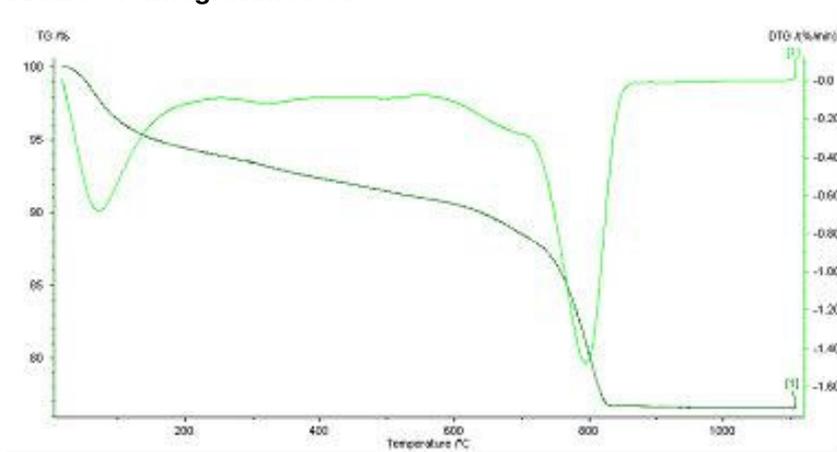


Quartzo, calcite, filossilicatos, feldspatos potássicos, magnesite, dolomite, halite, pirite.



Calcite, quartzo, feldspatos potássicos, filossilicatos, anidrite, pirite.

Análise Termogravimétrica



Perdas iniciais devido à desidratação e desidroxilação de minerais argilosos e descarbonatação de carbonatos (pico principal correspondente a 13,6%).

Composição Química (Ext/int)

Fe ₂ O ₃	MnO	TiO ₂	CaO	K ₂ O	P ₂ O ₅	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	P.R.
3,16	0,04	0,47	14,77	0,70	0,22	39,48	8,27	4,23	0,27	17,88
2,81	0,04	0,39	22,05	0,71	0,31	28,42	7,52	4,01	0,32	24,37

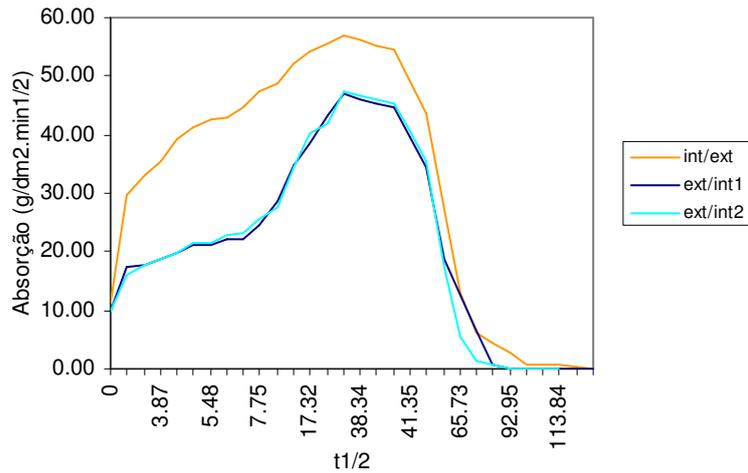
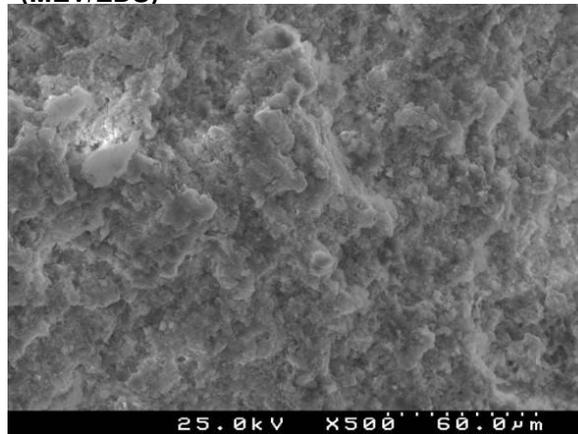
Resistência à compressão

$R_c = 2,7\text{MPa}$

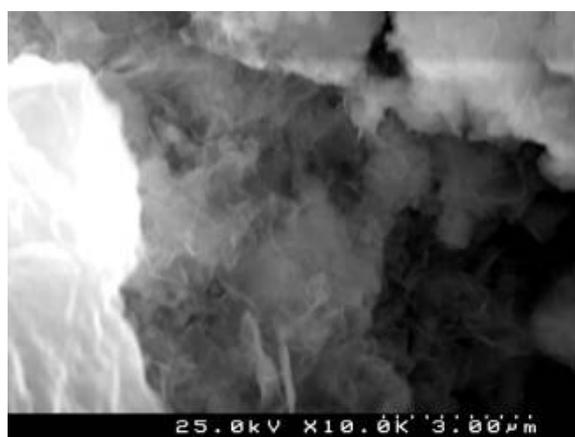
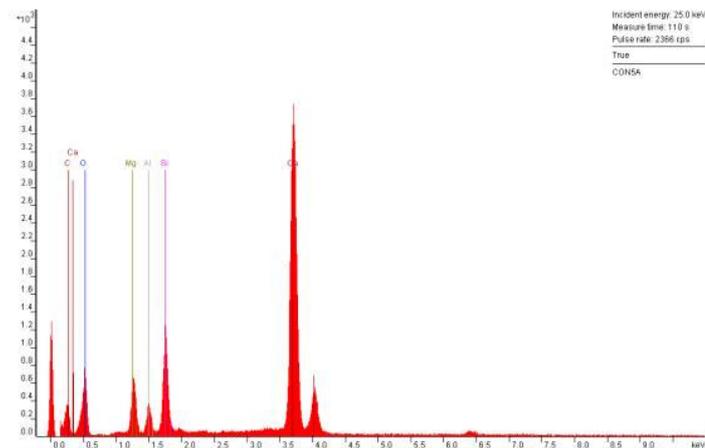
Coefficiente de Capilaridade

Do exterior para o interior: 1,65
g/dm².min^{1/2}

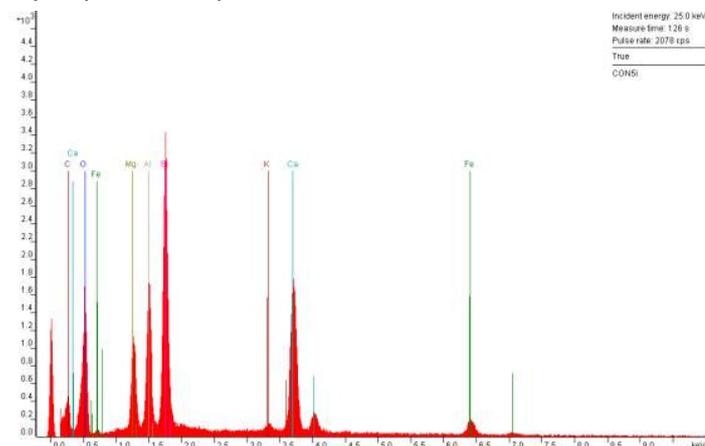
Do interior para o exterior: 2,46
g/dm².min^{1/2}

Absorção e secagem**Microscopia Electrónica Varrimento (MEV/EDS)**

Morfologia geral.



Estruturas alveolares formadas na interface tijolo/pasta e respectivo EDS.



Ficha 27 - CON6

Amostragem



Descrição



Argamassa constituída por 2 camadas. Camada exterior de 2cm, rosada, com cerâmico moído. Camada interior de cal e areia siliciosa. Colonização biológica.

Dissolução ácida (ácido acético)

Camada exterior

Percentagem solúvel: 28%

Resíduo: 72%

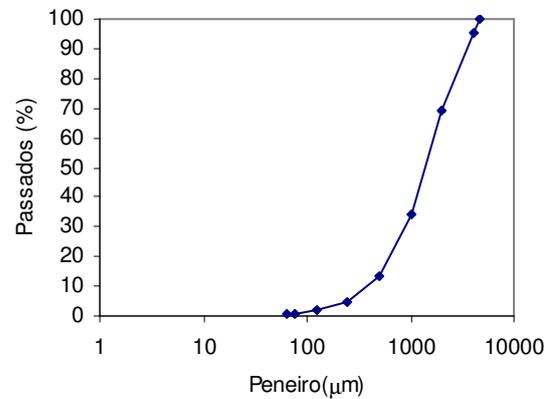
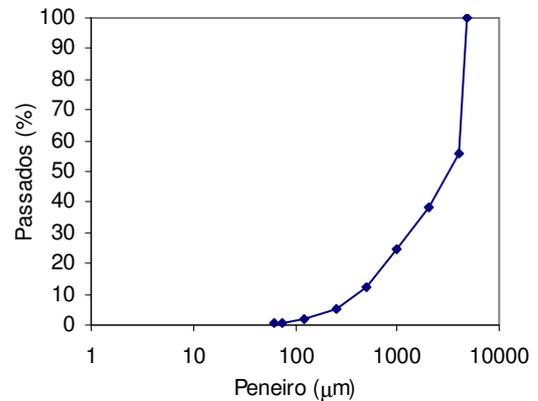
Camada interior

Percentagem solúvel: 20%

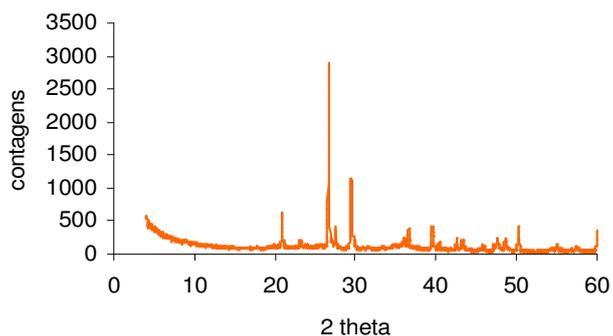
Resíduo: 80%

Resíduo composto por areia siliciosa e fragmentos cerâmicos na camada exterior e apenas areia siliciosa na camada interior.

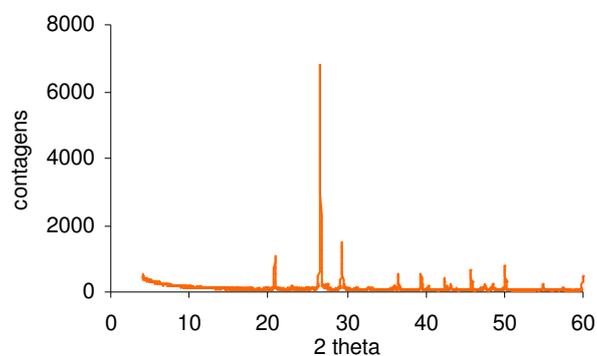
Análise Granulométrica (Ext/Int)



Difracção de Raios X (Ext/Int)

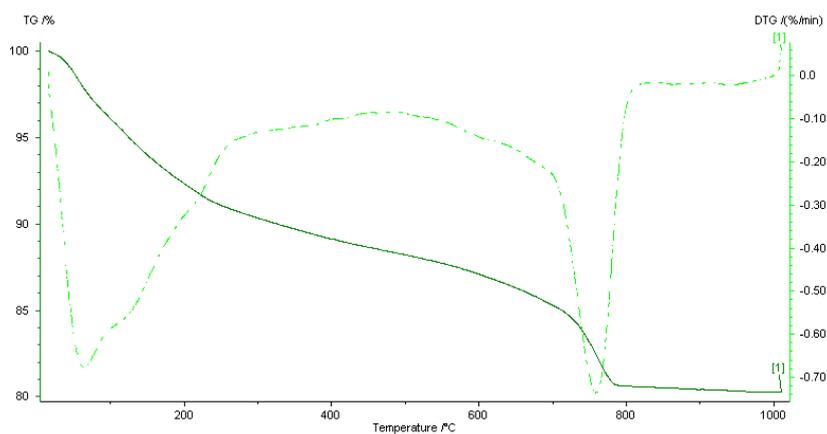


Quartzo, calcite, feldspato potássico, magnesite, dolomite, filossilicatos

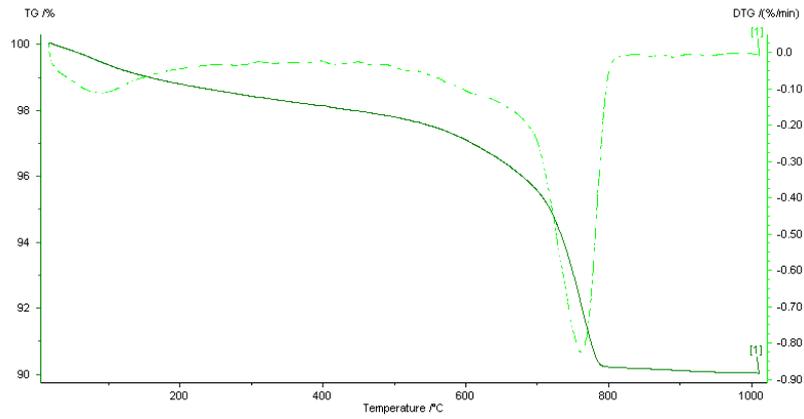


Quartzo, calcite, feldspato potássico, magnesite, vestígios mica/ilite

Análise Termogravimétrica (Ext/Int)



Perdas iniciais devido à desidratação e desidroxilação de minerais argilosos e decarbonatação de carbonatos (pico principal correspondente a 7,0%).



Perdas iniciais devido à desidratação e desidroxilação de minerais argilosos e descarbonatação de carbonatos (pico principal correspondente a 6,6%).

Composição Química (Ext/Int)

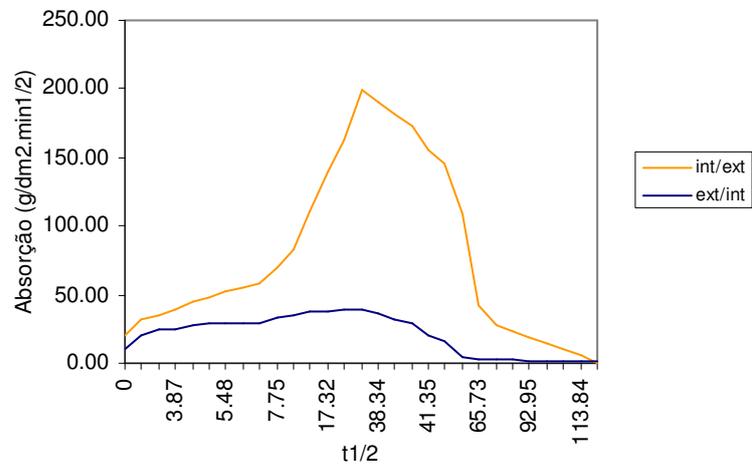
Fe ₂ O ₃	MnO	TiO ₂	CaO	K ₂ O	P ₂ O ₅	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	P.R.
1.83	0.02	0.29	13.73	1.22	0.11	61.65	7.63	0.54	0.07	11.90
0.27	0.01	0.05	9.56	0.38	0.03	79.08	1.83	0.24	0.03	8.20

Dissolução ácida (ácido acético) Absorção e secagem

Percentagem solúvel:
Resíduo

Coefficiente de Capilaridade

Do exterior para o interior: 3,33
g/dm².min^{1/2}
Do interior para o exterior: 7,65
g/dm².min^{1/2}



Ficha 28 - CON7**Amostragem****Descrição**

Argamassa rosada com 4 camadas:

- primeira, rosada, com 3mm e colonização biológica
- segunda, com 1cm e partículas grandes de cerâmica
- terceira, de 1,2cm, rosada
- camada interior com partículas grandes de cerâmica

Dissolução ácida (ácido acético)**Camada exterior (1ª e 2ª camadas)**

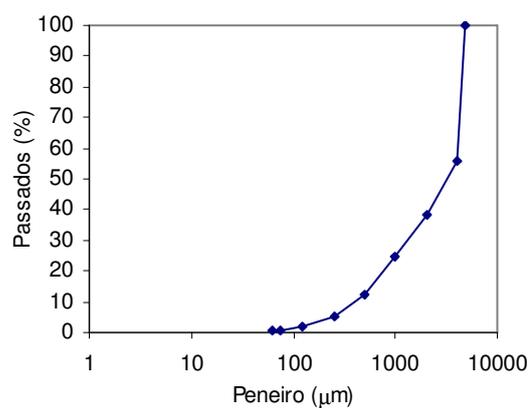
Percentagem solúvel: 40%

Resíduo: 60%

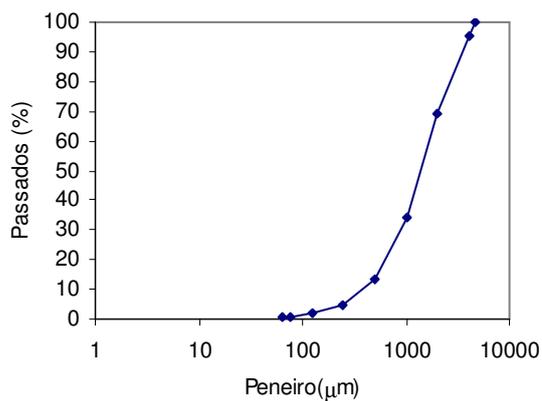
Camada interior (3ª camada)

Percentagem solúvel: 30%

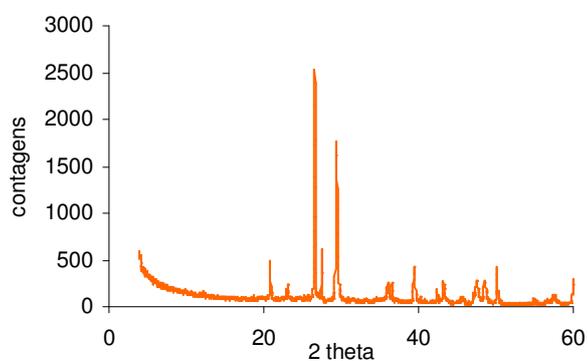
Resíduo: 70%

Análise Granulométrica (1ª e 2ª camadas/3ª camada)

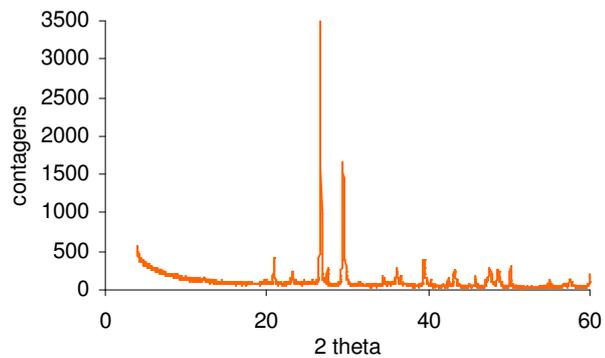
Resíduo composto por areia siliciosa e fragmentos cerâmicos em todas as camadas.



Difração de Raios X (1ª e 2ª camadas/ 3ª camada)

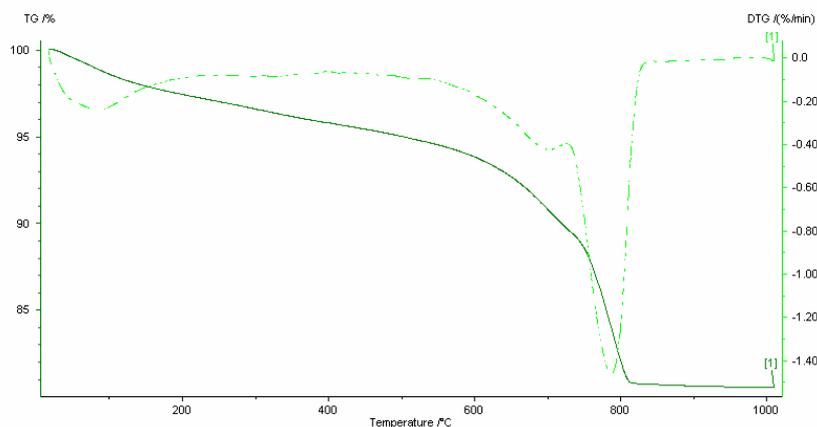


Quartzo, calcite, feldspato potássico, filossilicatos, anidrite

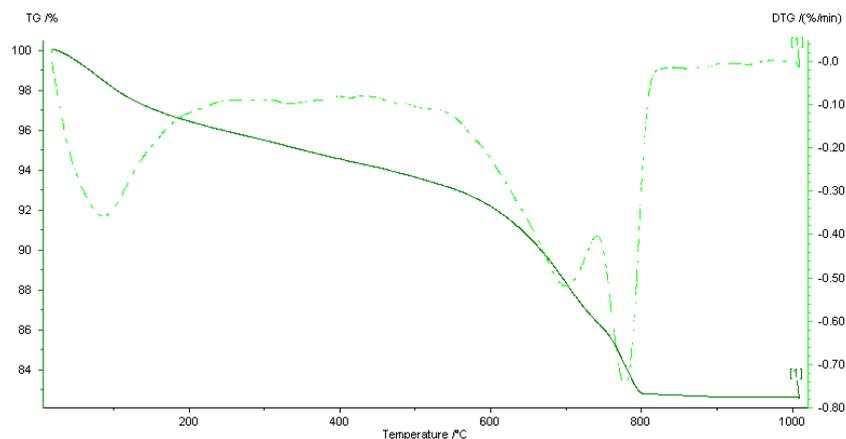


Quartzo, calcite, feldspato potássico, pirite, filossilicatos, dolomite

Análise Termogravimétrica (Ext/Int)



Perdas iniciais devido à desidratação e desidroxilação de minerais argilosos até aos 600°C e descarbonatação de carbonatos (dois picos cerca dos 700°C e 790°C correspondentes a 14,0%) até aos 850°C.



Perdas iniciais devido à desidratação e desidroxilação de minerais argilosos até aos 600°C e descarbonatação de carbonatos (dois picos cerca dos 700°C e 790°C correspondentes a 10,4%).

Composição Química (Ext- camadas 1 e 2/Int – camada 3)

Fe ₂ O ₃	MnO	TiO ₂	CaO	K ₂ O	P ₂ O ₅	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	P.R.
2.80	0.05	0.35	20.47	1.53	0.26	41.30	9.61	3.20	0.11	19.50
2.72	0.05	0.37	19.88	1.64	0.24	41.57	9.82	3.36	0.11	19.30

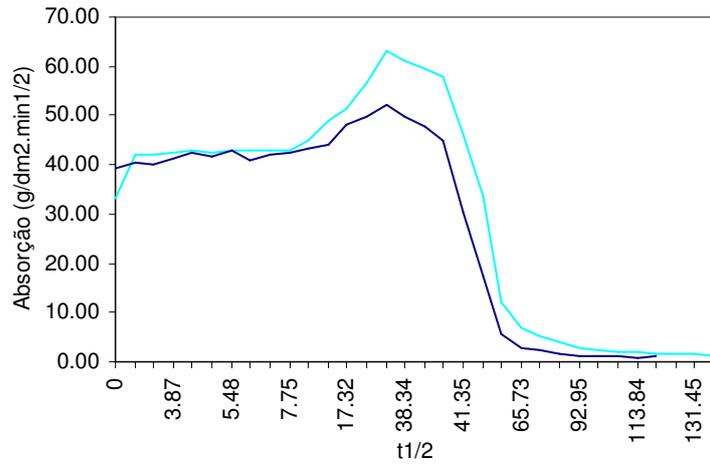
Resistência à compressão

$R_c = 3,3\text{MPa}$

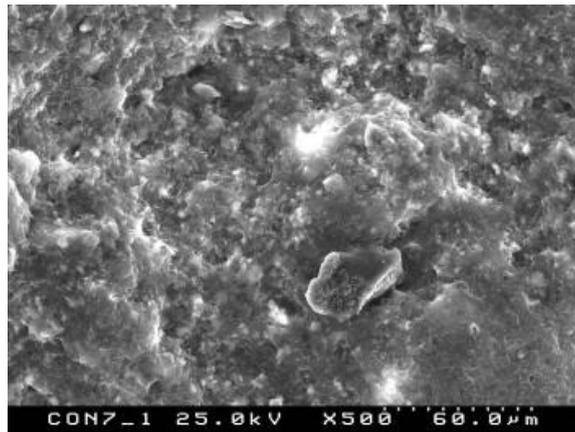
Coefficiente de Capilaridade

Do exterior para o interior: $0,46\text{ g/dm}^2 \cdot \text{min}^{1/2}$

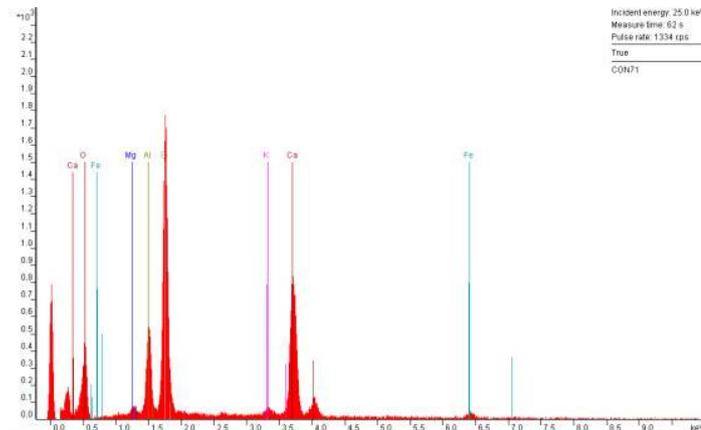
Absorção e secagem

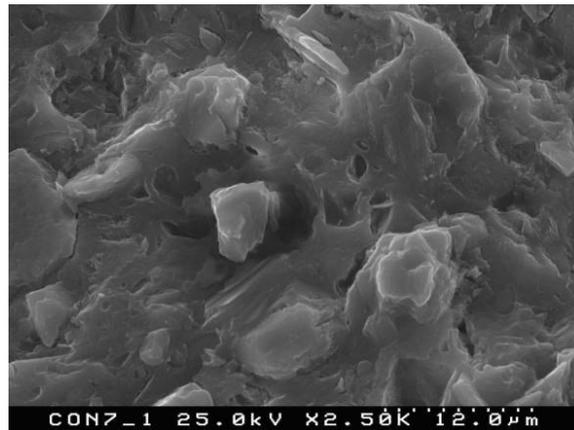


Microscopia Electrónica Varrimento (MEV/EDS)

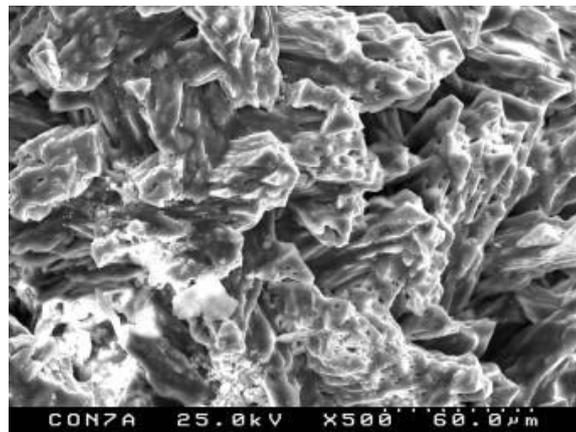
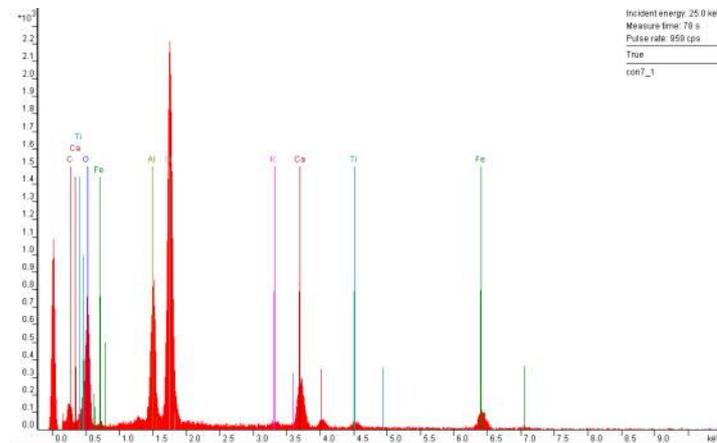


Morfologia geral da argamassa.





Presença de estruturas tipo gel e respectivo EDS.



Calcite re-cristalizada.

Ficha 29 - CON8

Amostragem



Descrição



Argamassa rosada, com pó e fragmentos cerâmicos, bastante uniforme.

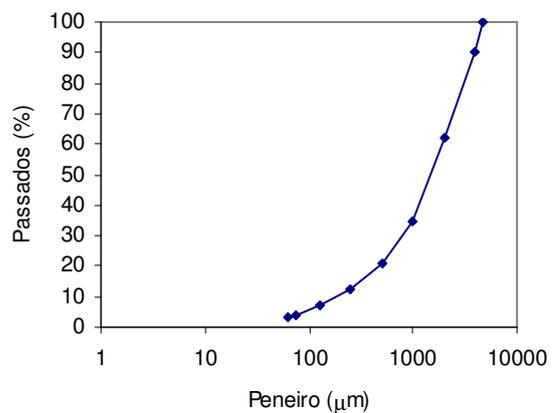
Dissolução ácida (ácido acético)

Percentagem solúvel: 27%

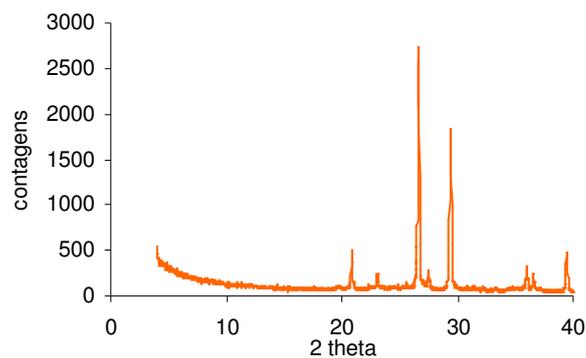
Resíduo: 73%

Agregado composto por areia siliciosa e cerâmico moído.

Análise Granulométrica

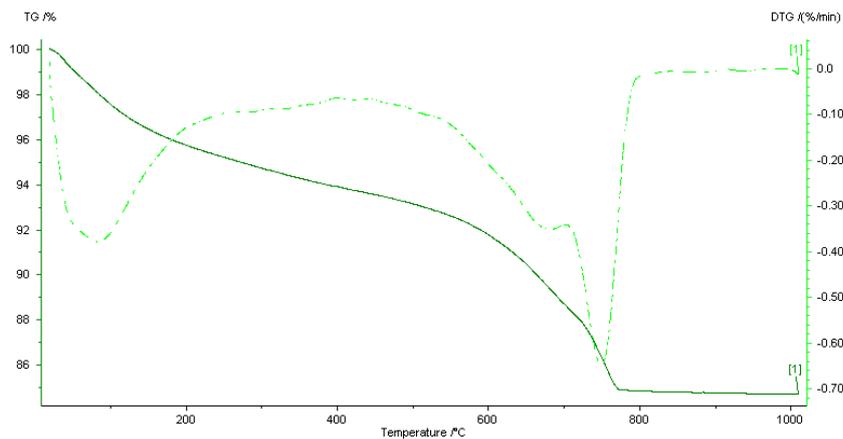


Difracção de Raios X



Quartzo, calcite, feldspato potássico, anidrite, dolomite, filossilicatos, pirite

Análise Termogravimétrica



Perdas iniciais devido à desidratação e desidroxilação de minerais argilosos até aos 600°C e decarbonatação de carbonatos (dois picos cerca dos 680°C e 750°C correspondentes a 8,0%) até aos 800°C.

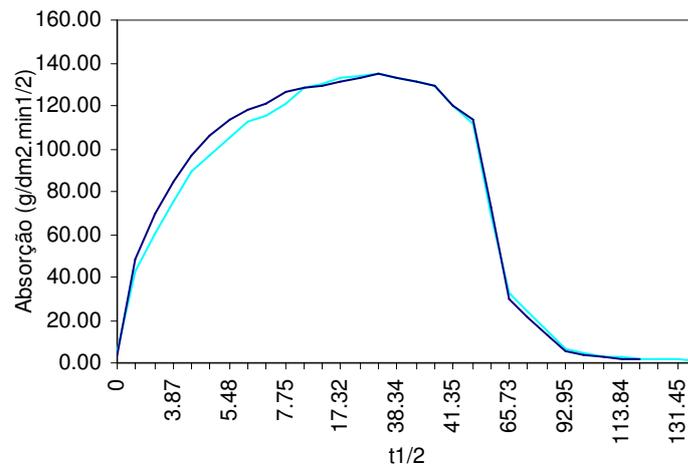
Resistência à compressão

$R_c = 1,1 \text{ MPa}$

Coefficiente de Capilaridade

Do exterior para o interior: $9,98 \text{ g/dm}^2 \cdot \text{min}^{1/2}$

Absorção e secagem



Ficha 30 - CON9**Amostragem****Descrição**

Argamassa com partículas cerâmicas de dimensão variada, colocada sobre suporte de cerâmica (foto) e pedra.

Dissolução ácida (ácido acético)**Camada exterior:**

Percentagem solúvel: 26%

Resíduo: 74%

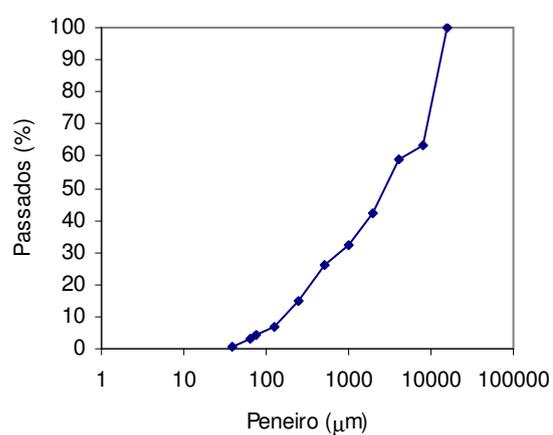
Camada interior

Percentagem solúvel: 23%

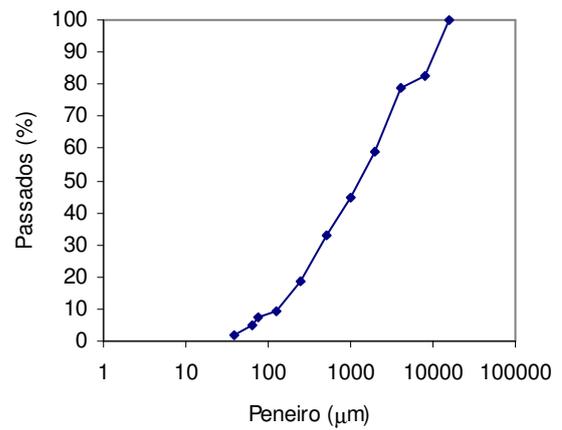
Resíduo: 77%

Análise Granulométrica

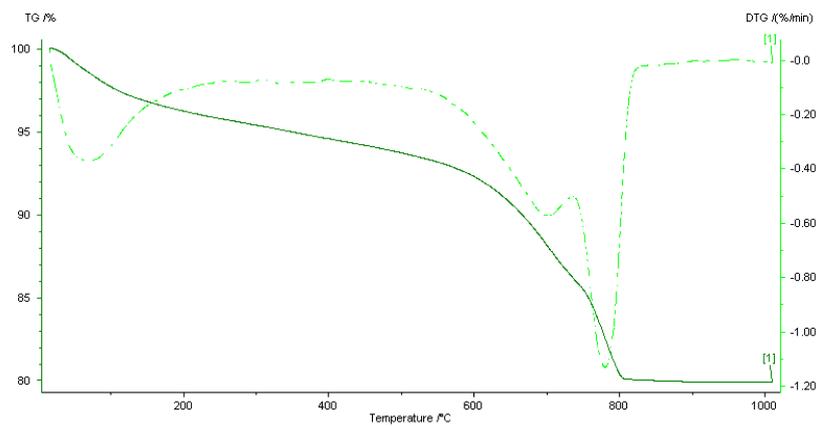
(camada exterior/camada interior)



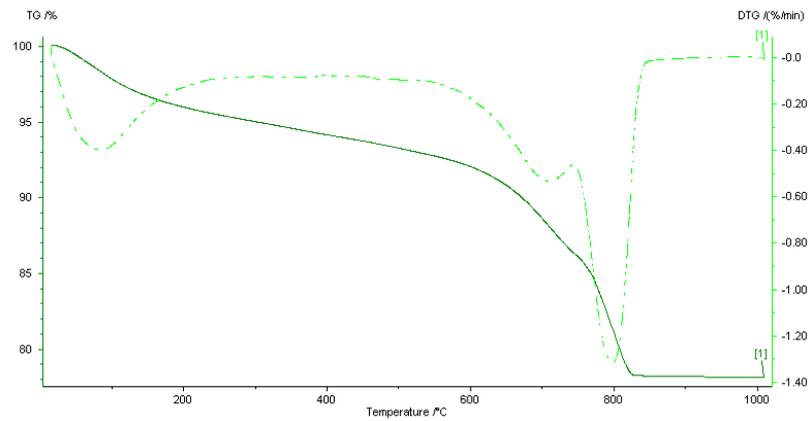
Resíduo composto por cerâmico moído e areia siliciosa.



Análise Termogravimétrica (Ext/int)



Perdas iniciais devido à desidratação e desidroxilação de minerais argilosos até aos 600 $^{\circ}\text{C}$ e descarbonatação de carbonatos (dois picos cerca dos 700 $^{\circ}\text{C}$ e 800 $^{\circ}\text{C}$ correspondentes a 14,5%) até aos 820 $^{\circ}\text{C}$.



Perdas iniciais devido à desidratação e desidroxilação de minerais argilosos até aos 600°C e descarbonatação de carbonatos (dois picos cerca dos 700°C e 800°C correspondentes a 12,2%) até aos 820°C.

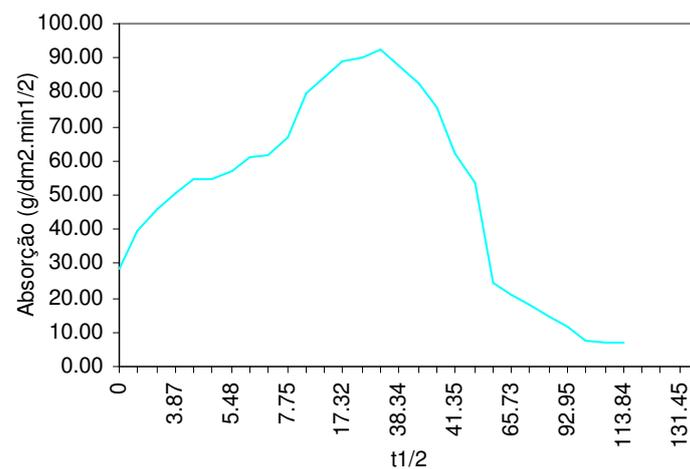
Resistência à compressão

$R_c = 3,3 \text{ MPa}$

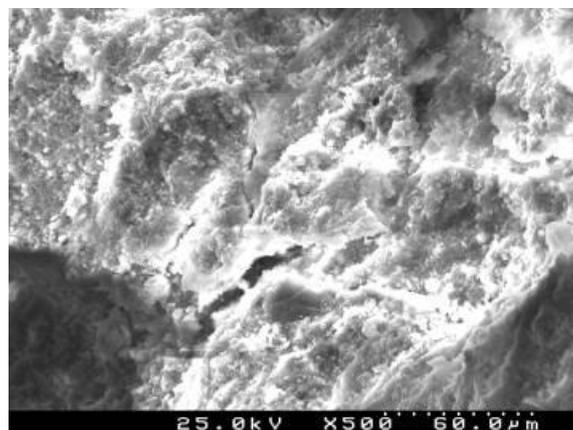
Coeficiente de Capilaridade

Do exterior para o interior:
 $5,34 \text{ g/dm}^2 \cdot \text{min}^{1/2}$

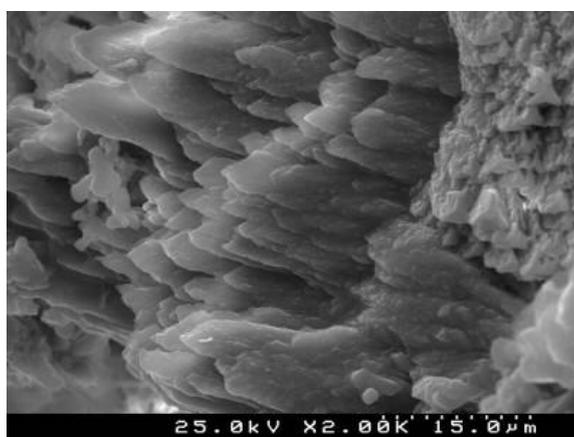
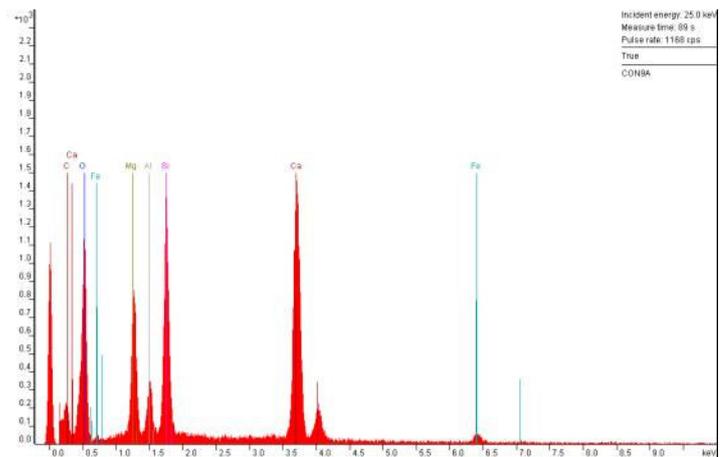
Absorção e secagem



Microscopia Electrónica Varrimento (MEV/EDS)



Morfologia geral da argamassa.



Calcite reprecipitada na interface tijolo/pasta.

Ficha 31 - CON10

Amostragem



Descrição



Argamassa constituída por uma camada de barramento de cal e pó cerâmico de 2mm seguida de uma camada rosada com partículas de tijolo até 1cm; terceira camada, interior, rosada.

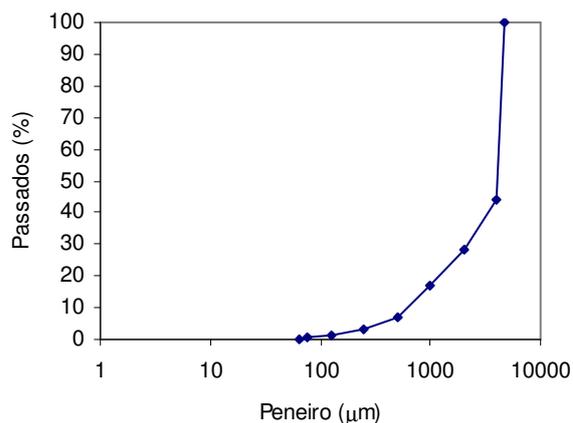
Dissolução ácida (ácido acético)

Percentagem solúvel: 24%

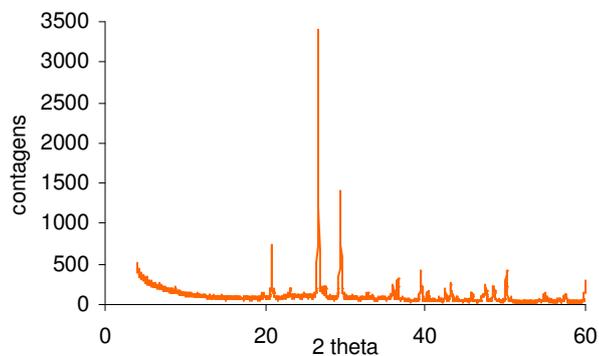
Resíduo: 76%

Resíduo composto por areia siliciosa e fragmentos de tijolo.

Análise Granulométrica

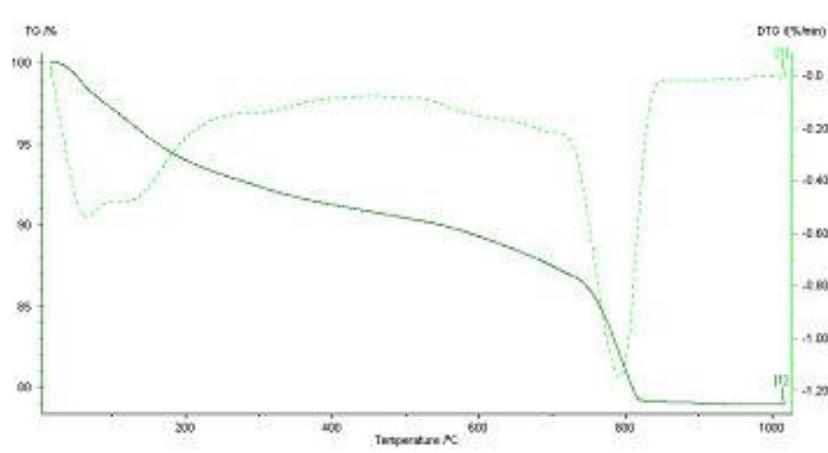


Difracção de Raios X



Quartzo, calcite, feldspatos potássicos, filossilicatos, dolomite, mica/illite

Análise Termogravimétrica



Perdas iniciais devido à desidratação e desidroxilação de minerais argilosos e descarbonatação de carbonatos (pico principal correspondente a 11,5%).

Composição Química

Fe ₂ O ₃	MnO	TiO ₂	CaO	K ₂ O	P ₂ O ₅	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	P.R.
3,45	0,03	0,56	15,66	1,66	0,33	49,09	11,98	0,75	0,18	15,80

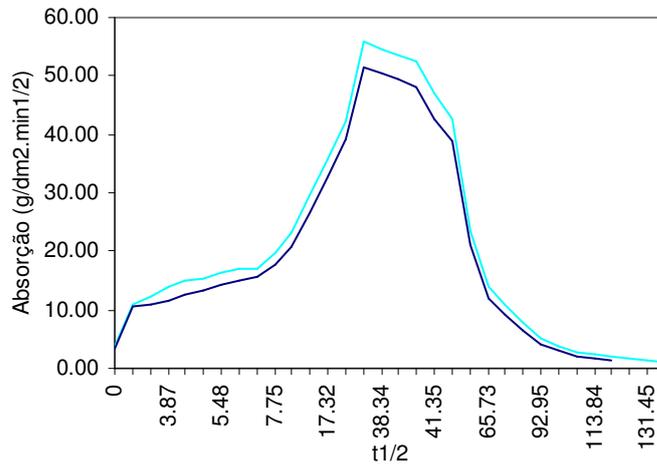
Resistência à compressão

R_c = 3,4 MPa

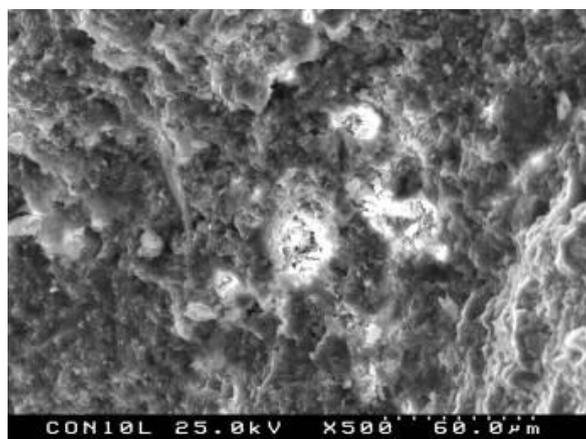
Coefficiente de Capilaridade

Do exterior para o interior: 1,63 g/dm².min^{1/2}

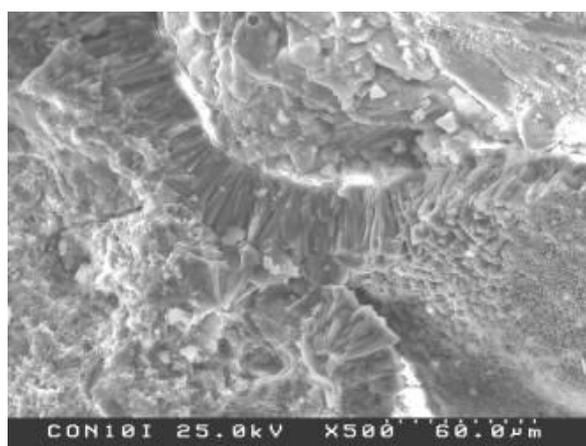
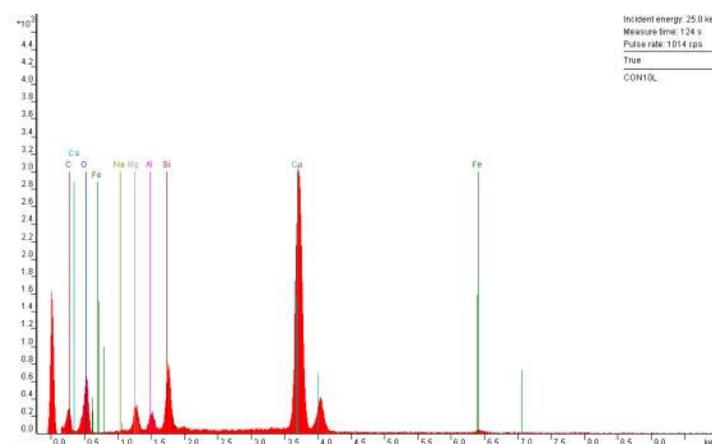
Absorção e secagem



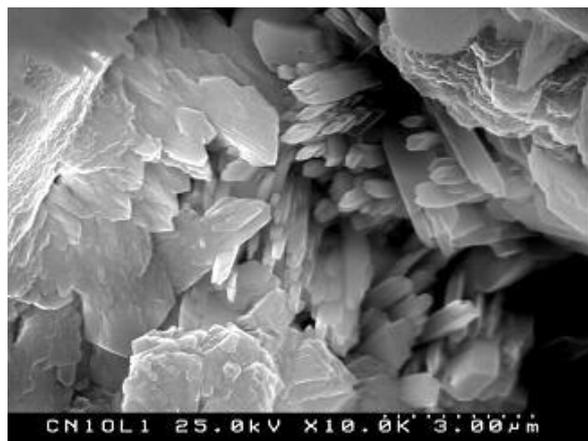
Microscopia Electrónica Varrimento (MEV/EDS)



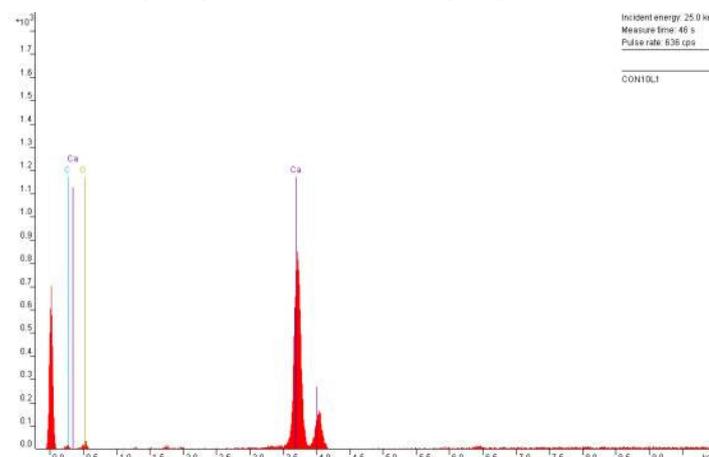
Morfologia geral da argamassa.



Calcite reprecipitada na interface entre tijolo e pasta.



Calcite re-precipitada em interface tijolo/pasta.



Ficha 32 - CON11**Amostragem****Descrição**

Argamassas com três camadas:

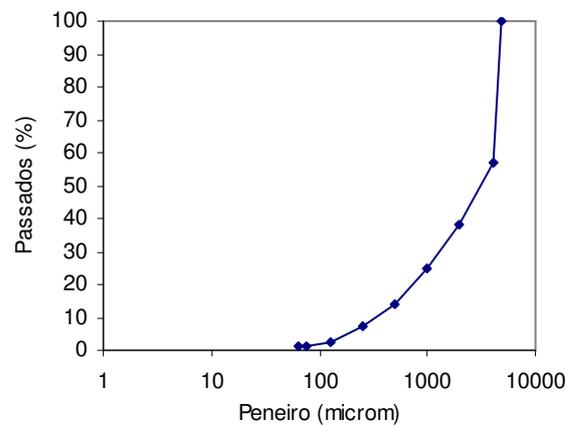
- camada exterior rosada, com 2mm apresentando colonização biológica
- camada intermédia branca, com 1,5 cm e partículas cerâmicas angulosas, com dimensões variadas (até 1,5cm)
- camada interior rosada com 1cm

Dissolução ácida (ácido acético)

Percentagem solúvel: 24%

Resíduo: 76%

Resíduo composto por areia siliciosa e fragmentos cerâmicos.

Análise Granulométrica**Resistência à compressão**

$R_c = 6,3 \text{ MPa}$

Ficha 33 - CON12

Amostragem

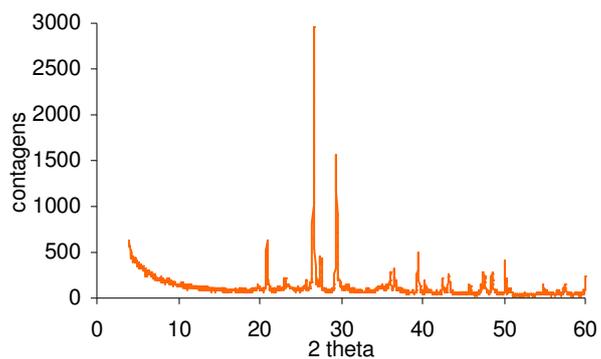


Descrição



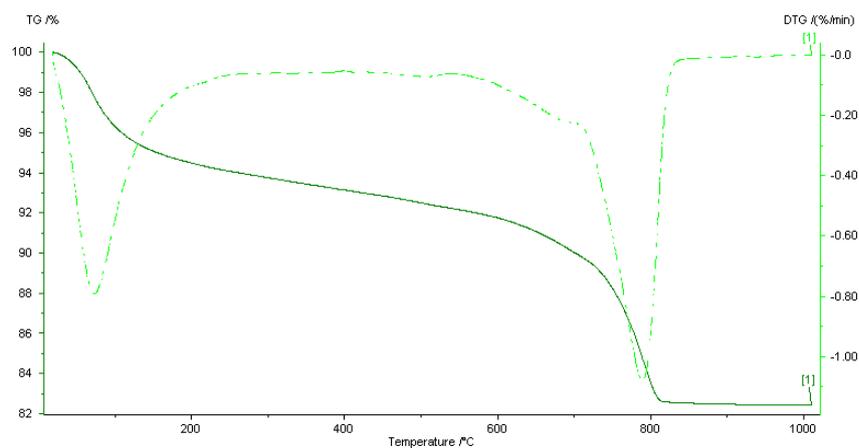
Argamassa rosada composta por uma única camada contendo cerâmico moído.

Difracção de Raios X



Quartzo, calcite, feldspatos potássicos, filossilicatos, anidrite, dolomite, pirite, halite, siderite.

Análise Termogravimétrica



Perdas iniciais devido à desidratação e desidroxilação de minerais argilosos até aos 600°C e descarbonatação de carbonatos (pico principal correspondente a 10,0%) até aos 820°C.

Composição Química

Fe ₂ O ₃	MnO	TiO ₂	CaO	K ₂ O	P ₂ O ₅	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	P.R.
2,69	0,06	0,40	11,84	1,97	0,39	43,04	9,70	4,09	0,51	13,59

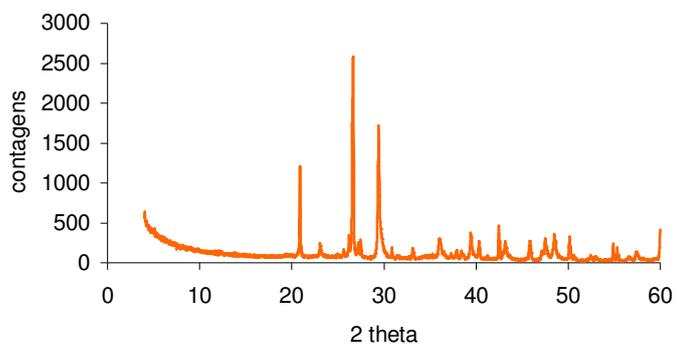
Ficha 34 - CON13

Descrição



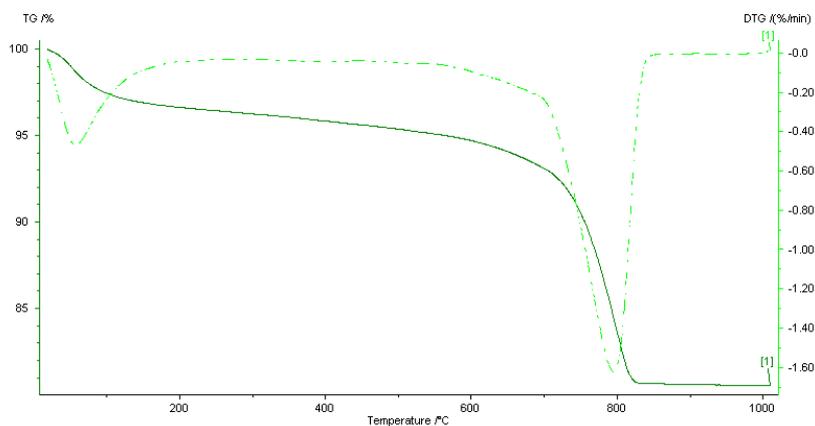
Argamassa de cal, aparentemente composta por uma só camada de elevada espessura, com vestígios de pintura e agregado quartzoso predominantemente fino.

Difracção de Raios X



Quartzo, calcite, aragonite, feldspatos potássicos, dolomite, anidrite, filossilicatos, halite.

Análise Termogravimétrica



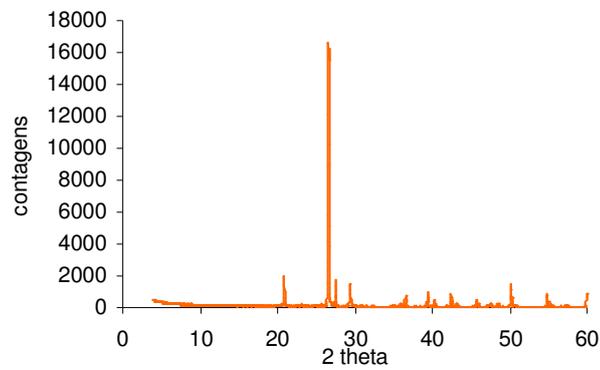
Perdas iniciais devido à desidratação e desidroxilação de minerais argilosos até aos 600°C e descarbonatação de carbonatos (pico principal correspondente a 14,3%) até aos 820°C.

Composição Química

Fe ₂ O ₃	MnO	TiO ₂	CaO	K ₂ O	P ₂ O ₅	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	P.R.
0,57	0,03	0,07	13,33	0,39	0,20	54,43	1,68	2,70	0,17	14,02

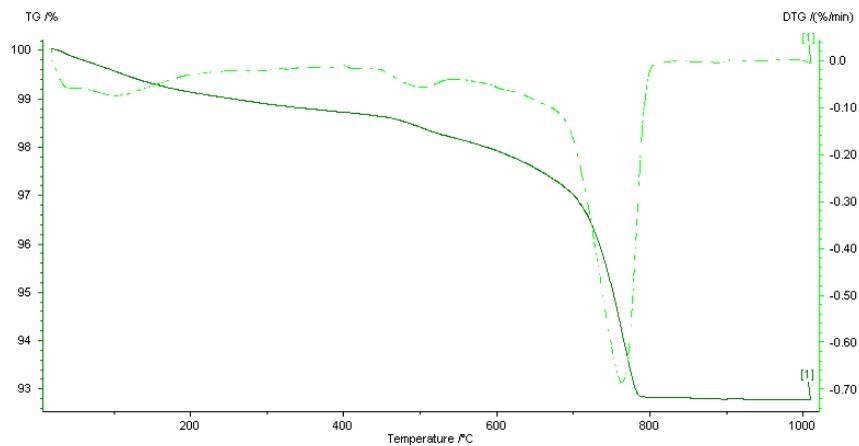
Ficha 35 - CON14

Difracção de Raios X



Quartzo, calcite, feldspatos potássicos, filossilicatos, anidrite, dolomite, halite, siderite.

Análise Termogravimétrica



Perdas iniciais devido à desidratação e desidroxilação de minerais argilosos até aos 600°C e descarbonatação de carbonatos (pico principal correspondente a 5,1%) até aos 800°C.

Composição Química

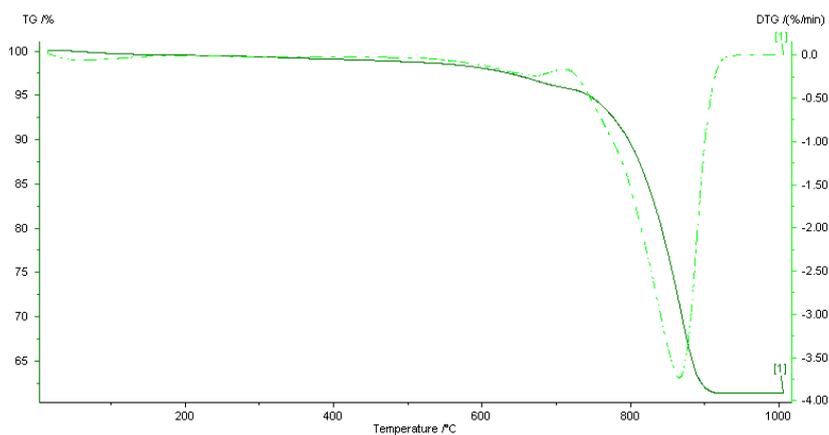
Fe ₂ O ₃	MnO	TiO ₂	CaO	K ₂ O	P ₂ O ₅	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	P.R.
0,74	0,01	0,09	6,16	1,31	0,10	67,06	3,29	0,53	0,51	10,08

Ficha 36 - CON15**Difracção de Raios X**

Calcite, quartzo, halite, traços de dolomite.

Composição Química

Fe ₂ O ₃	MnO	TiO ₂	CaO	K ₂ O	P ₂ O ₅	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	P.R.
0,27	0,02	0,03	40,80	0,10	0,09	8,67	0,38	1,27	0,08	38,37

Análise Termogravimétrica

Perdas iniciais devido à desidratação e desidroxilação de minerais argilosos até aos 600°C e descarbonatação de carbonatos (pico principal correspondente a 5,1% até aos 800°C).

Resistência à compressão

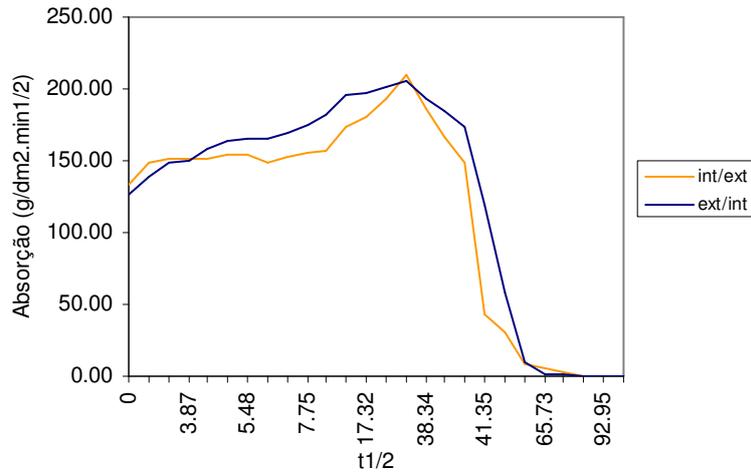
$R_c = 3,0 \text{ MPa}$

Coefficiente de Capilaridade

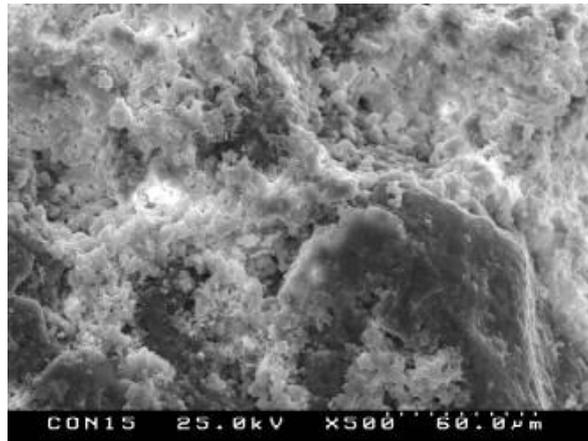
Do exterior para o interior: $5,21 \text{ g/dm}^2 \cdot \text{min}^{1/2}$

Do interior para o exterior: $0,86 \text{ g/dm}^2 \cdot \text{min}^{1/2}$

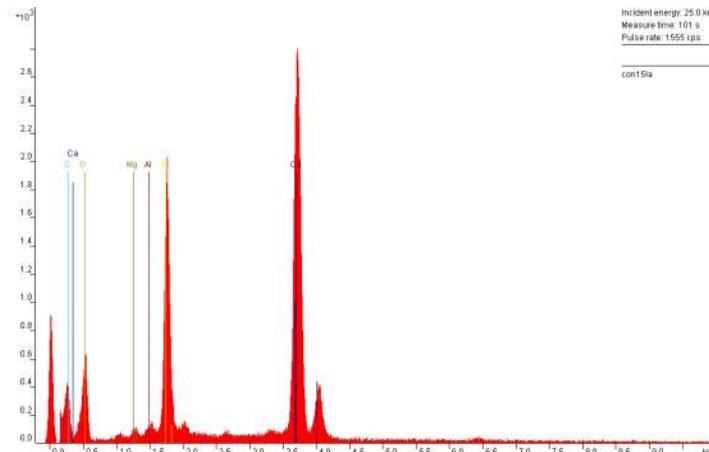
Absorção e secagem



Microscopia Electrónica Varrimento (MEV/EDS)



Morfologia geral.



Ficha 37 - CSC1**Amostragem****Descrição**

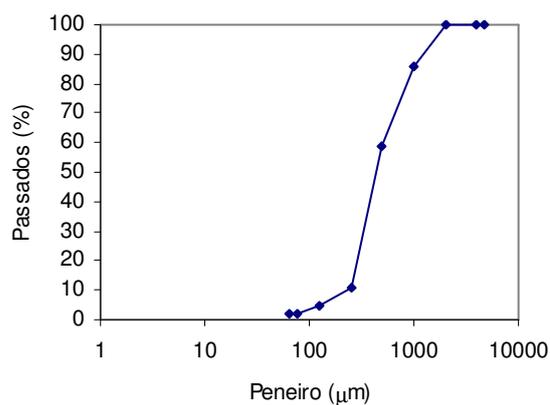
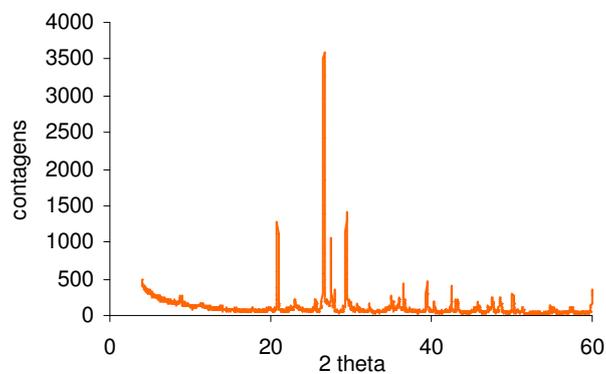
Argamassa rosada com cerâmico moído fino.
Acabamento liso.

Dissolução ácida (ácido acético)

Percentagem solúvel: 30%

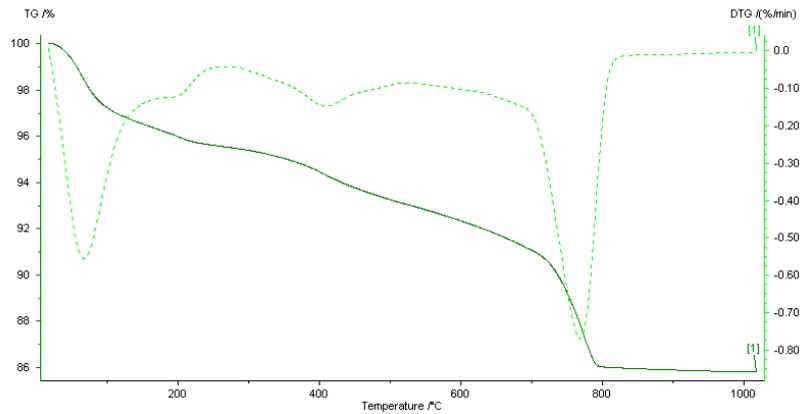
Resíduo: 70%

Resíduo composto por areia siliciosa e cerâmico moído fino.

Análise Granulométrica**Difracção de Raios X**

Quartzo, calcite, feldspato potássico, plagioclase, anidrite, mica/ilite, zeólitos

Análise Termogravimétrica



Desidratação, desidroxilação e perda de água zeolítica até 600°C e descarbonatação de carbonatos (pico principal correspondente a 6,1%).

Composição Química

Fe ₂ O ₃	MnO	TiO ₂	CaO	K ₂ O	P ₂ O ₅	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	P.R.
1.41	0.05	0.33	17.51	2.10	0.31	57.96	5.97	0.31	0.37	12.70

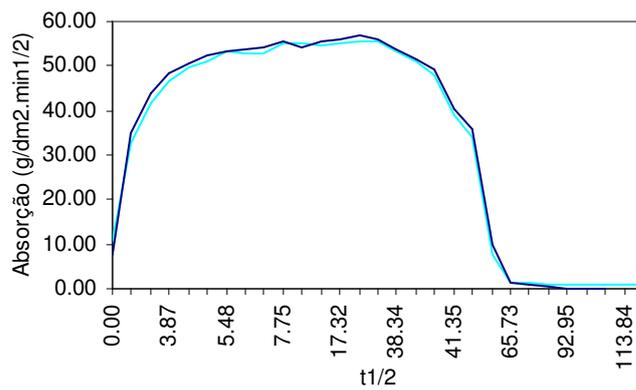
Resistência à compressão

R_c = 1,4 MPa

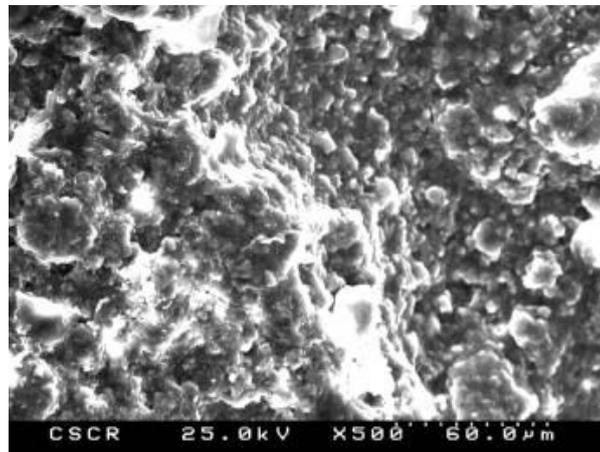
Coefficiente de Capilaridade

Do exterior para o interior: 5,50 g/dm².min^{1/2}

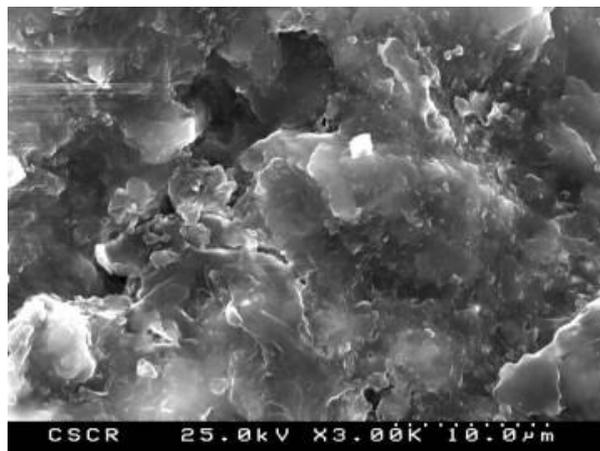
Absorção e secagem



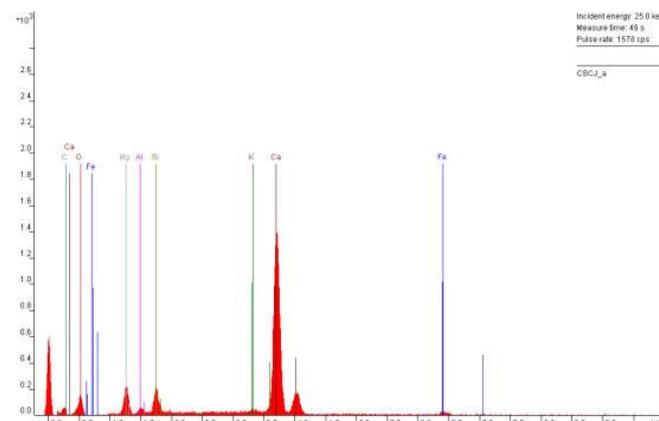
Microscopia Electrónica Varrimento (MEV/EDS)



Morfologia geral da argamassa.

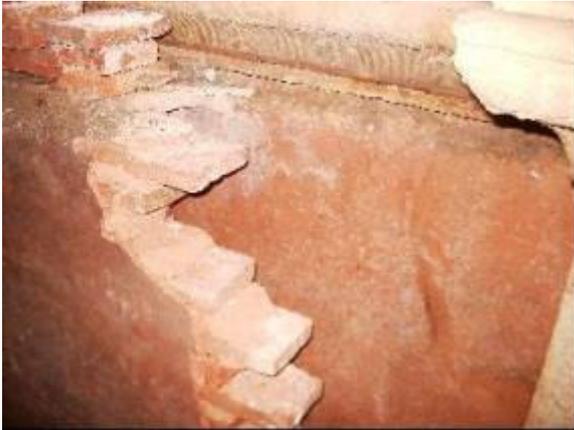


Formação de gel constituído fundamentalmente por Ca, Mg e Si.



Ficha 38 - CSC2

Amostragem



Descrição



Argamassa de junta rosada incorporando cerâmico moído fino. Uma só camada com elevada espessura.

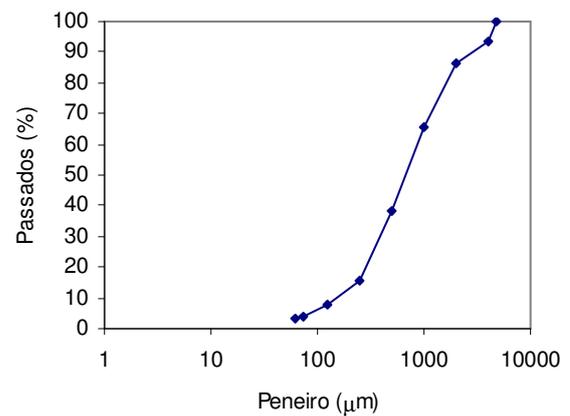
Dissolução ácida (ácido acético)

Percentagem solúvel: 63%

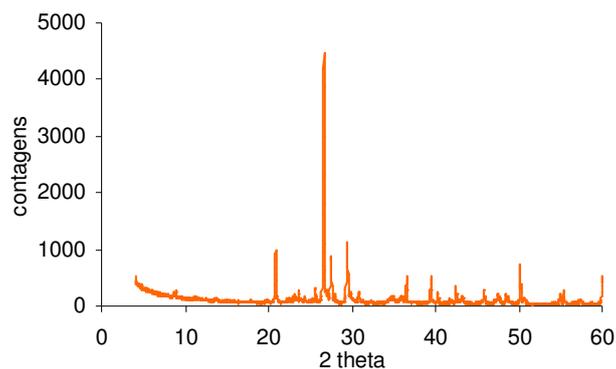
Resíduo: 37%

Resíduo composto por areia siliciosa e cerâmico moído fino.

Análise Granulométrica

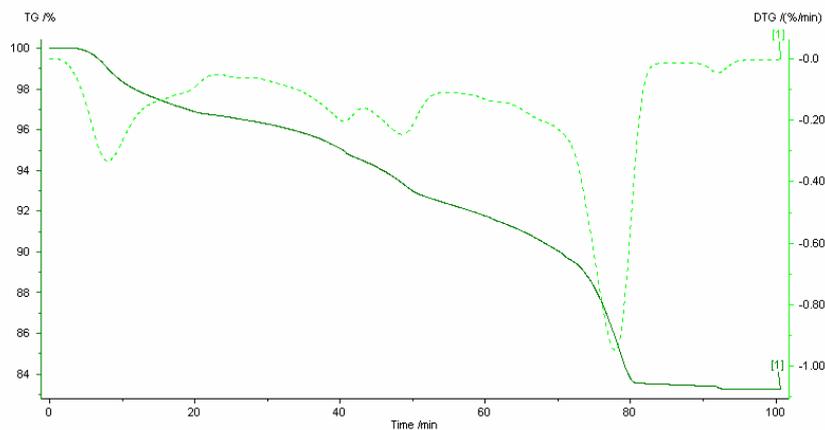


Difracção de Raios X



Quartzo, calcite, feldspato potássico, pirite, plagioclase, mica/ilite, anidrite

Análise Termogravimétrica



Desidratação, desidroxilação e perda de água zeolítica até 600°C e decarbonatação de carbonatos (pico principal correspondente a 8,2%).

Composição Química

Fe ₂ O ₃	MnO	TiO ₂	CaO	K ₂ O	P ₂ O ₅	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	P.R.
1.82	0.06	0.28	9.68	3.48	0.09	55.71	8.90	5.85	0.61	13.10

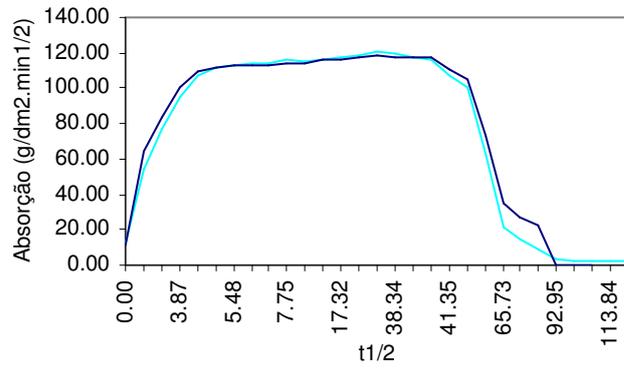
Resistência à compressão

$R_c = 3,3 \text{ MPa}$

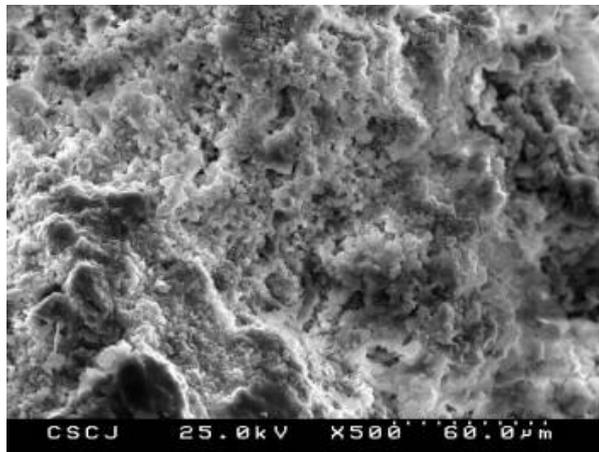
Coefficiente de Capilaridade

Do exterior para o interior: $1,89 \text{ g/dm}^2 \cdot \text{min}^{1/2}$

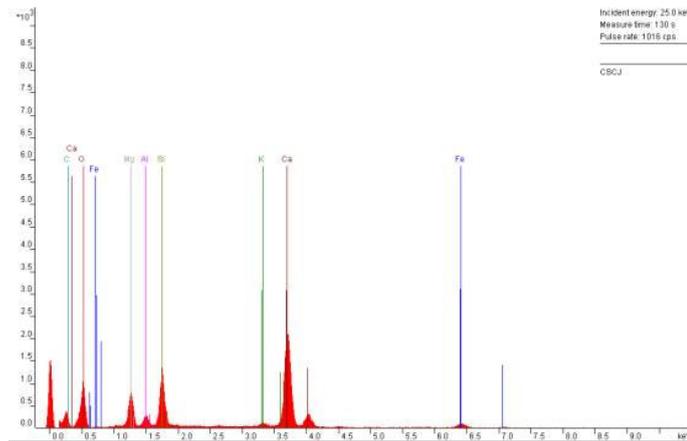
Absorção e secagem



Microscopia Electrónica Varrimento (MEV/EDS)



Morfologia geral da argamassa.



Ficha 39 - FR1

Amostragem



Descrição



Argamassa composta por camada exterior rosada com 3mm e camada interior de cal e agregado fino.

Dissolução ácida (ácido acético)

Camada exterior

Percentagem solúvel: 27%

Resíduo: 73%

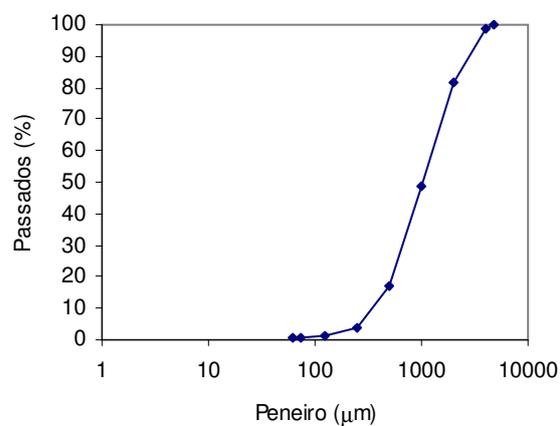
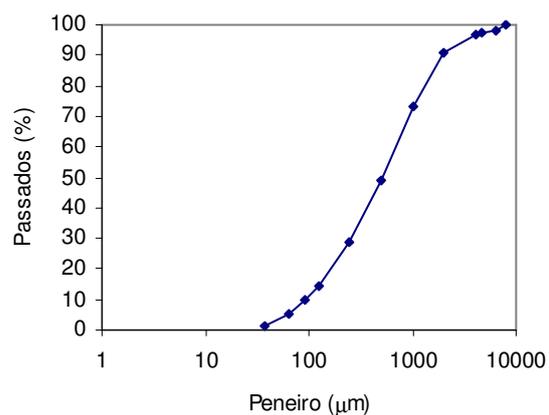
Camada interior

Percentagem solúvel: 26%

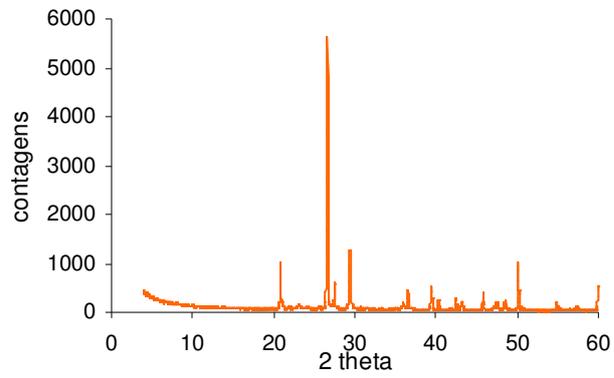
Resíduo: 74%

Resíduo composto por areia siliciosa e fragmentos e pó cerâmicos na camada exterior e areia siliciosa na camada interior.

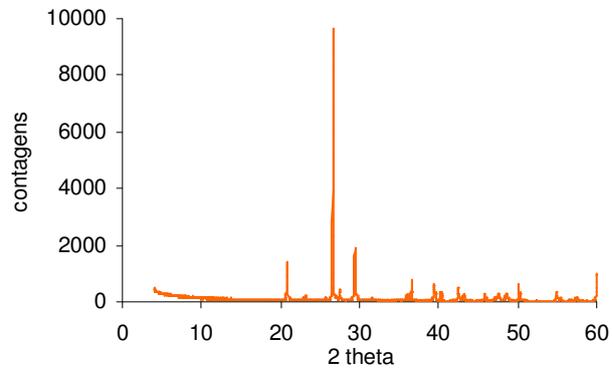
Análise Granulométrica (Ext/Int)



Difracção de Raios X (Ext/Int)

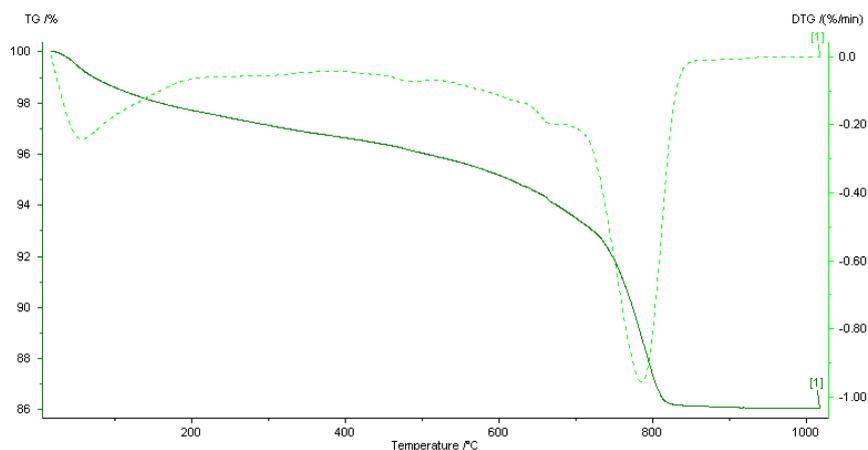


Quartzo, calcite, feldspato potássico, vestígios de anidrite

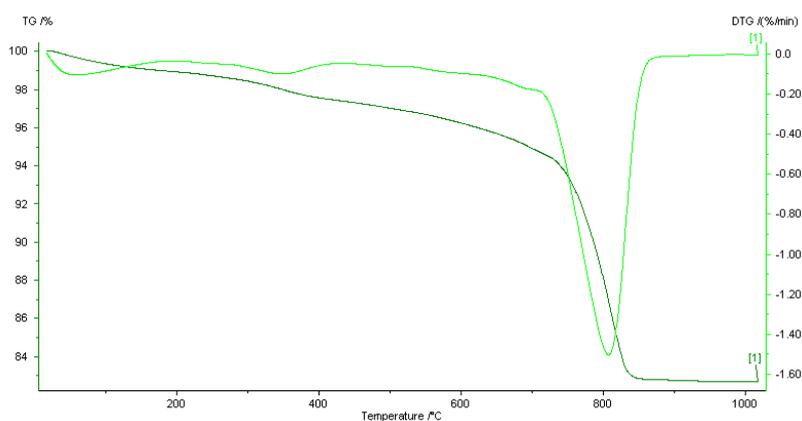


Quartzo, calcite, feldspato potássico

Análise Termogravimétrica



Desidratação e desidroxilação de minerais argilosos e descarbonatação de carbonatos (pico principal correspondente a 9,2%).



Desidratação e desidroxilação de minerais argilosos e descarbonatação de carbonatos (pico principal correspondente a 13,1%).

Composição Química (Camada Exterior/Camada Interior)

Fe ₂ O ₃	MnO	TiO ₂	CaO	K ₂ O	P ₂ O ₅	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	P.R.
2.00	0.02	0.46	12.05	2.19	0.30	63.34	7.23	0.46	0.61	10.60
0.60	0.03	0.18	14.50	1.51	0.38	66.67	3.28	0.25	0.25	12.10

Resistência à compressão

$R_c = 0,6 \text{ MPa}$ (camada interior)

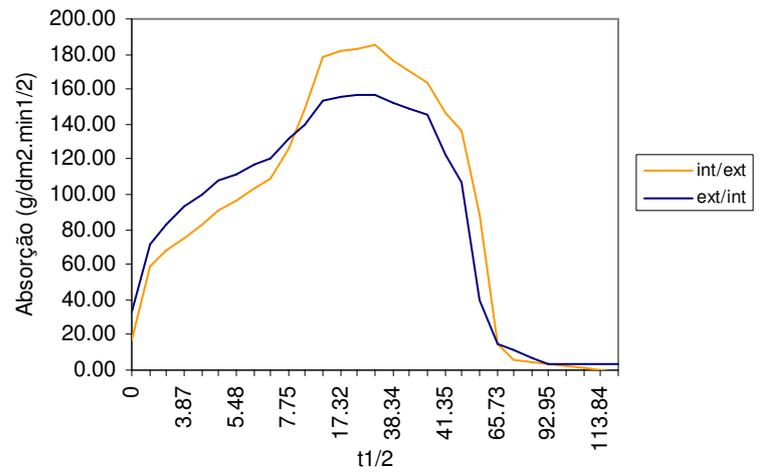
$R_c = 1,9 \text{ MPa}$ (camada exterior)

Coefficiente de Capilaridade

Do interior para o exterior: $12.73 \text{ g/dm}^2 \cdot \text{min}^{1/2}$

Do exterior para o interior: $8.89 \text{ g/dm}^2 \cdot \text{min}^{1/2}$

Absorção e secagem



Ficha 40 - FR2**Amostragem****Descrição**

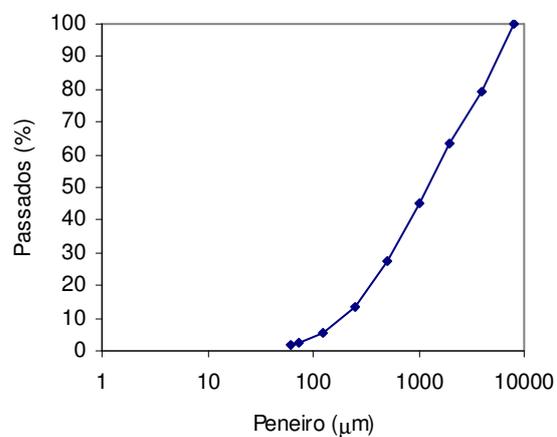
Argamassa composta por uma única camada, contendo cerâmico moído de dimensões variadas.

Dissolução ácida (ácido acético)

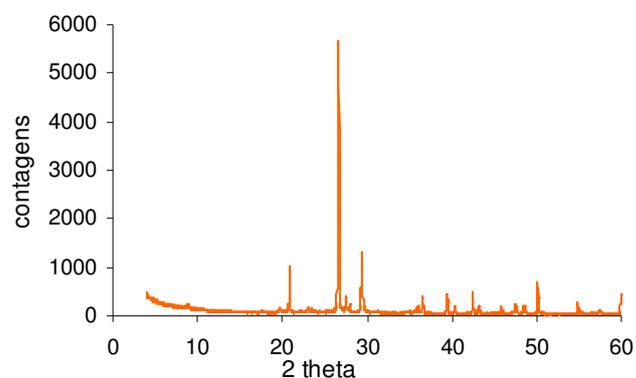
Percentagem solúvel: 29%

Resíduo: 71%

Resíduo composto por fragmentos e pó cerâmico e areia siliciosa

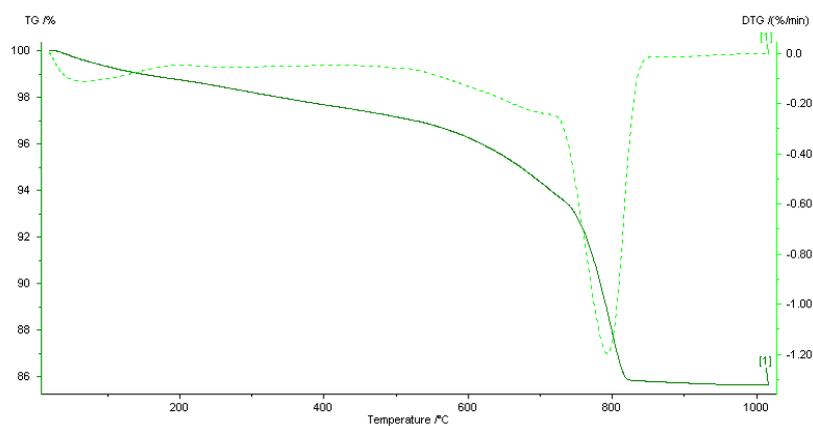
Análise Granulométrica

Difracção de Raios X



Quartzo, calcite, feldspato potássico, plagioclase, mica/ilite

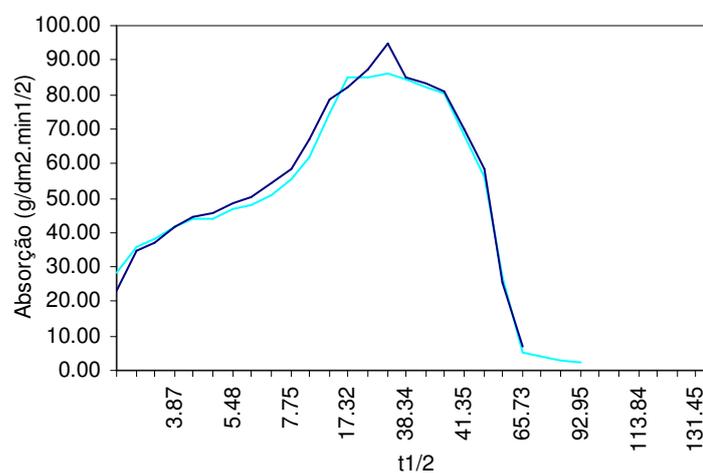
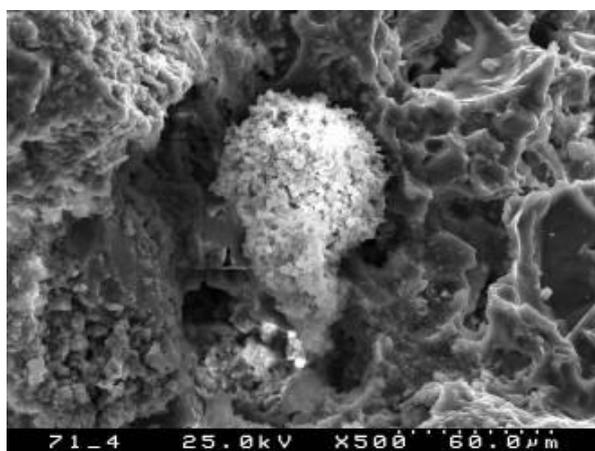
Análise Termogravimétrica



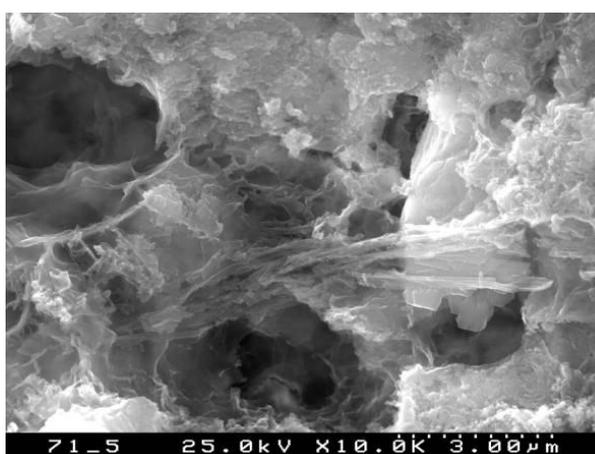
Desidratação e desidroxilação de minerais argilosos e decarbonatação de carbonatos (pico principal correspondente a 10,1%).

Composição Química

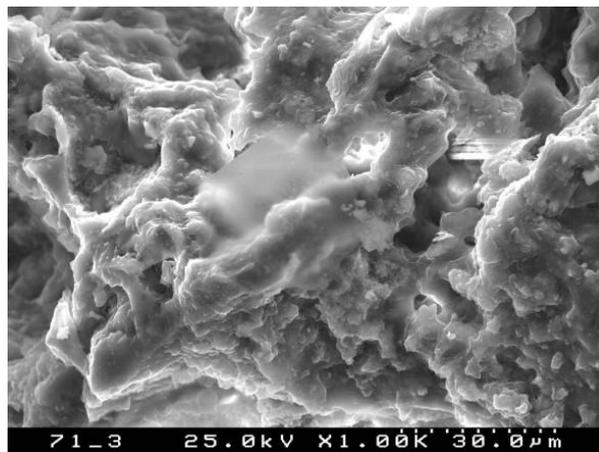
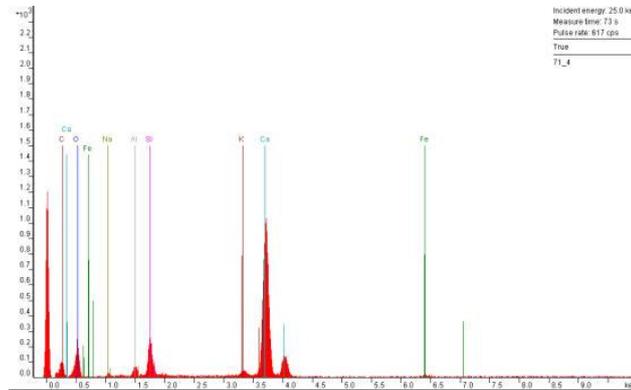
Fe ₂ O ₃	MnO	TiO ₂	CaO	K ₂ O	P ₂ O ₅	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	P.R.
3.27	0.04	0.61	11.14	2.36	0.41	60.49	10.10	0.75	0.55	9.90

Resistência à compressão $R_c = 2,8 \text{ MPa}$ **Coefficiente de Capilaridade**Do interior para o exterior: $4.27 \text{ g/dm}^2 \cdot \text{min}^{1/2}$ **Absorção e secagem****Microscopia Electrónica Varrimento
(MEV/EDS)**

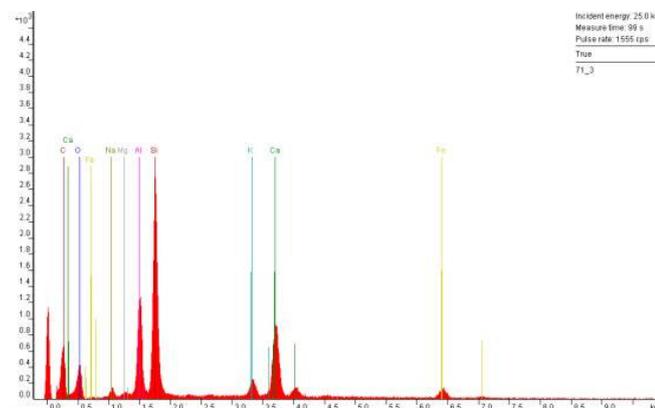
Morfologia diversificada da argamassa.



Aproximação sobre a estrutura alveolar constituída por aluminossilicatos de cálcio.



Zona de argamassa com aspecto de gel constituído por aluminossilicatos de cálcio.



Ficha 41 - FR3

Amostragem

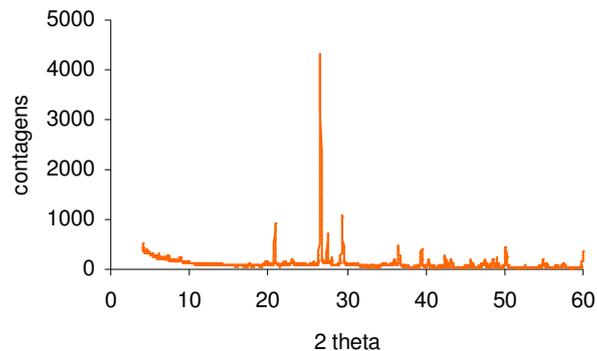


Descrição



Argamassa composta por duas camadas. Camada exterior rosada de 5 mm e camada interior em argamassa de cal.

Difracção de Raios X (ext)



Quartzo, calcite, feldspato potássico, plagioclase, pirite

Composição Química (ext)

Fe ₂ O ₃	MnO	TiO ₂	CaO	K ₂ O	P ₂ O ₅	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	P.R.
3.86	0.04	0.69	10.02	2.72	0.29	57.89	11.99	0.84	0.65	9.90

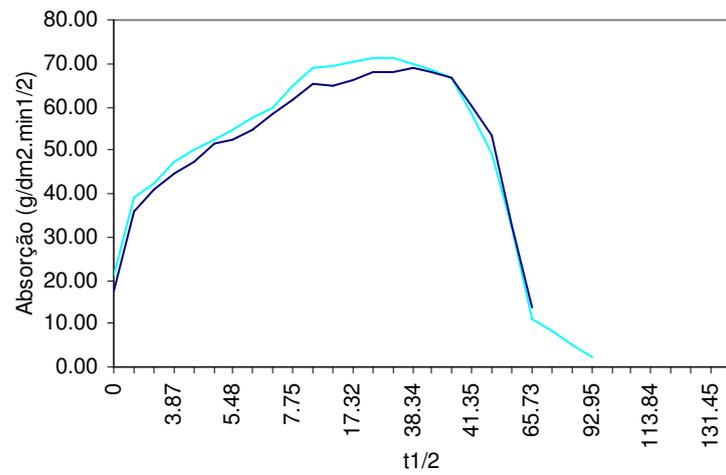
Resistência à compressão

$R_c = 2,3 \text{ MPa}$ (camada interior)

Coefficiente de Capilaridade

Do interior para o exterior: $4,03 \text{ g/dm}^2 \cdot \text{min}^{1/2}$

Absorção e secagem



Ficha 42 - MC3**Amostragem****Descrição**

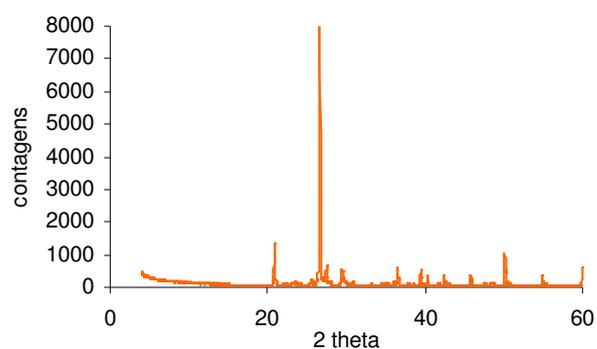
Argamassa de cal, esbranquiçada, com agregado fino e bastante porosa.

Dissolução ácida (ácido clorídrico)

Percentagem solúvel: 18%

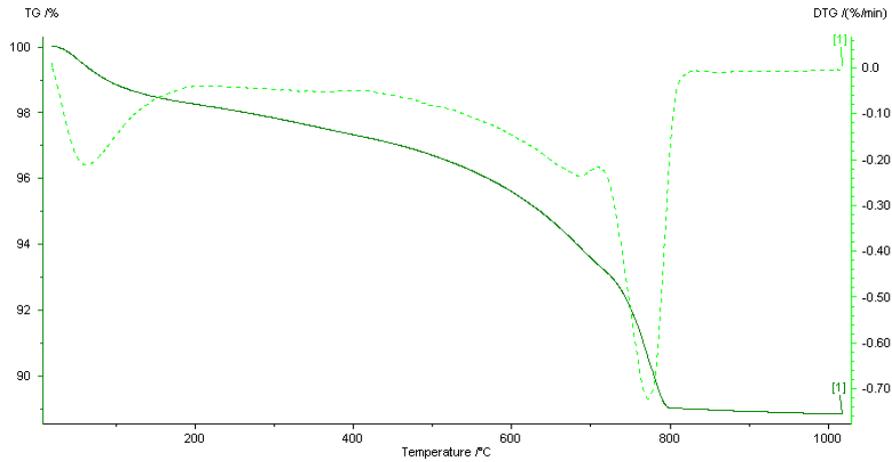
Resíduo: 82%

Resíduo composto por areia siliciosa.

Difracção de Raios X

Quartzo, calcite, feldspato potássico, dolomite, mica/ilite, vestígios hematite

Análise Termogravimétrica



Desidratação e desidroxilação de minerais argilosos e descarbonatação de carbonatos (pico principal correspondente a 6,5%).

Composição Química

Fe ₂ O ₃	MnO	TiO ₂	CaO	K ₂ O	P ₂ O ₅	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	P.R.
1.33	0.08	0.13	9.32	3.27	0.20	64.56	5.99	3.79	0.57	9.90

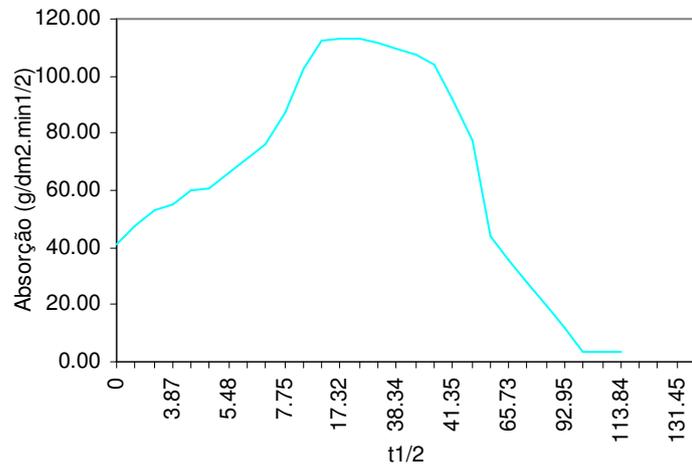
Resistência à compressão

R_c = 2,2 MPa

Coefficiente de Capilaridade

Do exterior para o interior: 7,85 g/dm².min^{1/2}

Absorção e secagem



Ficha 43 - MC4**Amostragem****Descrição**

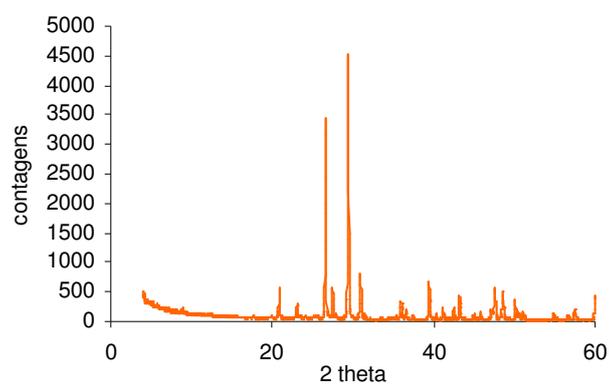
Argamassa terrosa com agregado anguloso até 2cm.

Dissolução ácida (ácido clorídrico)

Percentagem solúvel: 10%

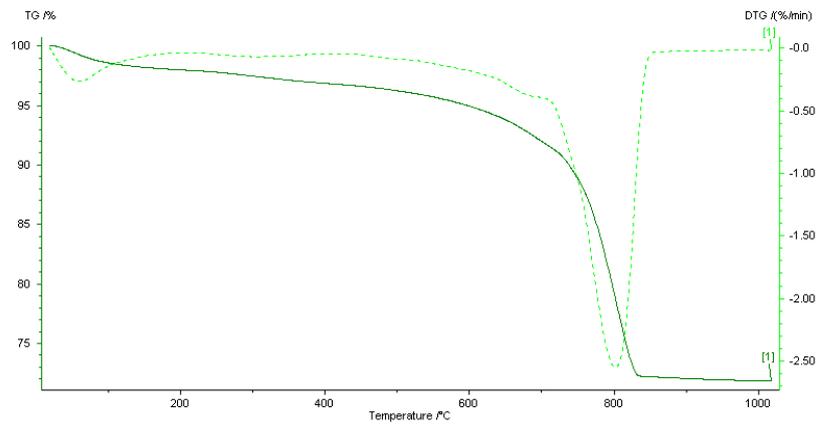
Resíduo: 90%

Agregado composto por

Difracção de Raios X

Calcite, quartzo, dolomite, feldspato potássico, mica/ilite

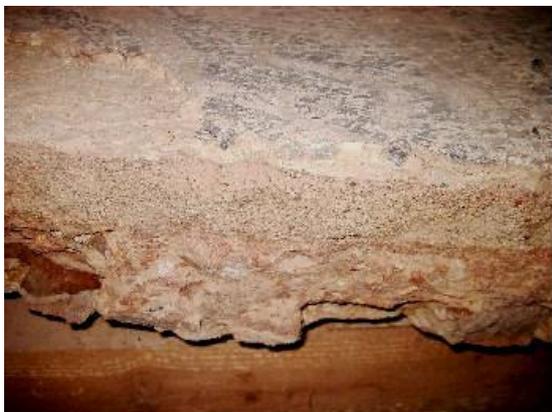
Análise Termogravimétrica



Desidratação e desidroxilação de minerais argilosos e decarbonatação de carbonatos (pico principal correspondente a 23,2%).

Composição Química

Fe ₂ O ₃	MnO	TiO ₂	CaO	K ₂ O	P ₂ O ₅	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	P.R.
1.53	0.14	0.13	28.35	1.37	0.10	32.15	3.40	5.06	0.35	26.60

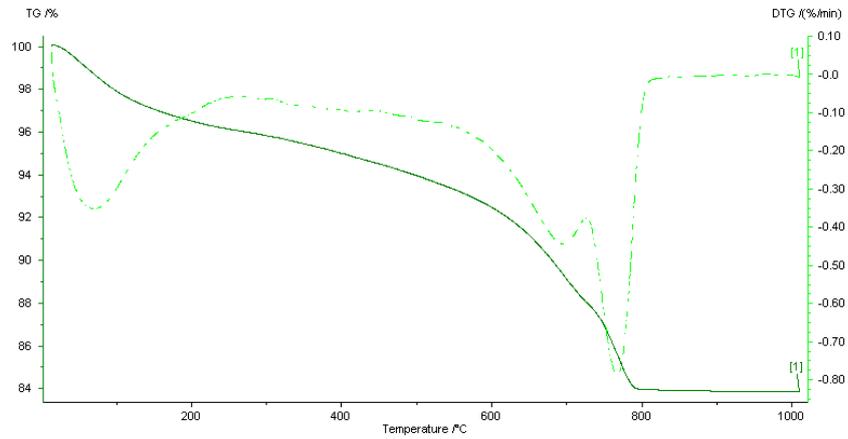
Ficha 44 - BR**Amostragem****Descrição**

Argamassa fabricada com agregado cerâmico grosso, com grande heterogeneidade de cozedura.

Resistência à compressão

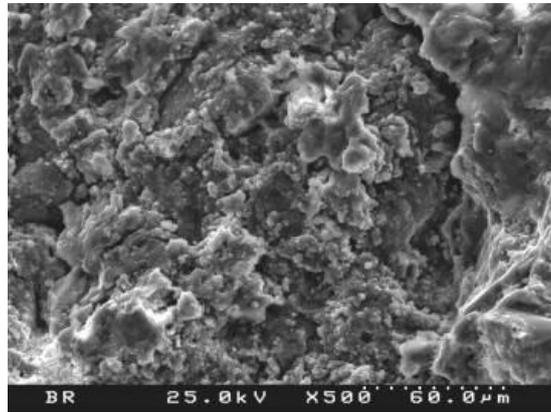
$R_c = 3,0 \text{ MPa}$

Análise Termogravimétrica

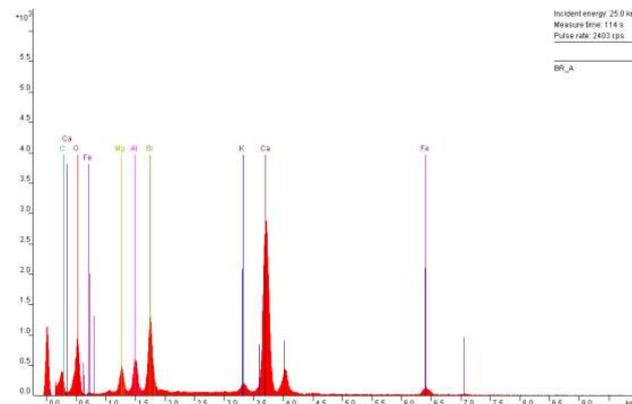


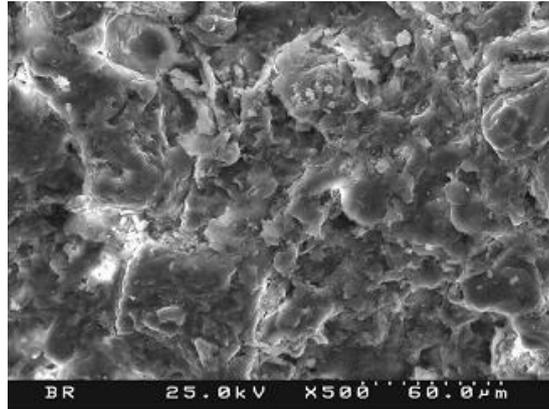
Desidratação e desidroxilação de minerais argilosos até aos 600°C e decarbonatação de carbonatos (pico duplo a 700°C e 780°C, correspondente a 10,2%) até aos 810°C.

Microscopia Electrónica Varrimento (MEV/EDS)

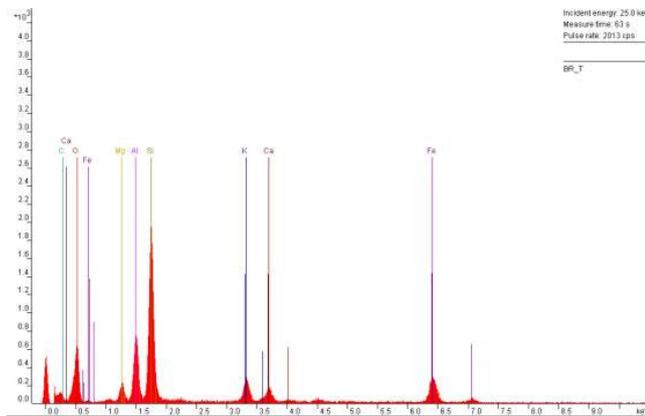


Morfologia geral da argamassa.





Aspecto micro-morfológico do tijolo.



Ficha 45 - SF1

Amostragem

Descrição



Argamassa terrosa com agregado variado ao nível de dimensão e coloração.

Dissolução ácida (ácido clorídrico)

Percentagem solúvel: 25%

Resíduo: 75%

Agregado composto por partículas argilosas e areia com forma e coloração variada.

Difracção de Raios X

Quartzo, calcite, plagioclase, mica, caulinite, zeólitos e gesso/anidrite

Ficha 46 - BA**Amostragem****Descrição**

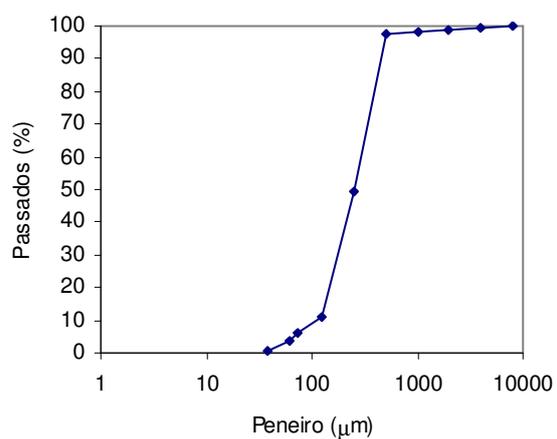
Argamassa bastante uniforme, de cor cinzenta, com grãos de cal e agregado fino.

Dissolução ácida (ácido clorídrico)

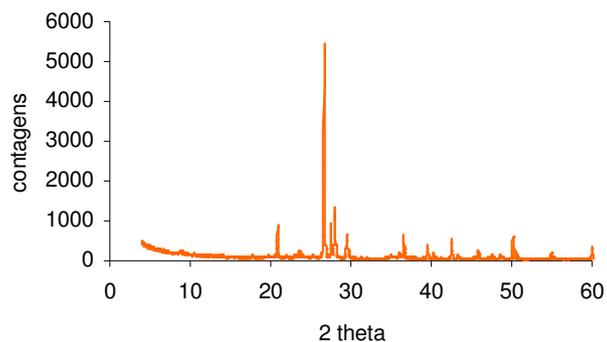
Percentagem solúvel: 33%

Resíduo: 67%

Resíduo composto por mistura de pó claro e negro e areia

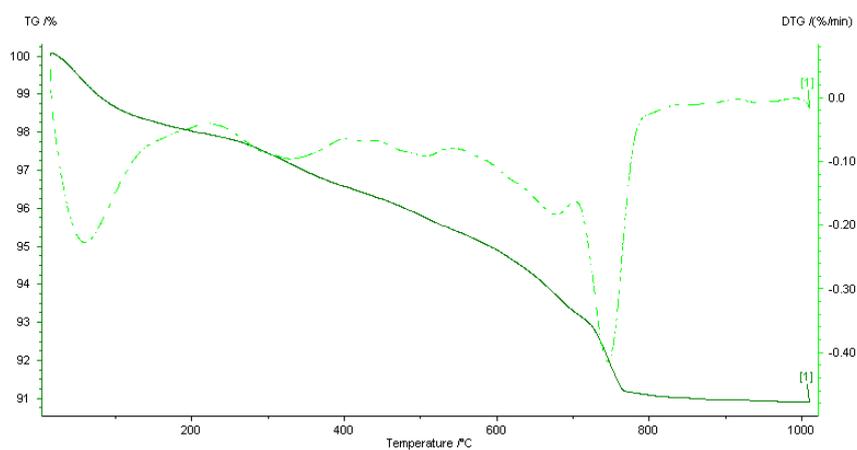
Análise Granulométrica

Difração de Raios X



Quartzo, feldspato, calcite

Análise Termogravimétrica



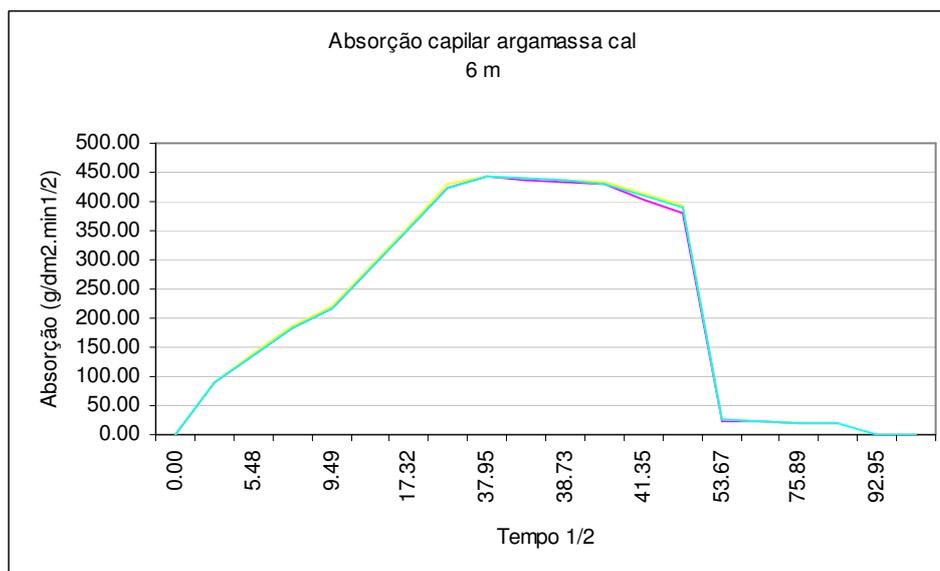
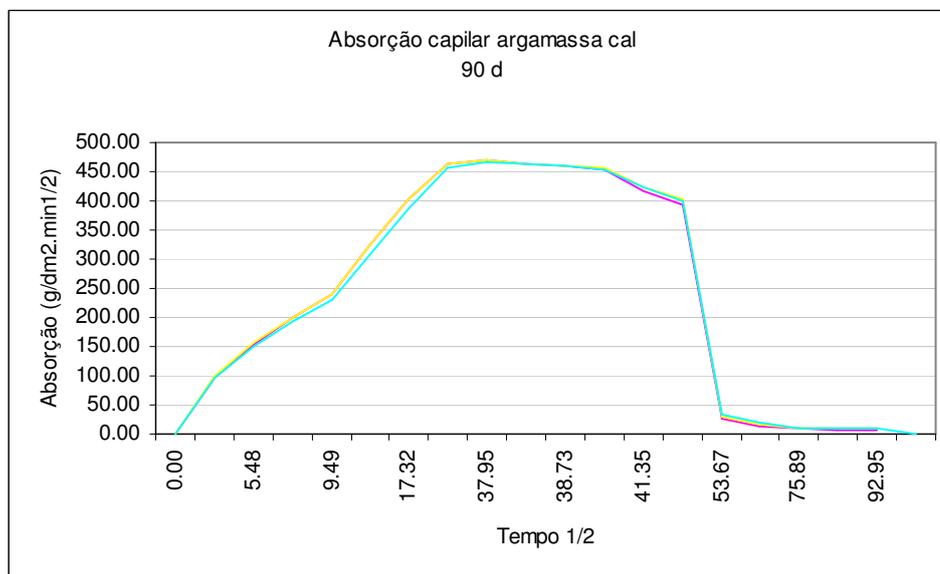
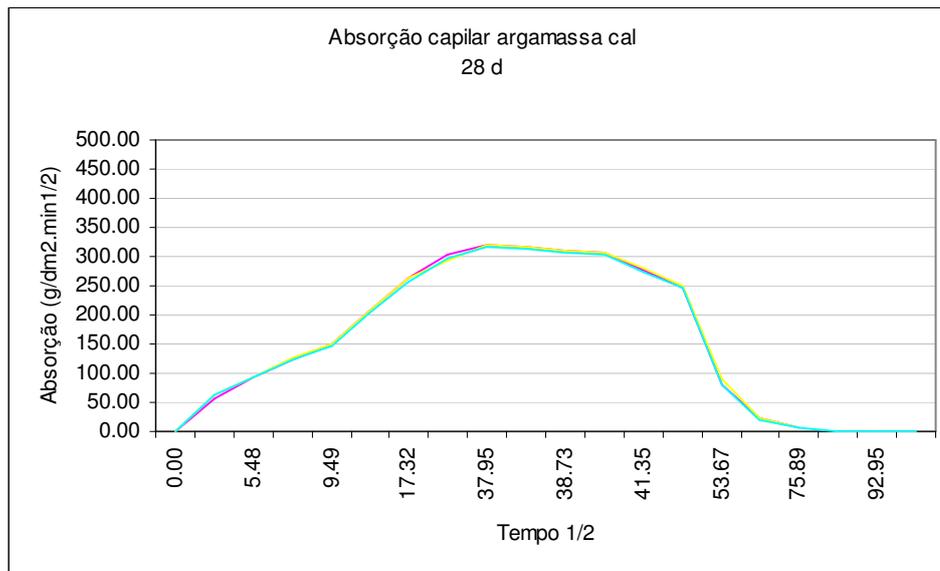
Desidratação e desidroxilação de minerais argilosos até aos 600°C e descarbonatação de carbonatos (pico duplo a 700°C e 750°C, correspondente a 4,0%) até aos 800°C.

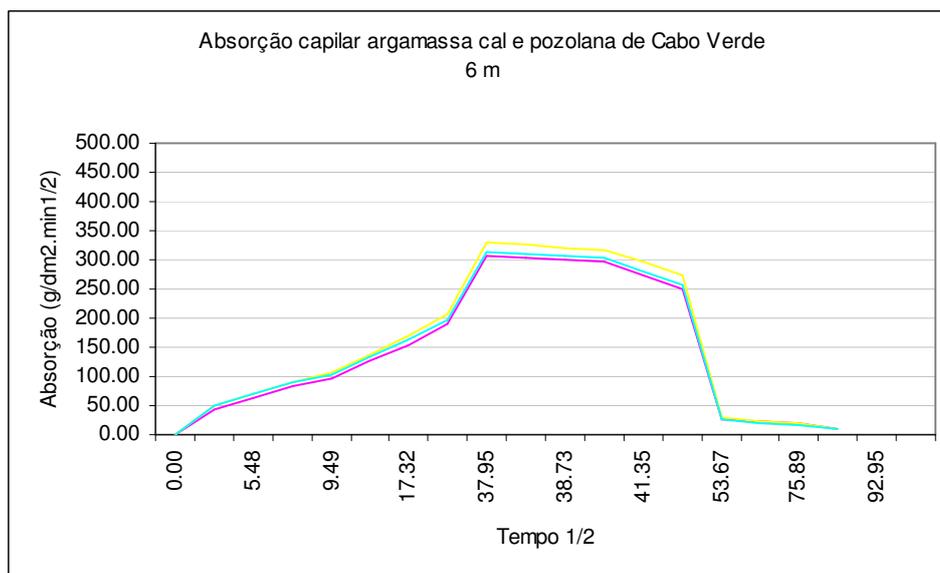
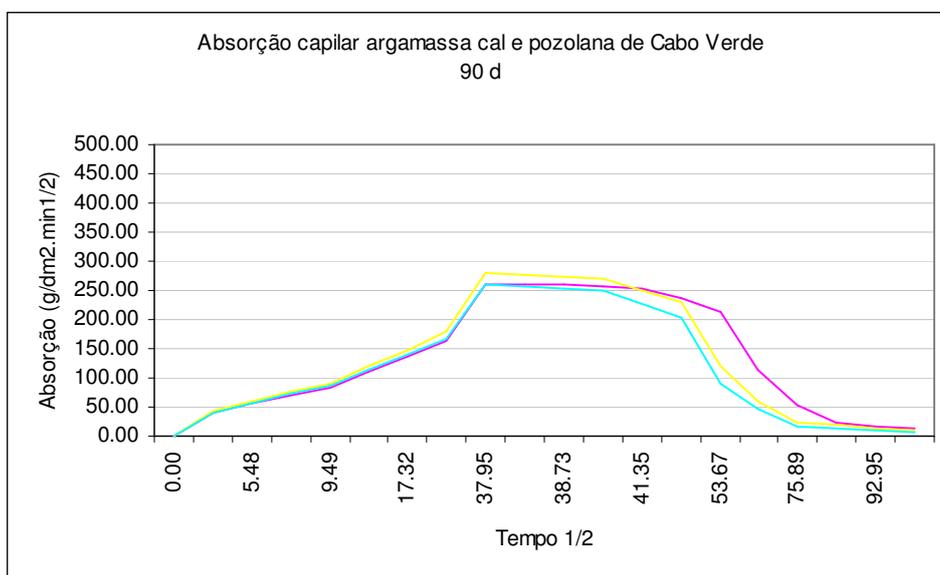
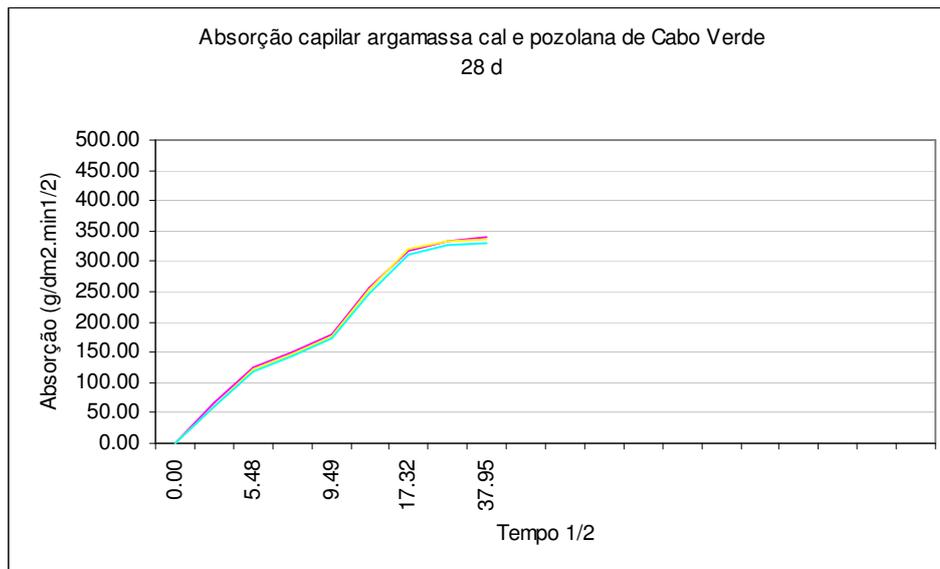
Composição Química

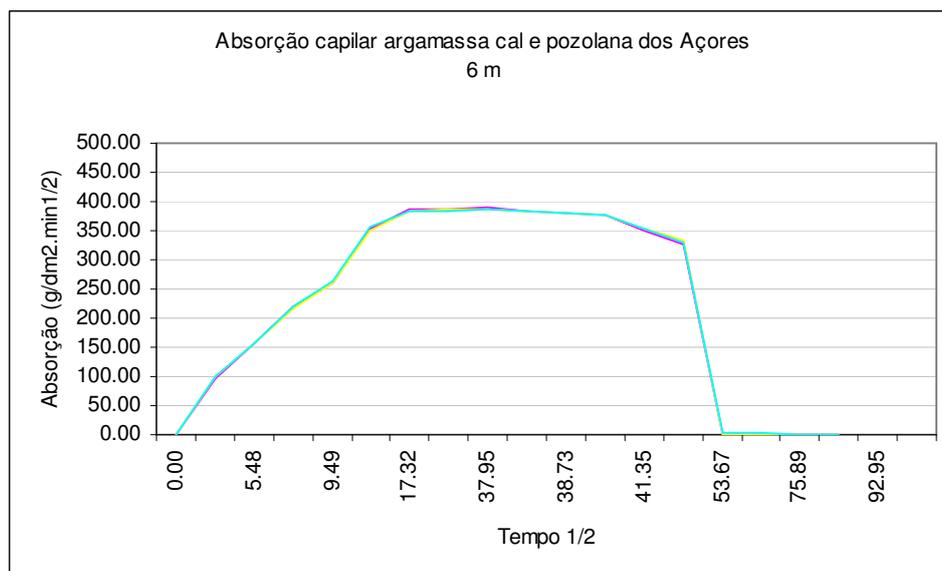
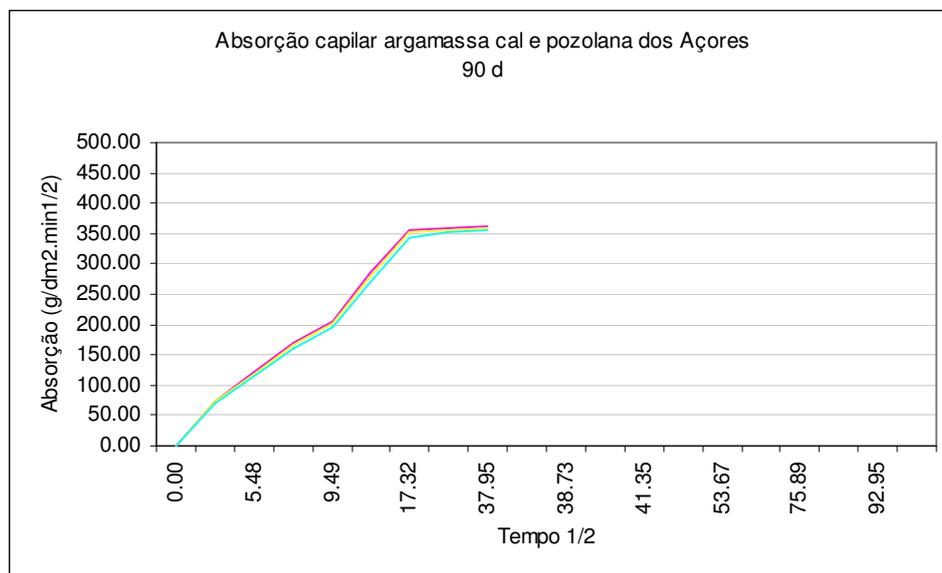
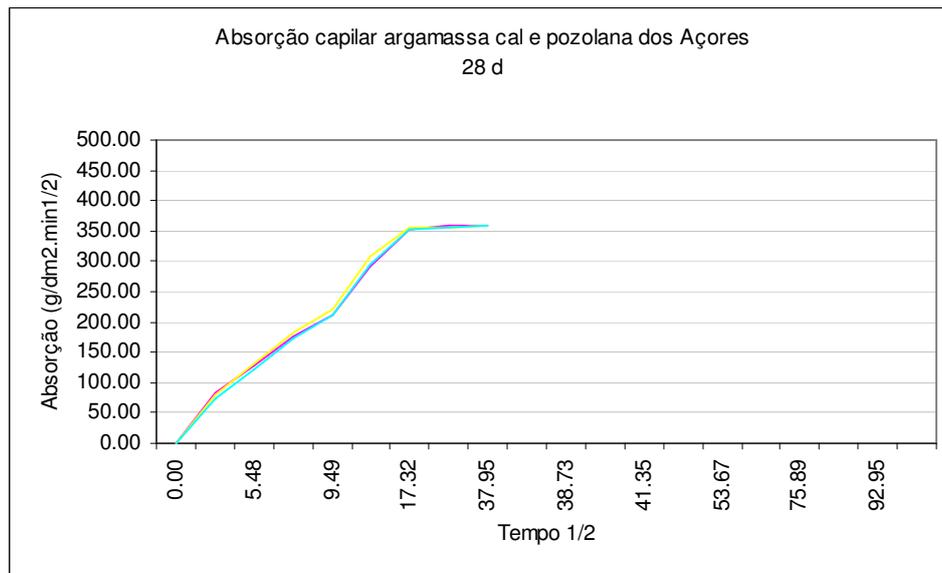
Fe ₂ O ₃	MnO	TiO ₂	CaO	K ₂ O	P ₂ O ₅	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	P.R.
3.28	0.08	0.56	5.55	1.83	0.11	64.84	10.01	4.52	1.88	7.20

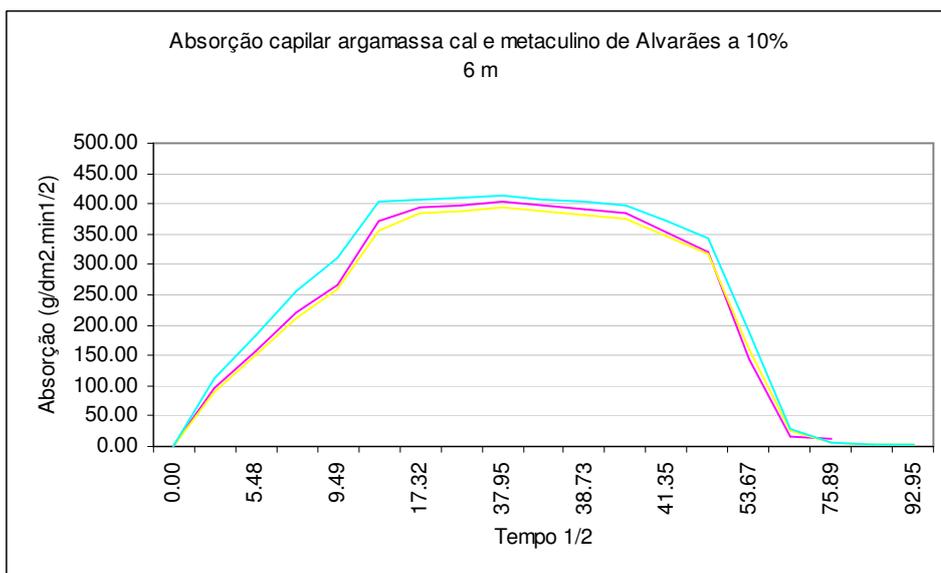
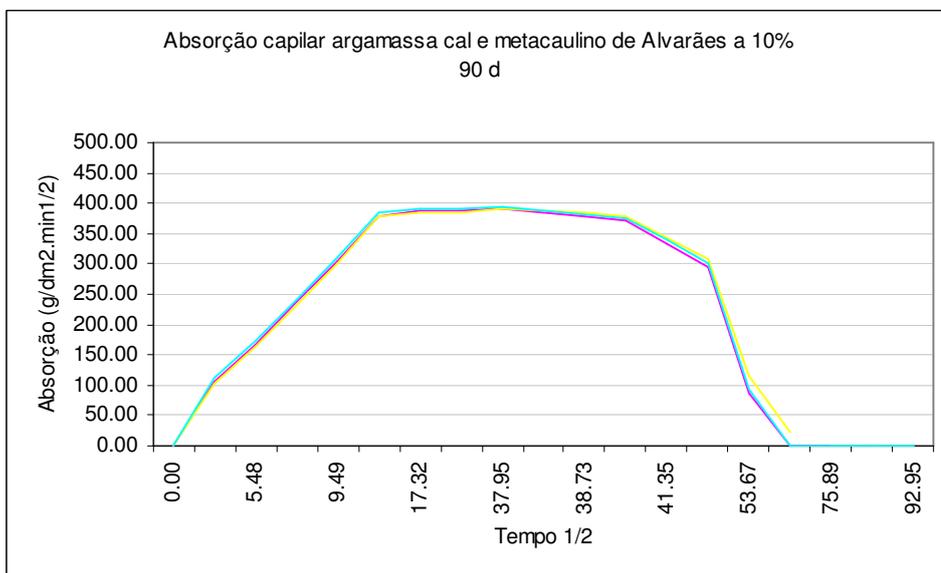
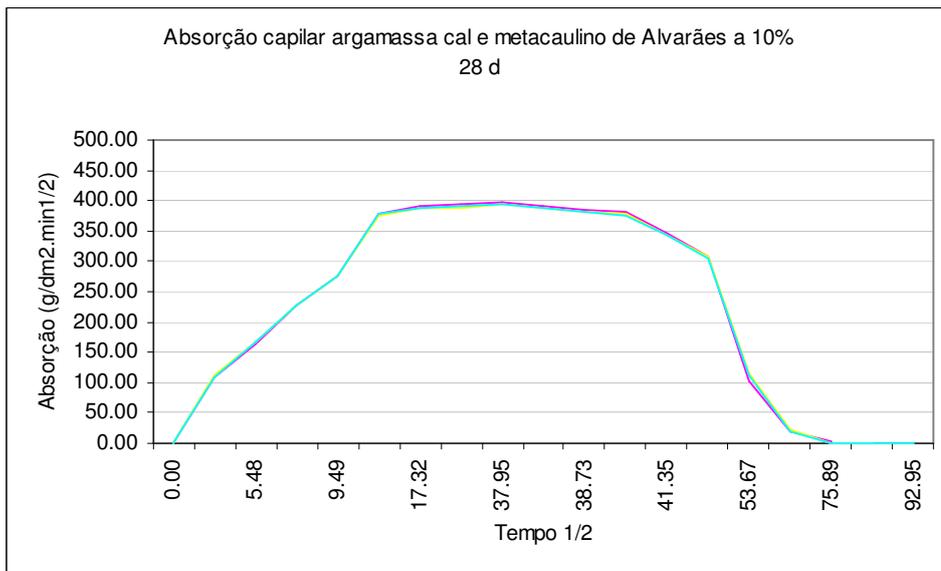
ANEXO 2

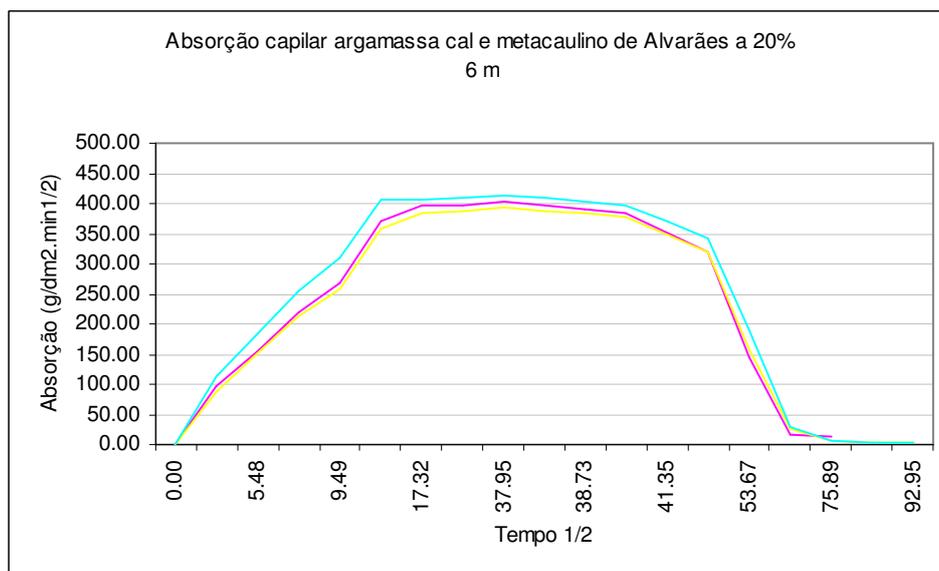
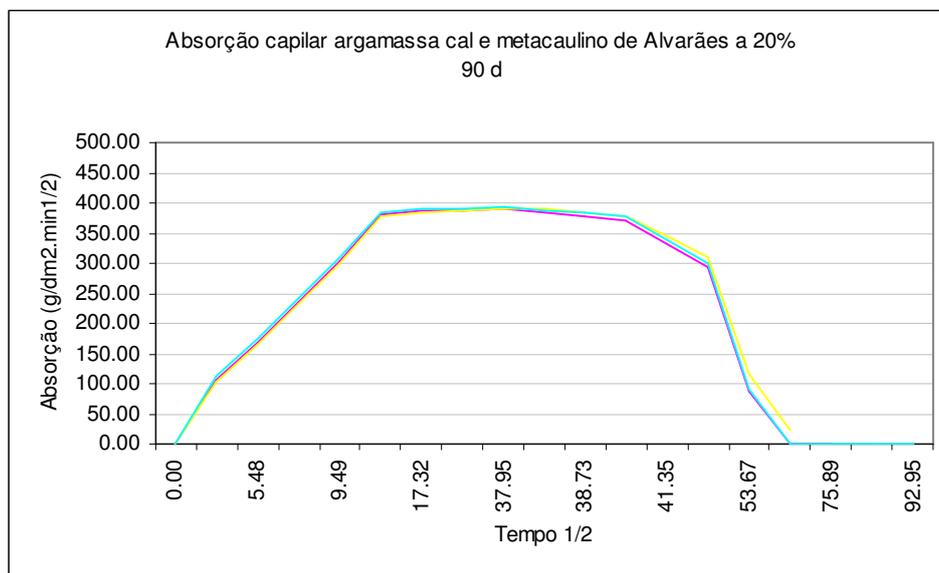
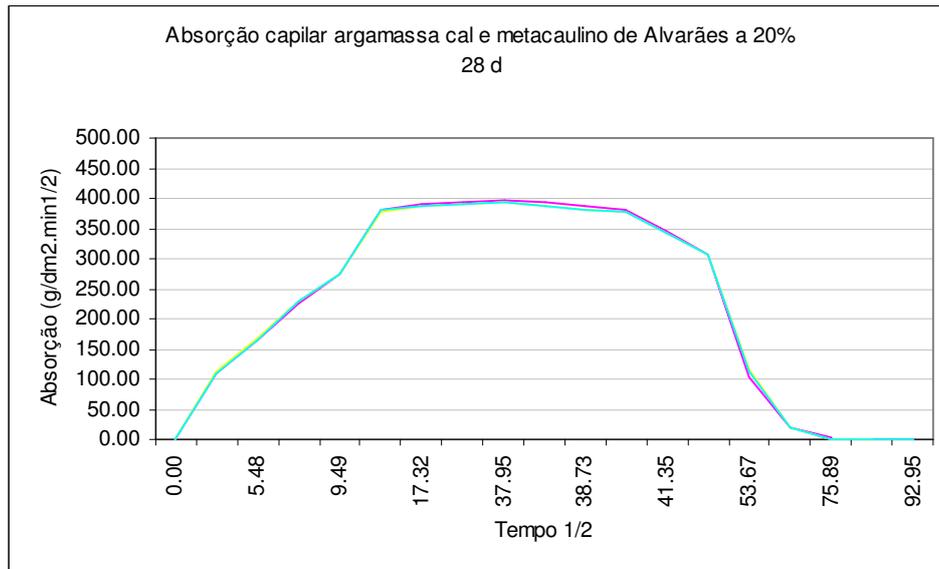
Ensaio de absorção capilar e secagem

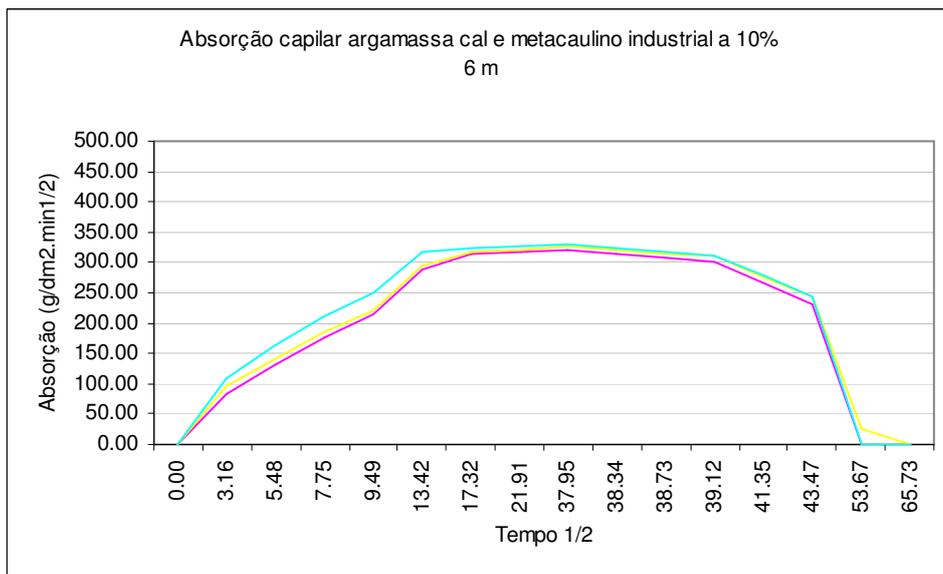
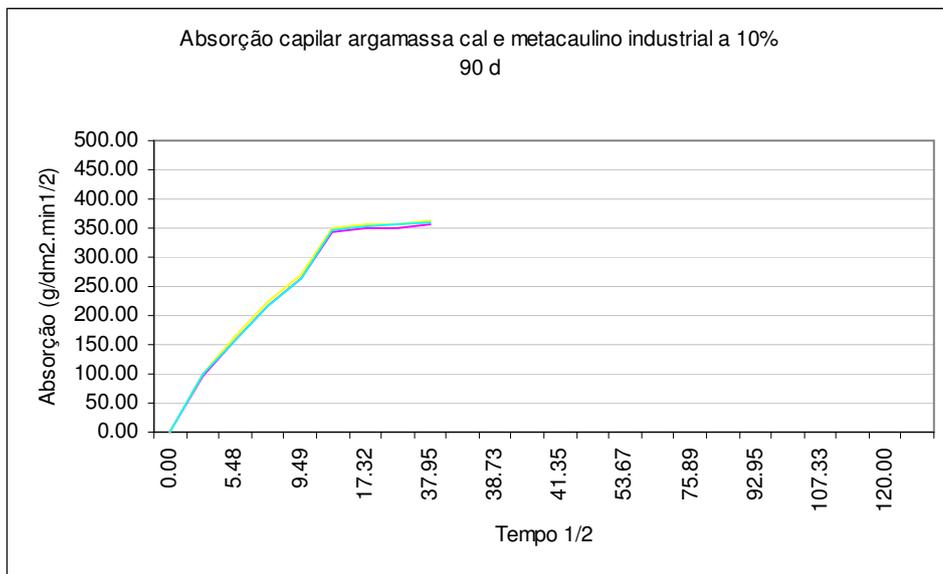
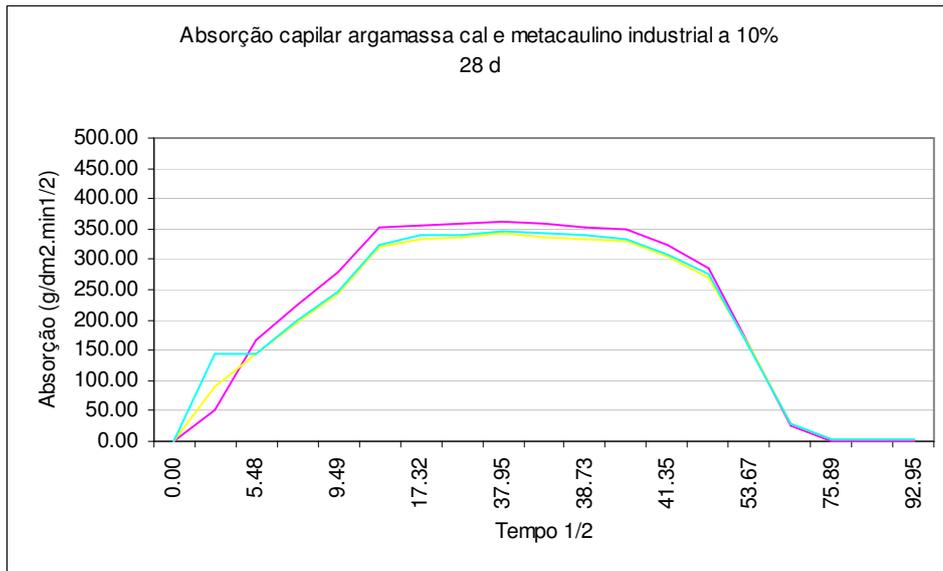


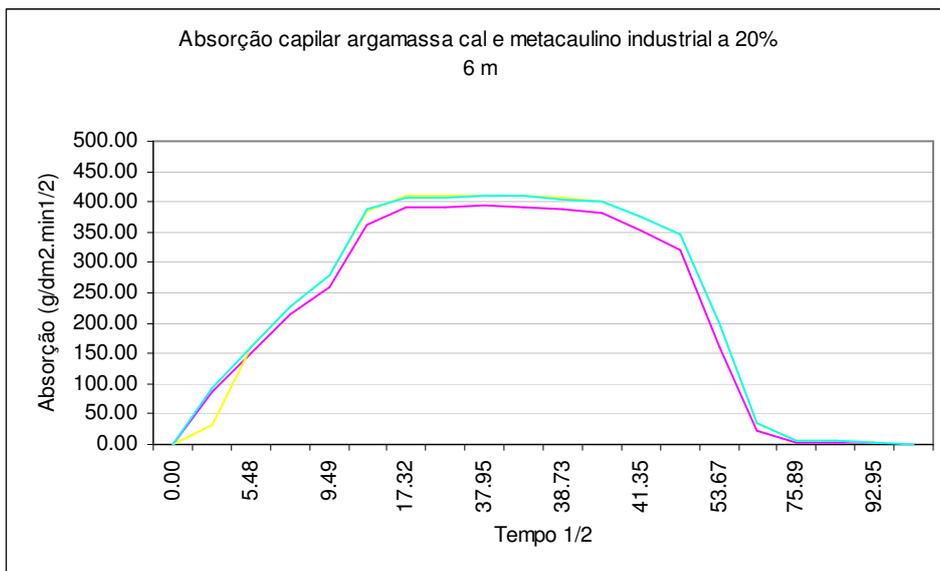
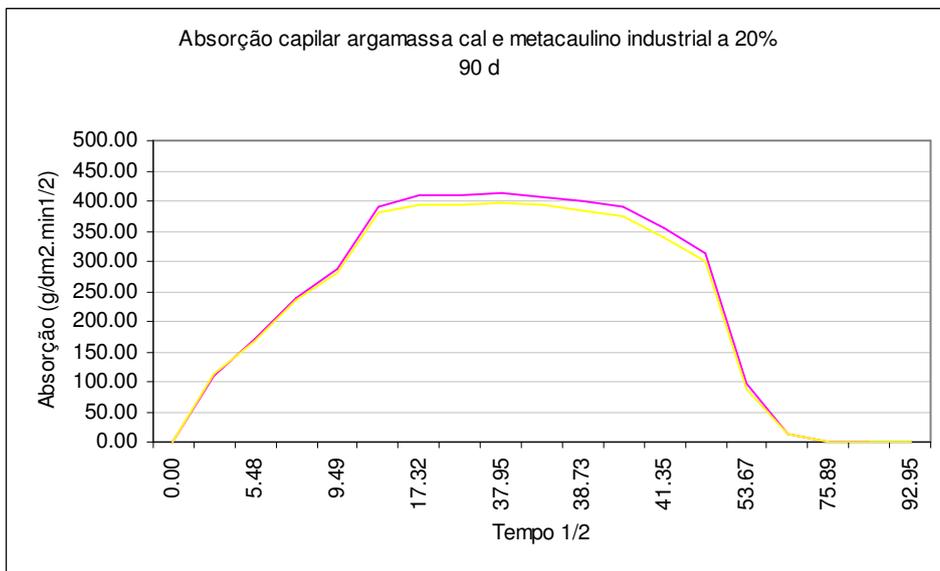
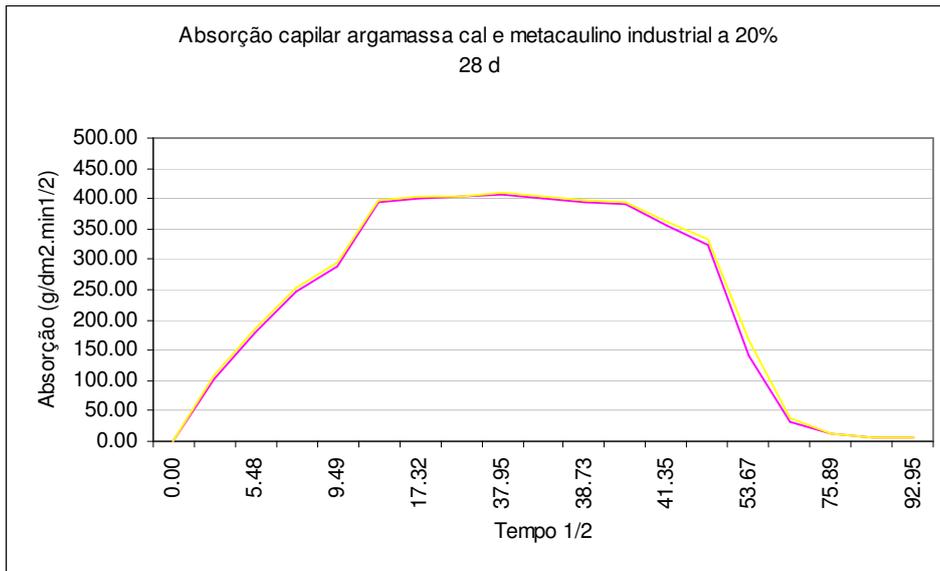


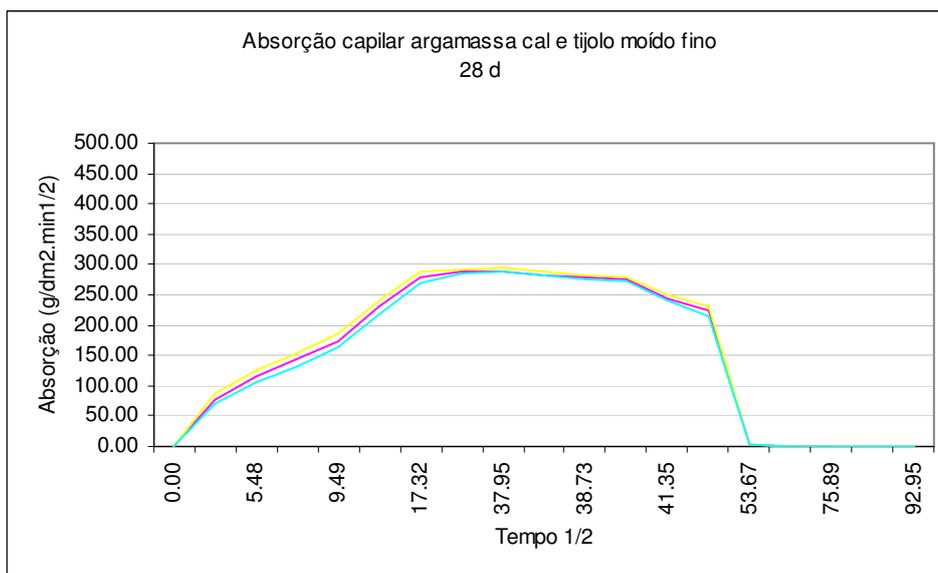
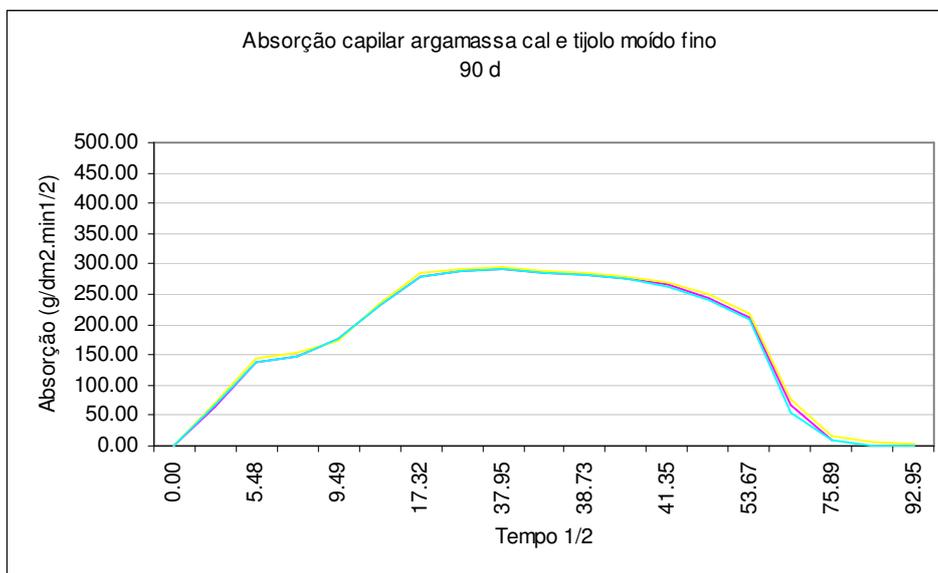
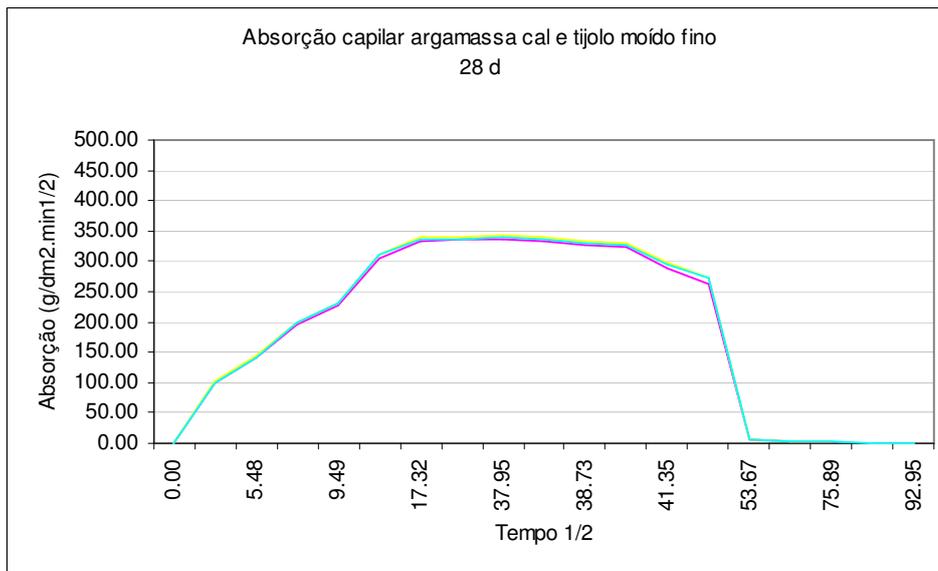


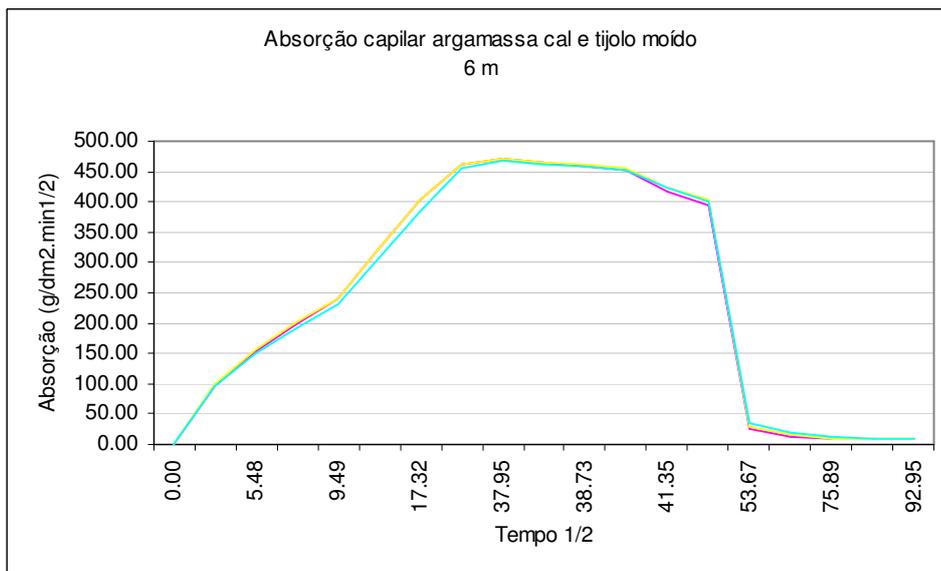
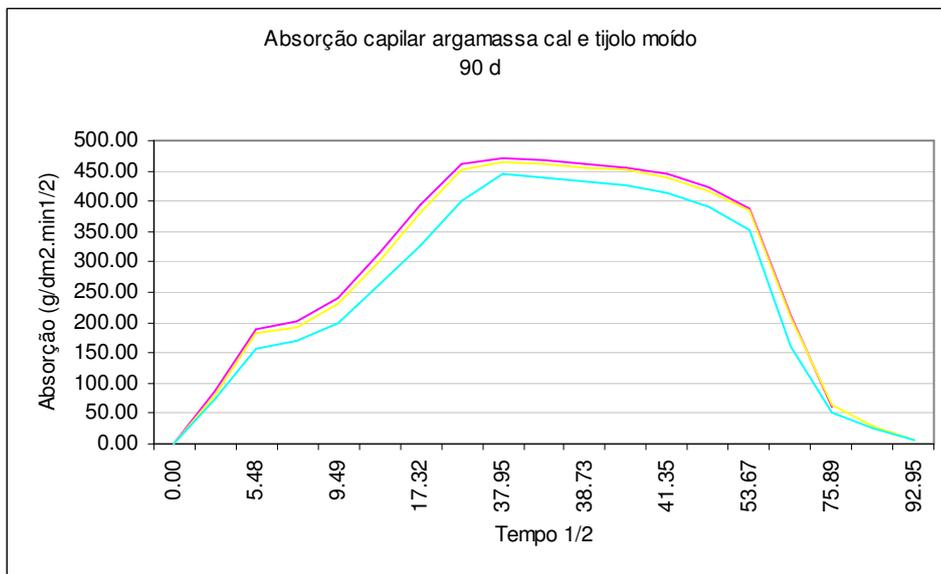
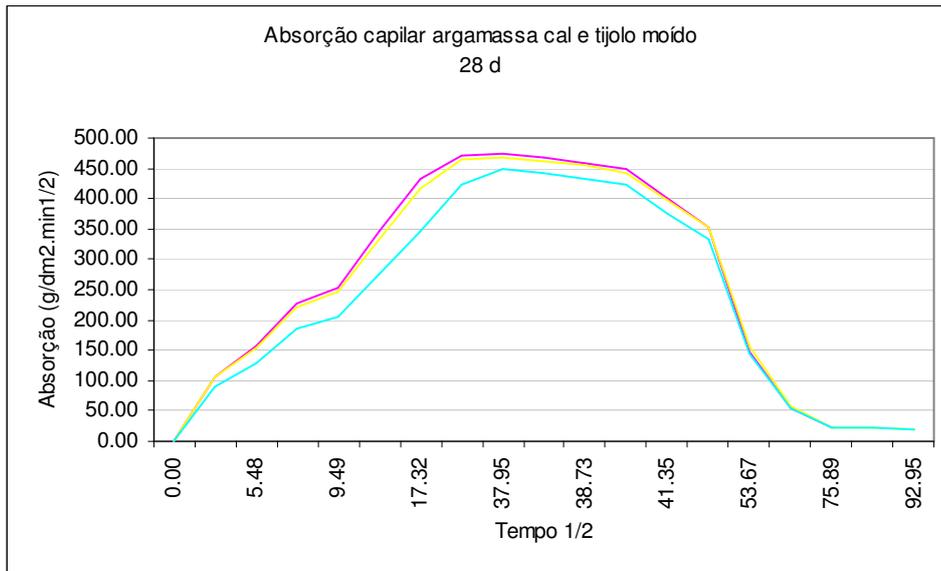


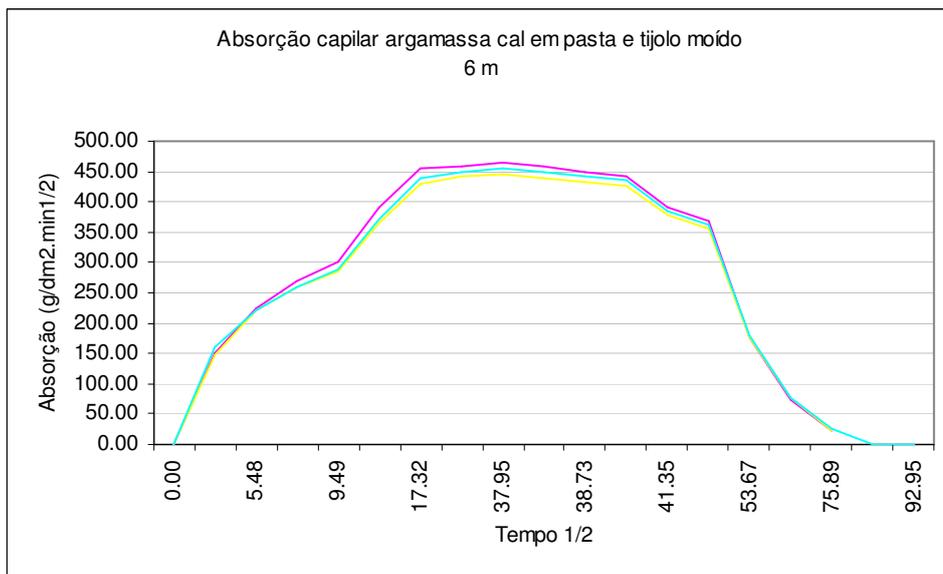
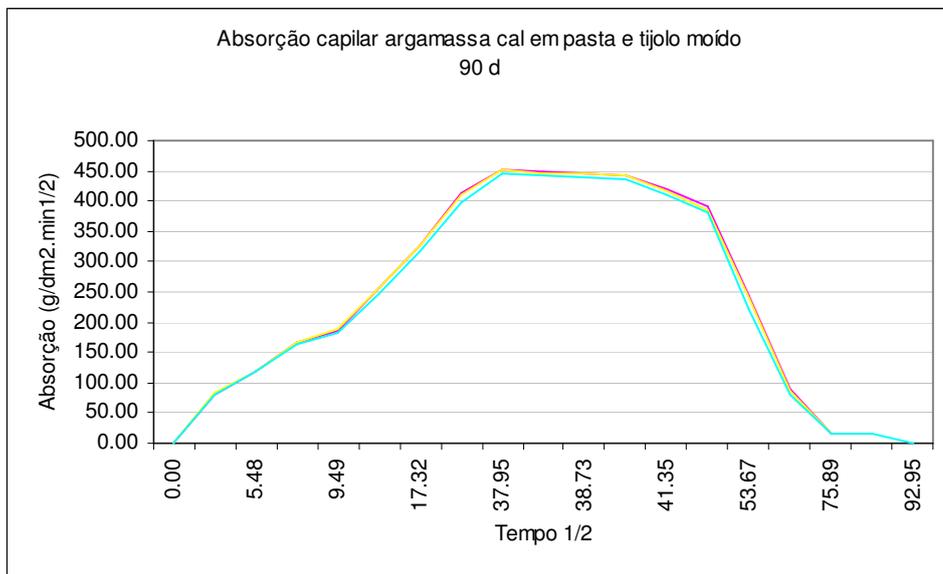
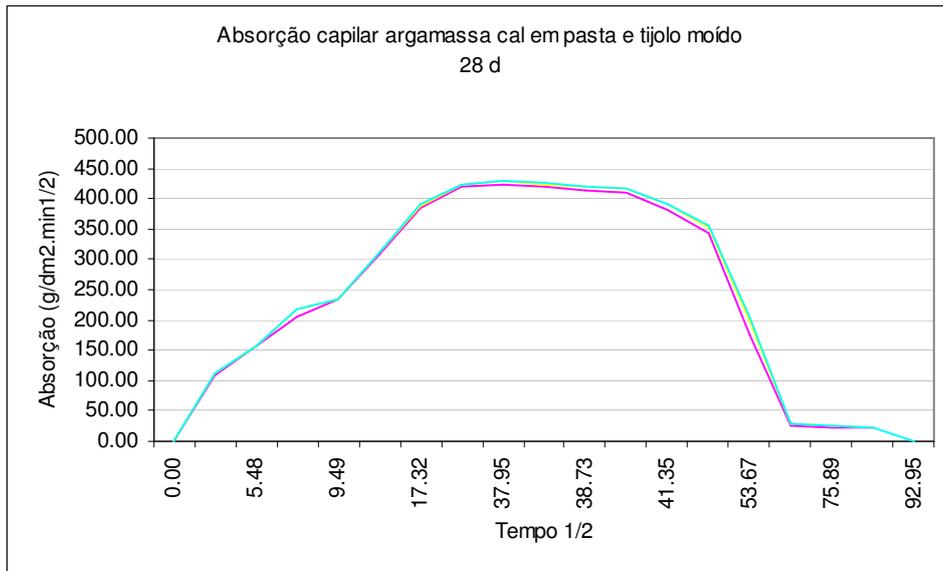


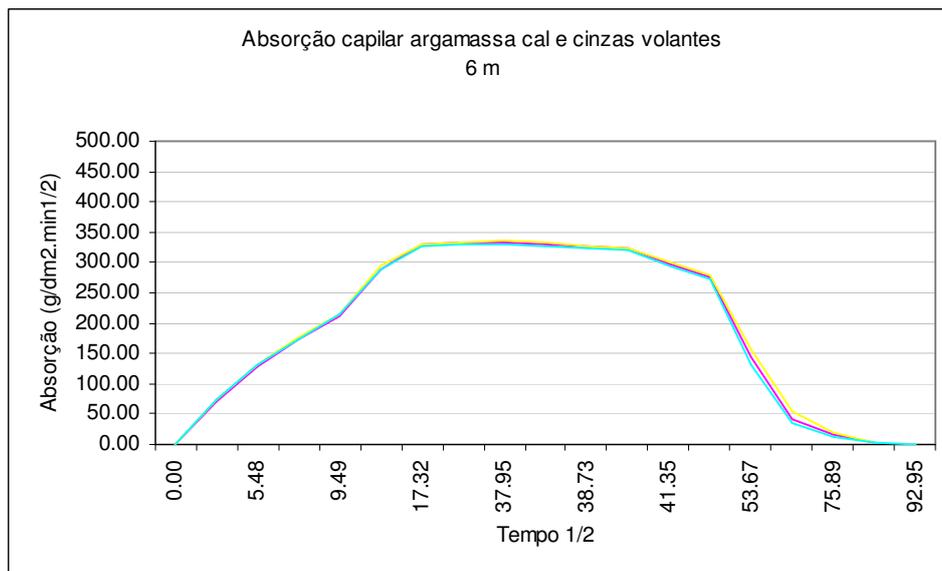
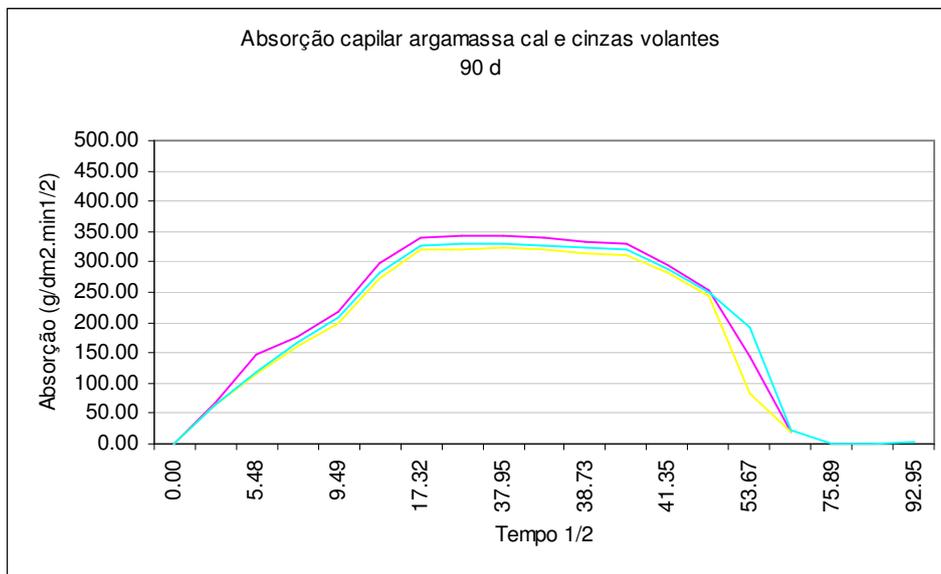
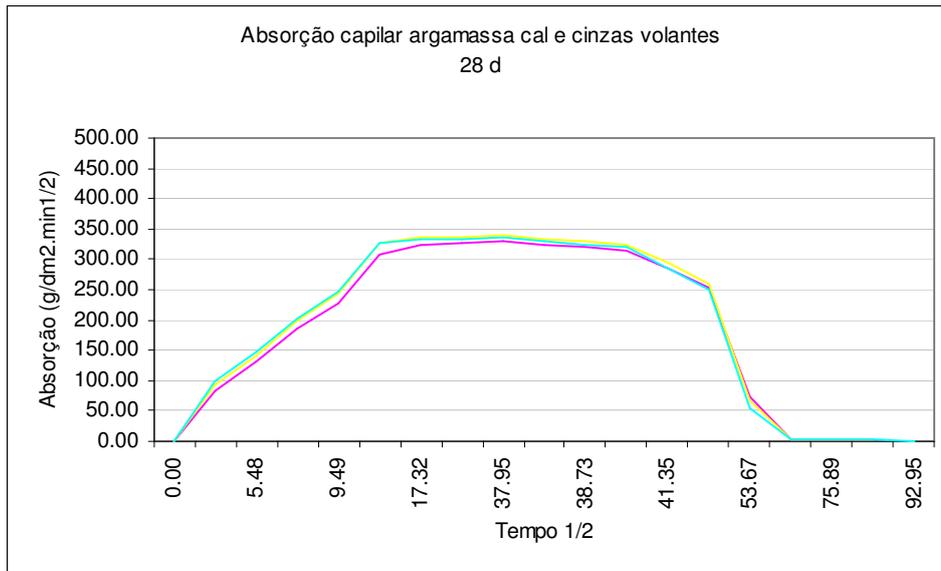


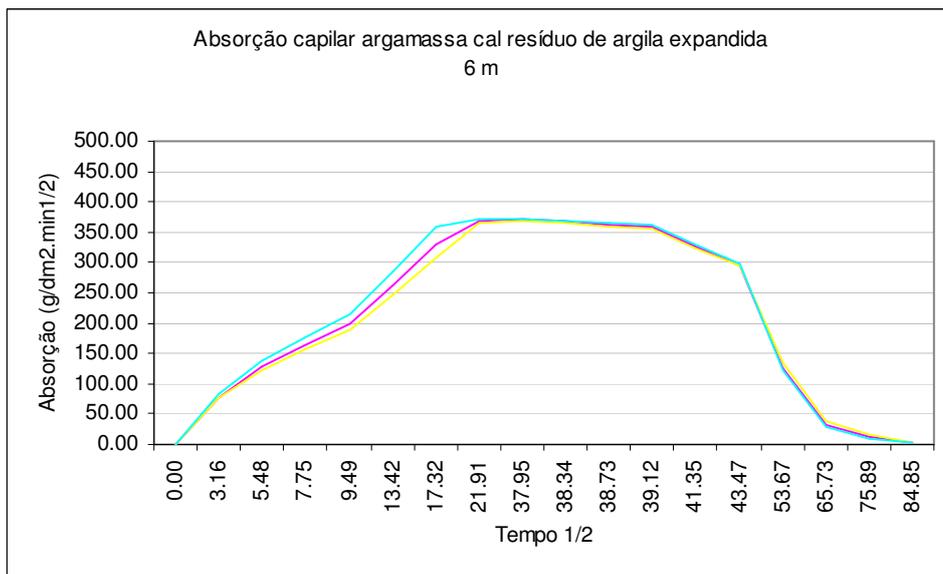
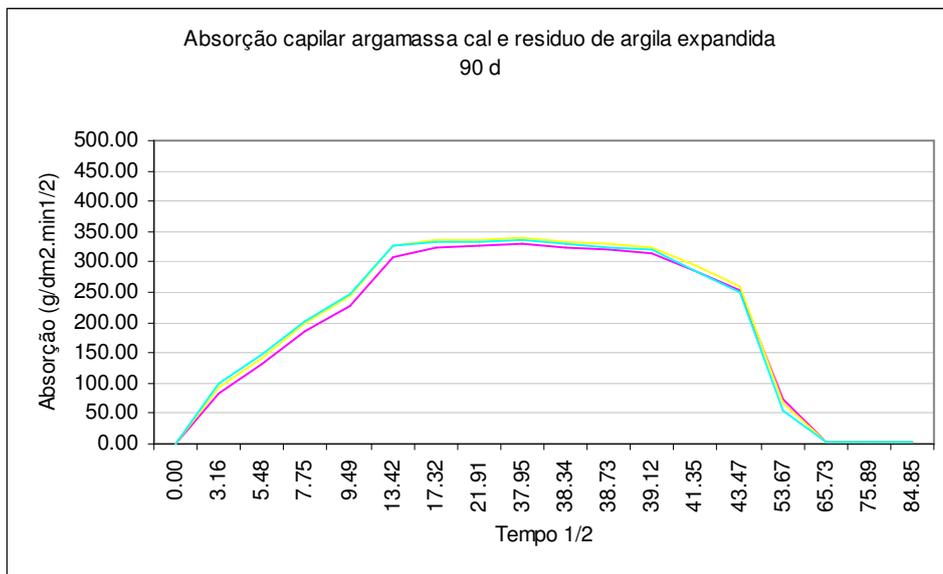
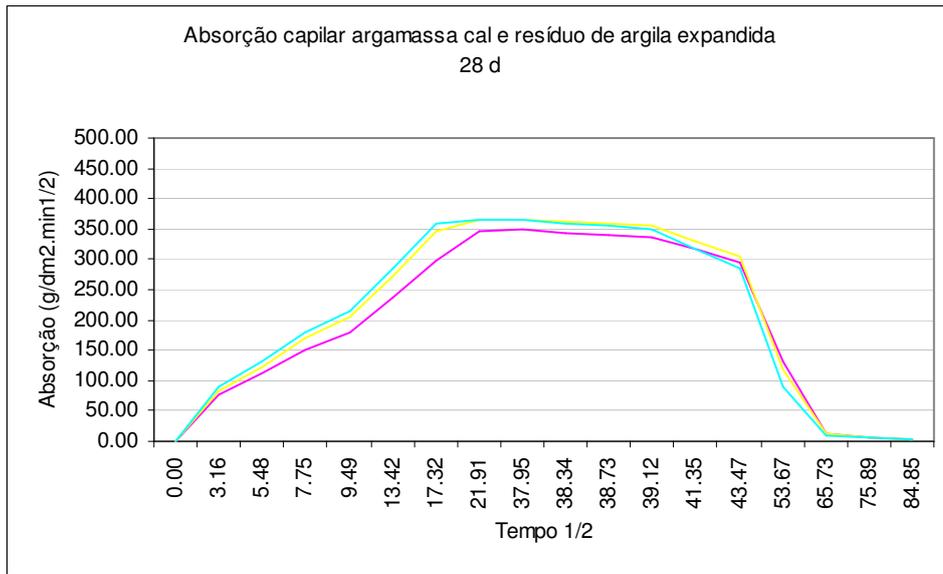






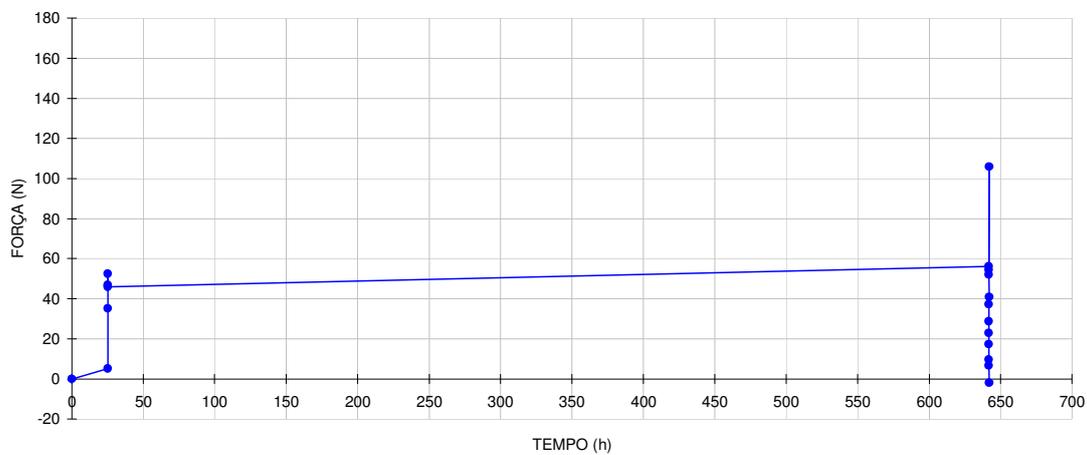




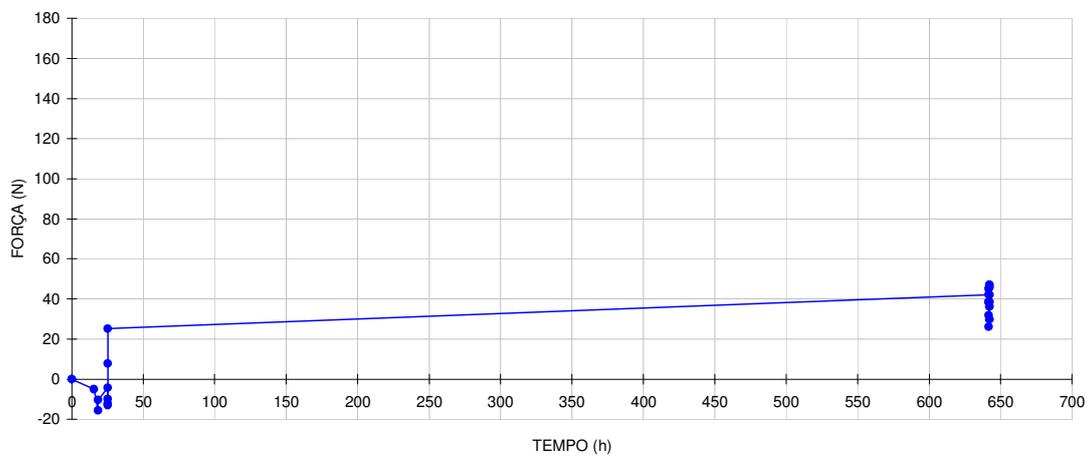


Ensaio de susceptibilidade à fendilhação

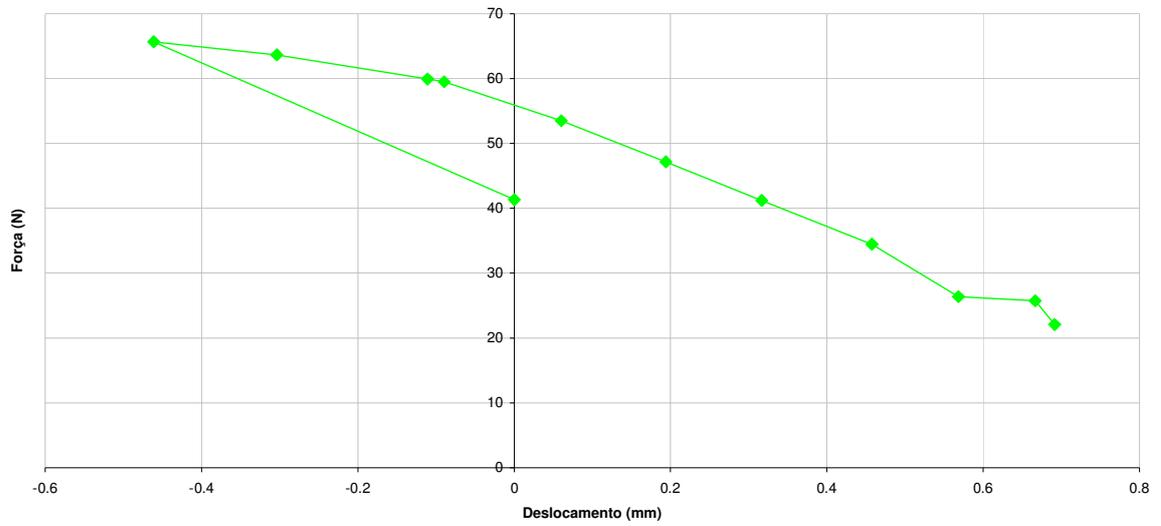
FORÇA - Cal e Pozolana de Cabo Verde - CPCV



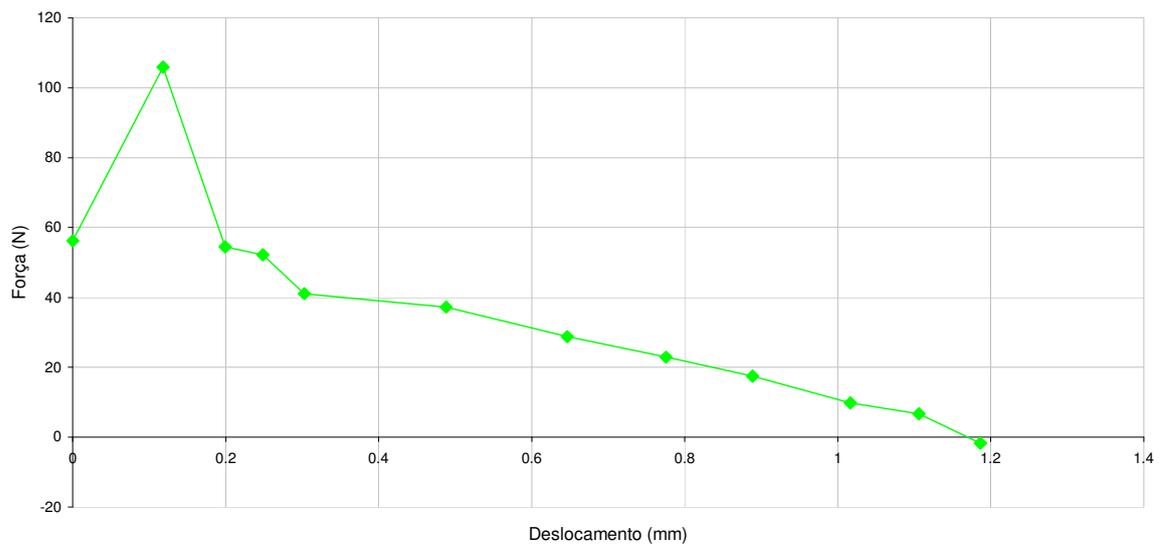
FORÇA - Cal e Pozolana de Cabo Verde - CPCV



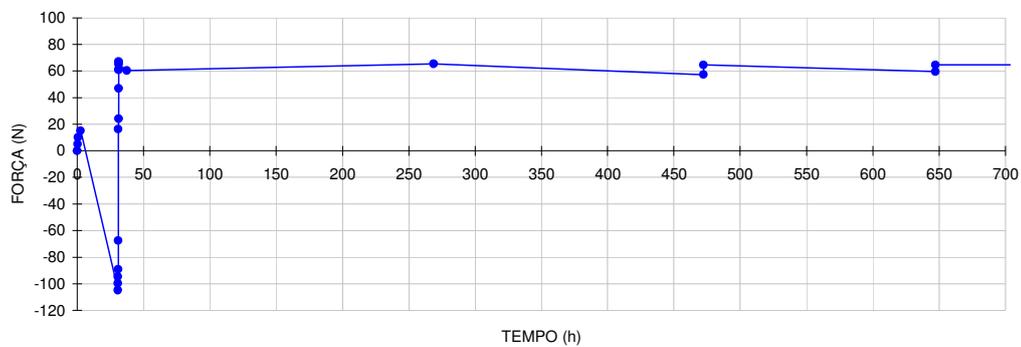
FORÇA-DESLOCAMENTO - Cal e pozolana de Cabo Verde-AP0



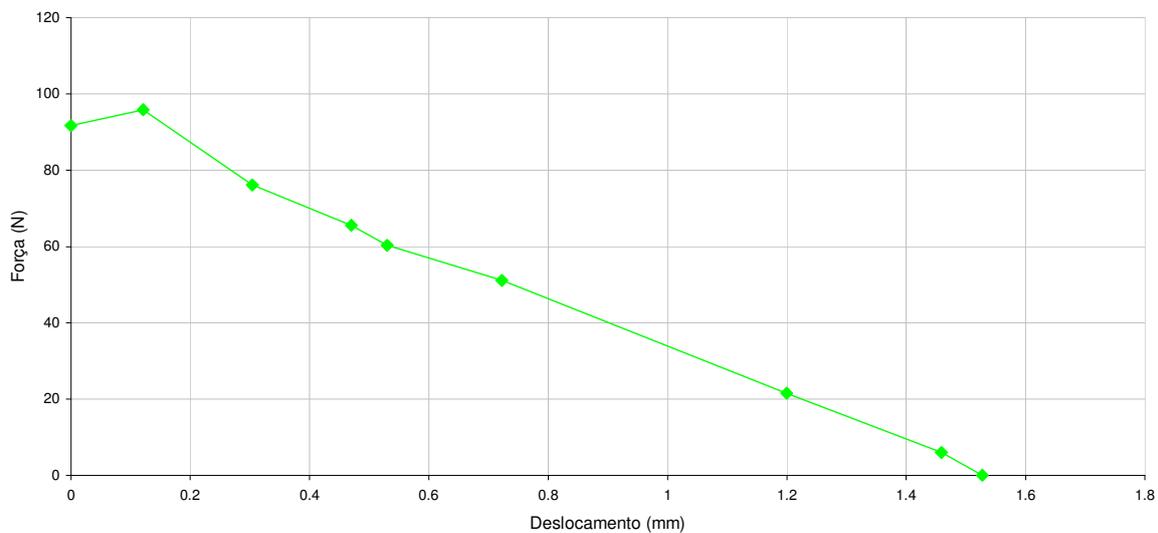
FORÇA-DESLOCAMENTO - Cal e Pozonala de Cabo Verde - CPCV



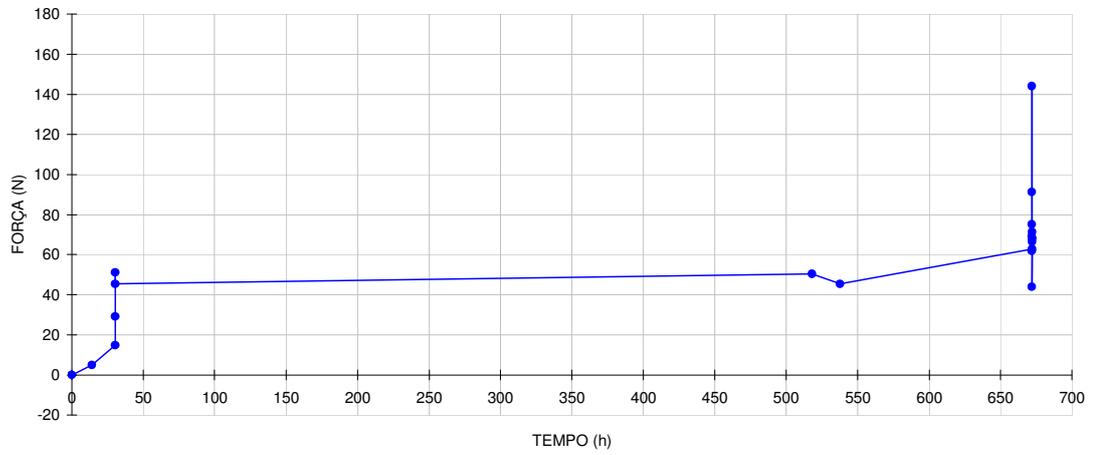
FORÇA - Cal e Metaculino de Alvarães a 10% -CMCA10



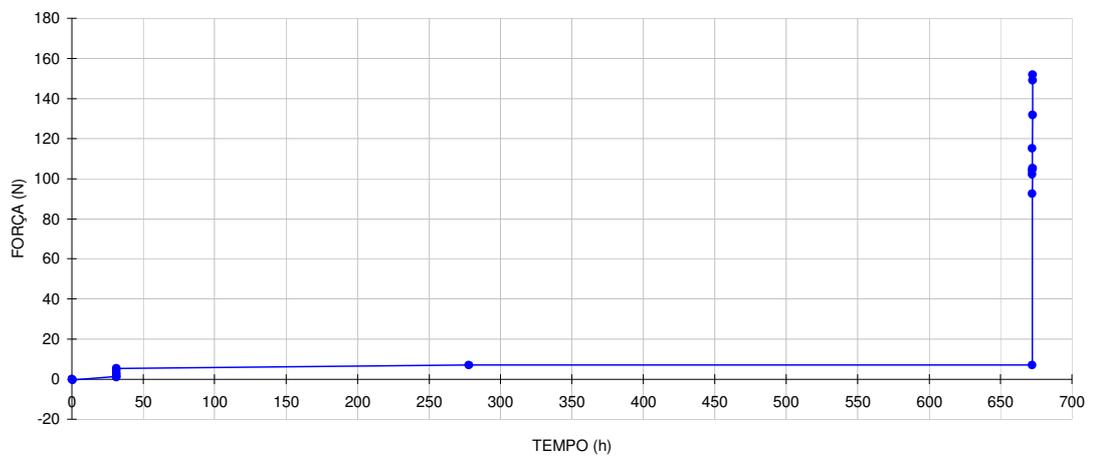
FORÇA-DESLOCAMENTO - Cal e Metaculino de Alvarães a 10% - CMCA10



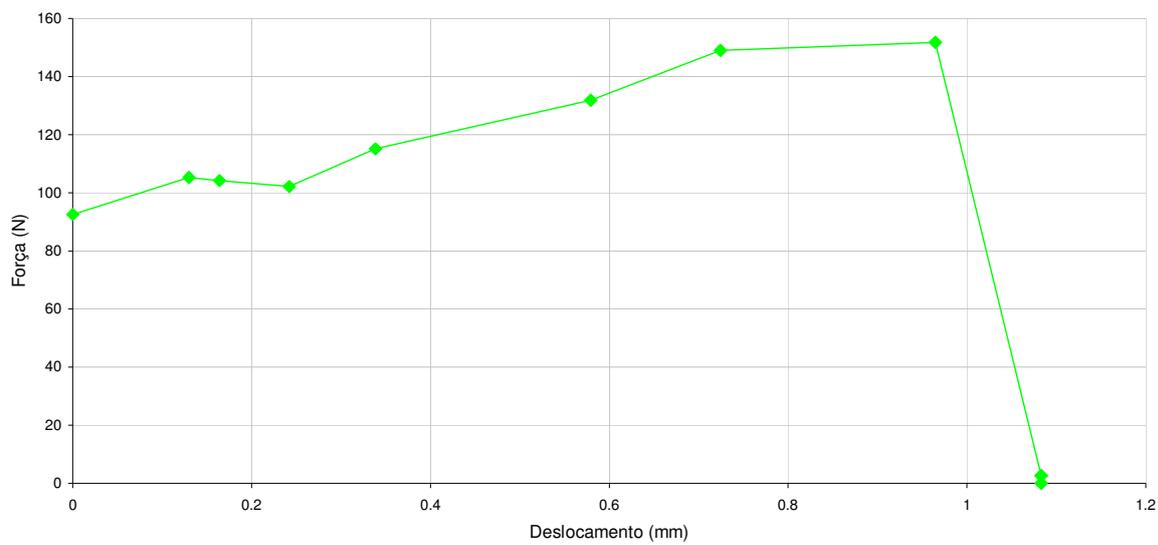
FORÇA - Cal e Metacaulino de Alvarões a 20% - CMCA20



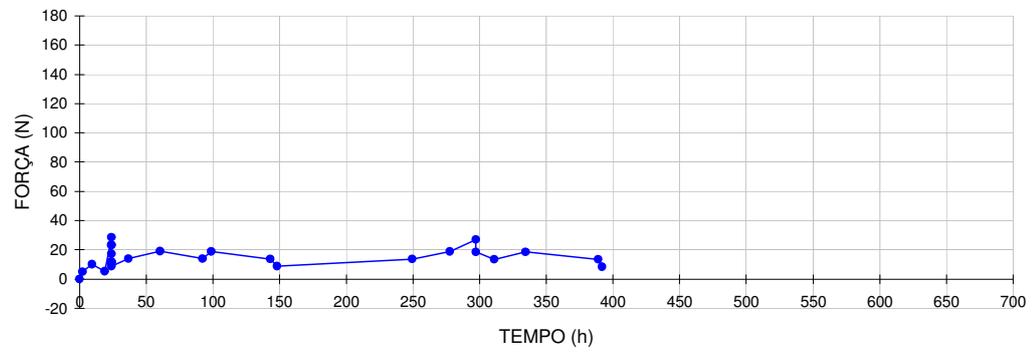
FORÇA - Cal e Metacaulino de Alvarões a 20% - CMCA20



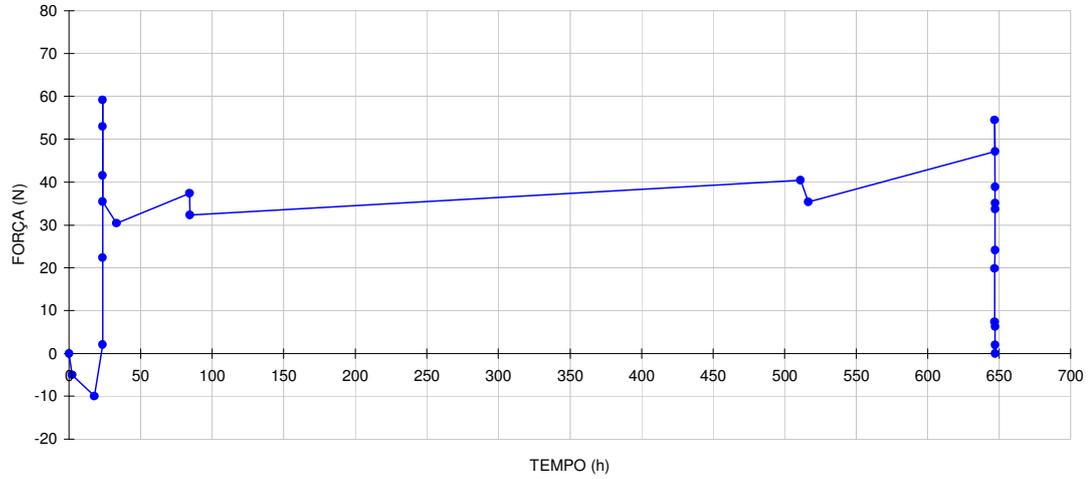
FORÇA-DESLOCAMENTO - Cal e Metacaulino de Alvarões a 20% - CMCA20



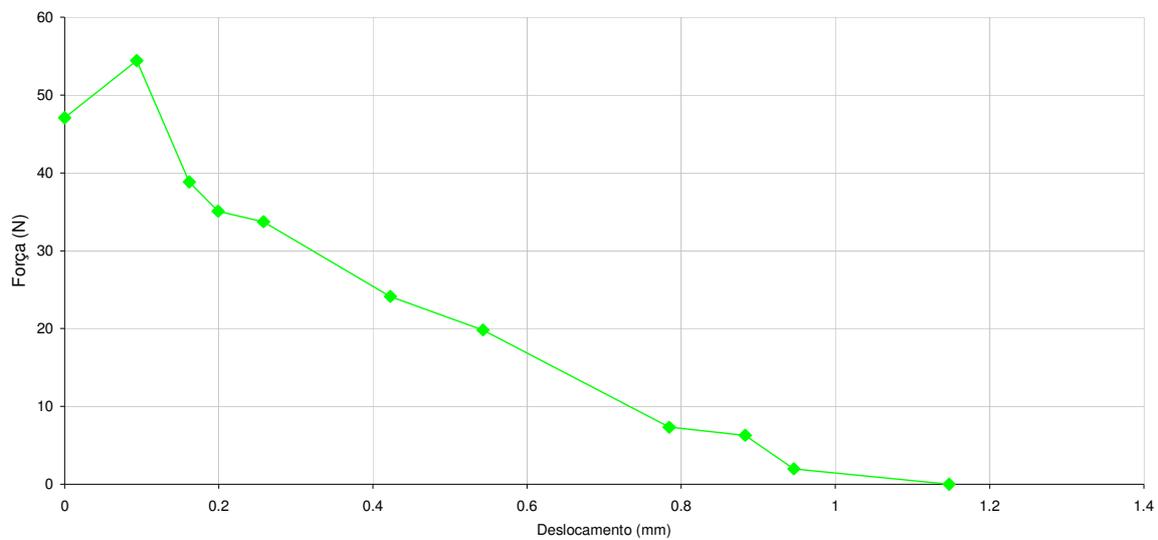
FORÇA - Cal e Metacaulino Industrial a 10% - CMCI10



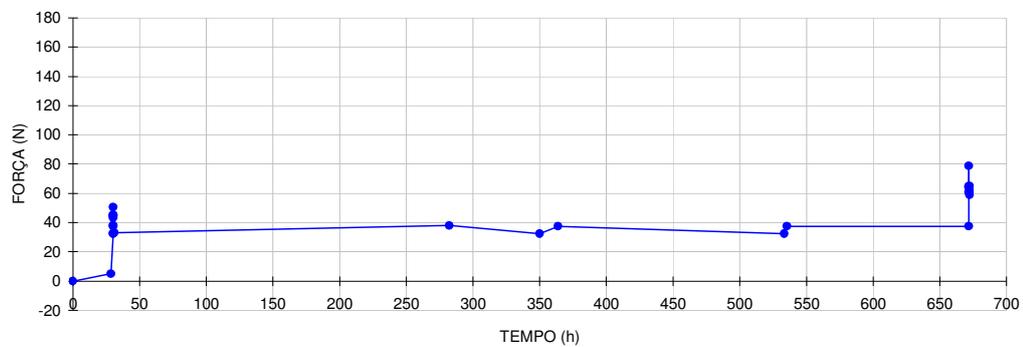
FORÇA - Cal e Metacaulino Industrial 10% - CMCI10



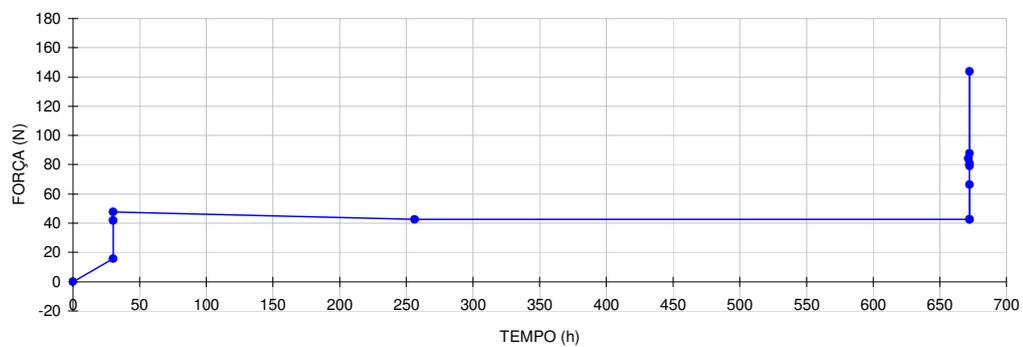
FORÇA-DESLOCAMENTO - Cal e Metacaulino Industrial a 10% - CMCI10



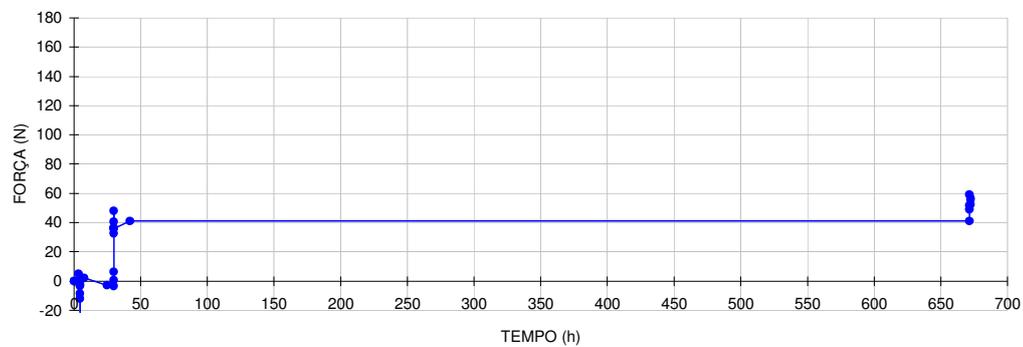
FORÇA - Cal e Metacaulino Industrial a 20% - CMCI20



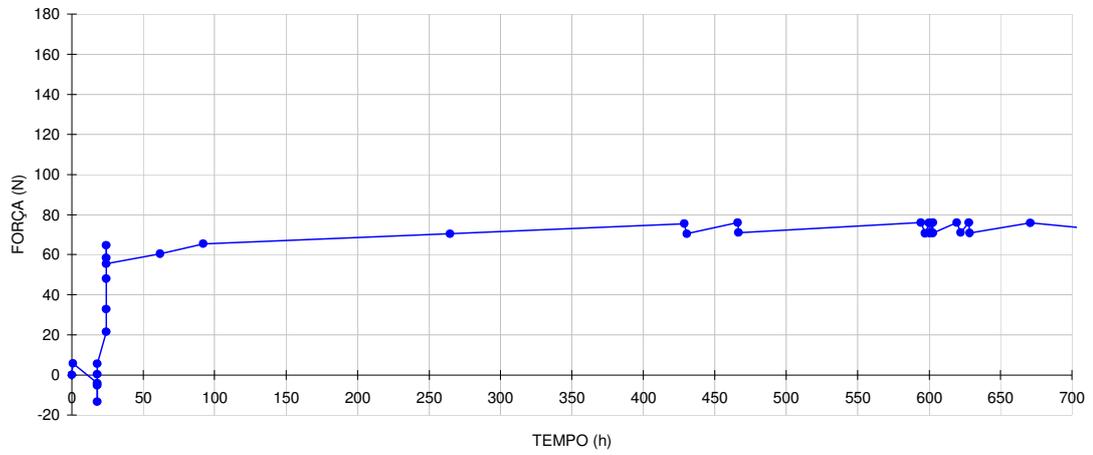
FORÇA - Cal e Metacaulino Industrial a 20% - CMCI20



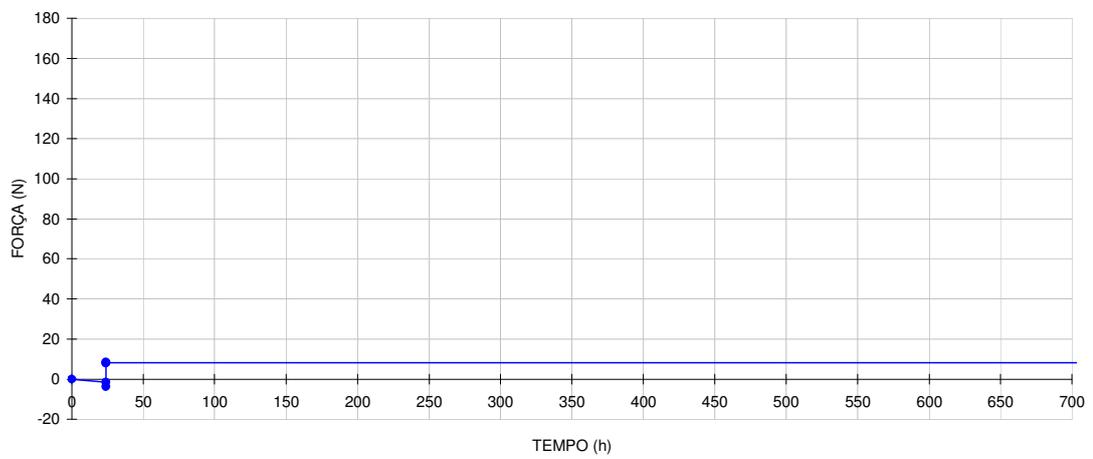
FORÇA - Cal e Metacaulino Industrial a 20% - CMCI20



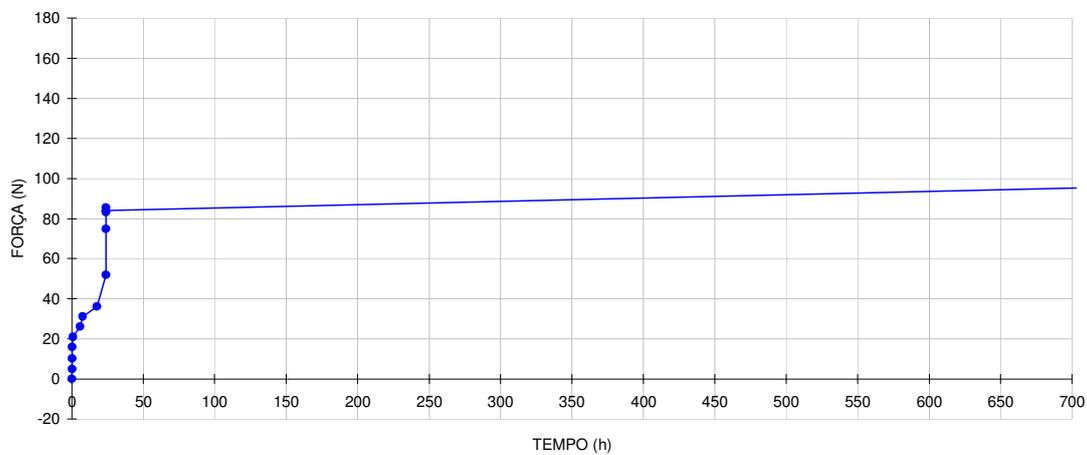
FORÇA - Cal e Pó de Tijolo - CPT



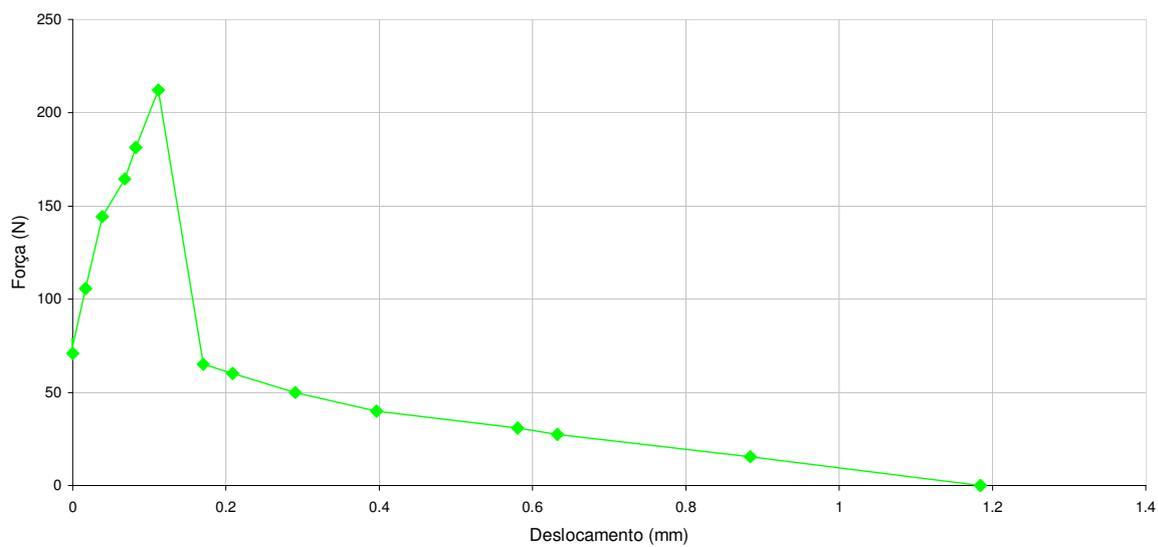
FORÇA - Cal e Pó de Tijolo - CPT



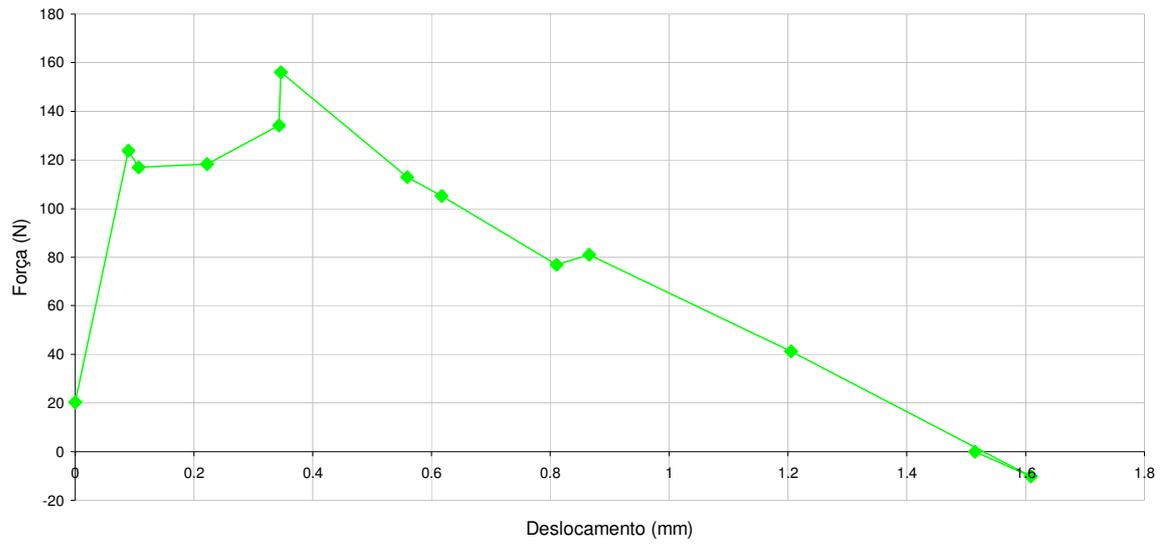
FORÇA - Cal e Pó de Tijolo - CPT



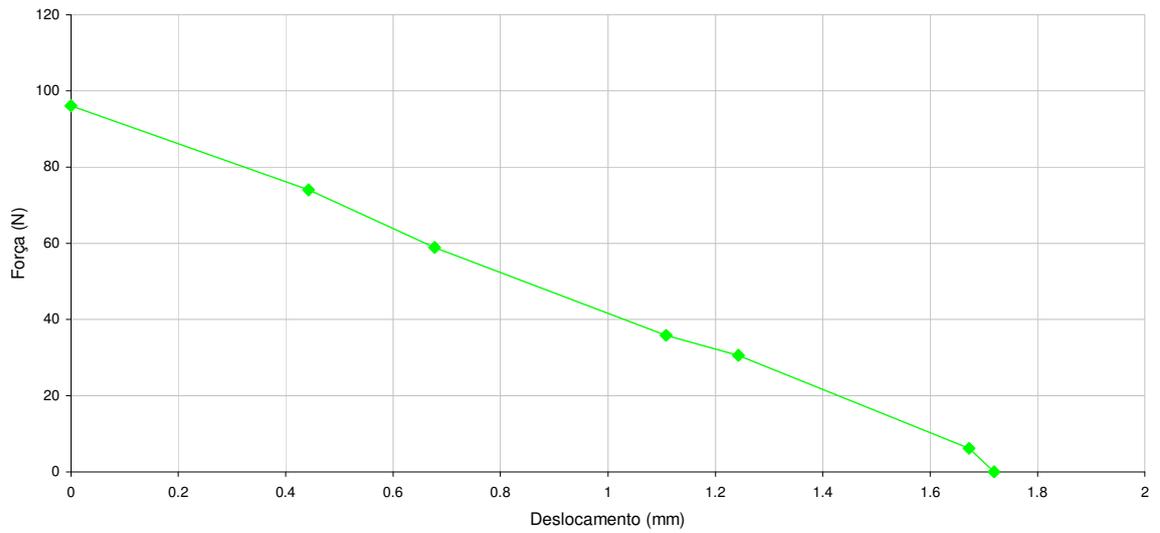
FORÇA-DESLOCAMENTO - Cal e Pó de Tijolo - CPT



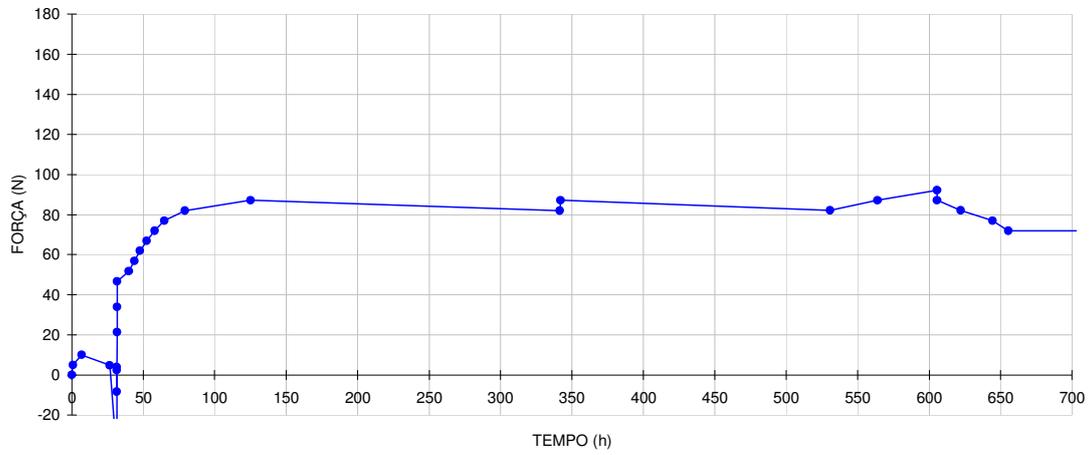
FORÇA-DESLOCAMENTO - Cal e Pó de Tijolo - CPT



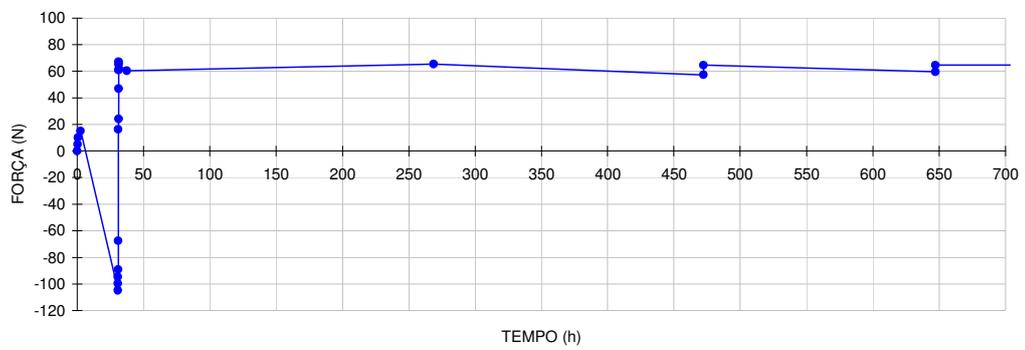
FORÇA-DESLOCAMENTO - Cal e Pó de Tijolo - CPT



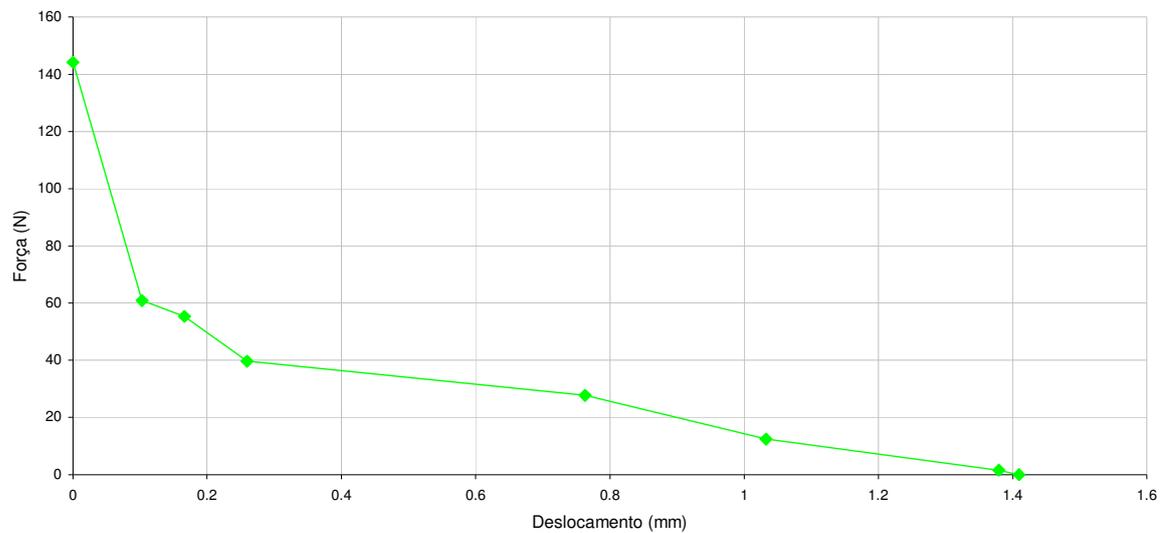
FORÇA - Cal e Fragmentos de Tijolo - CPTCON



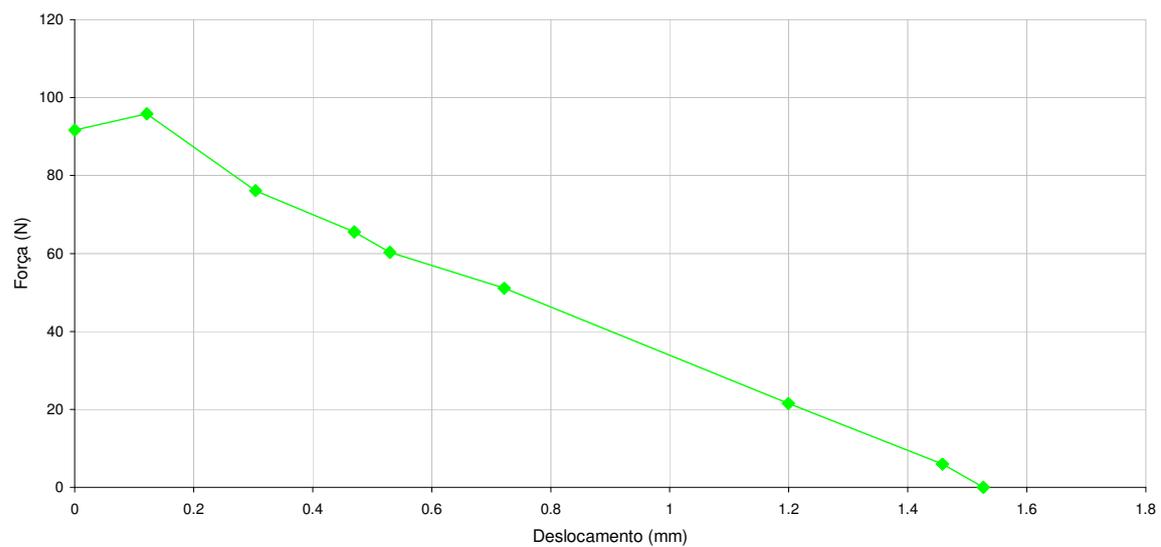
FORÇA - Cal e Fragmentos de Tijolo - CPTCON



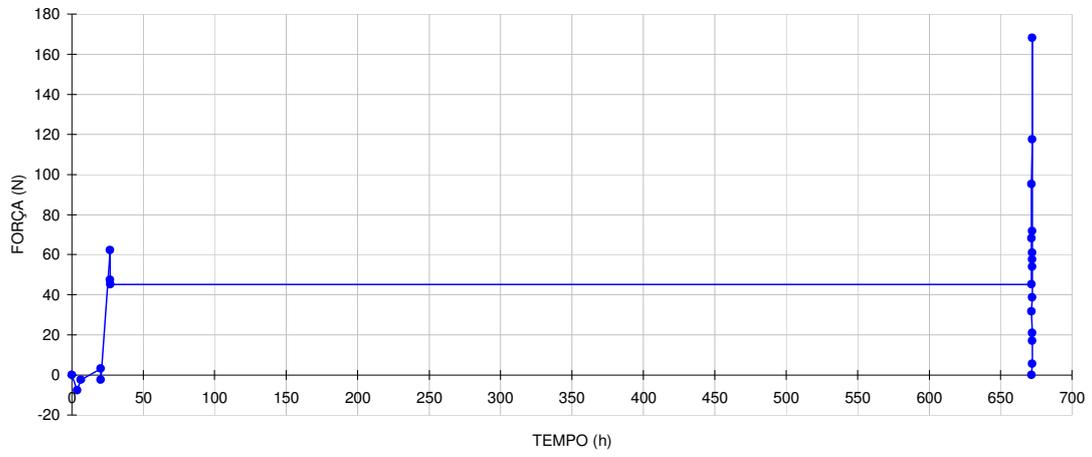
FORÇA-DESLOCAMENTO - Cal e Fragmentos de Tijolo - CPTCON



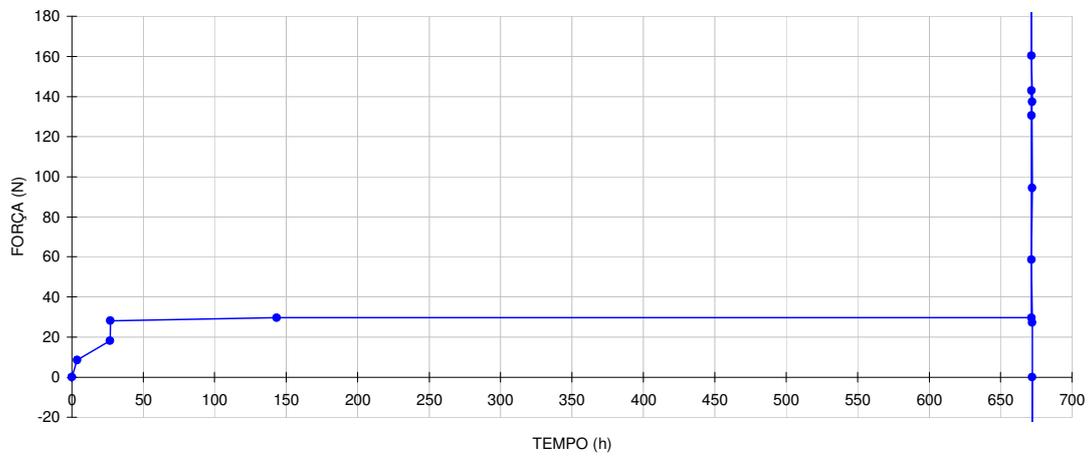
FORÇA-DESLOCAMENTO - Cal e Fragmentos de Tijolo - CPTCON



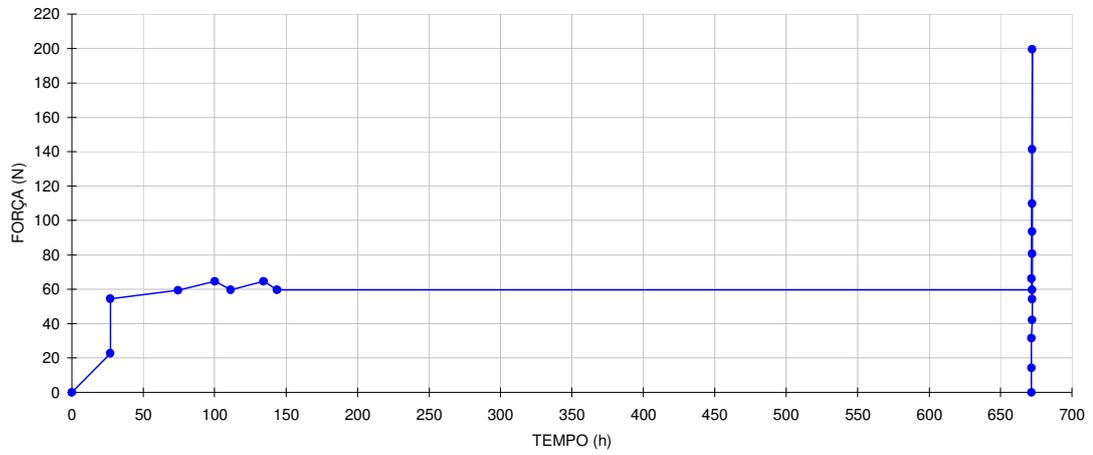
FORÇA - Cal em pasta e Fragmentos de Tijolo - CpPTCON



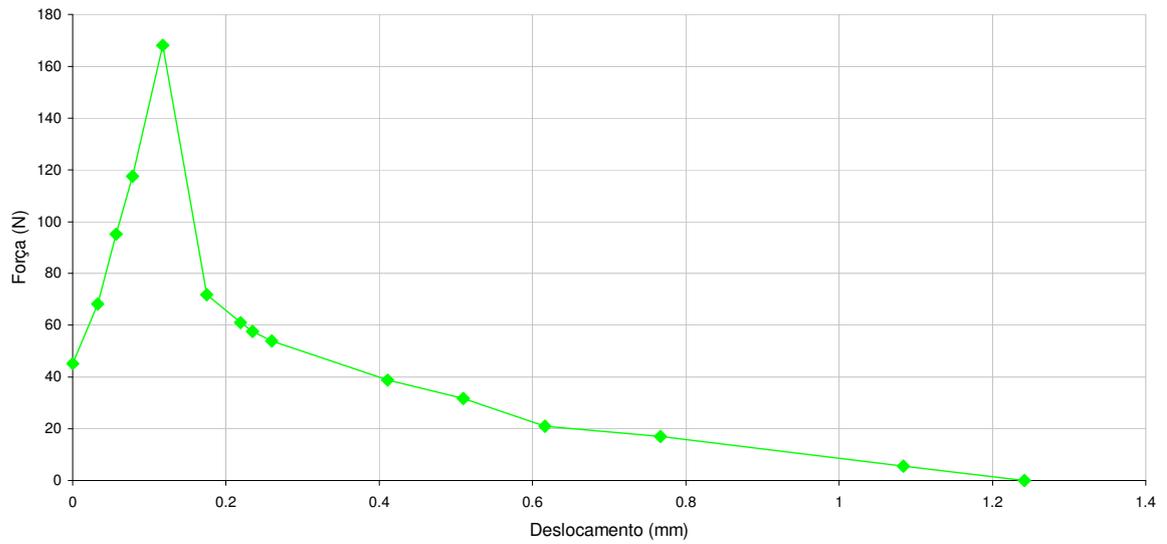
FORÇA - Cal em pasta e Fragmentos de Tijolo - CpPTCON



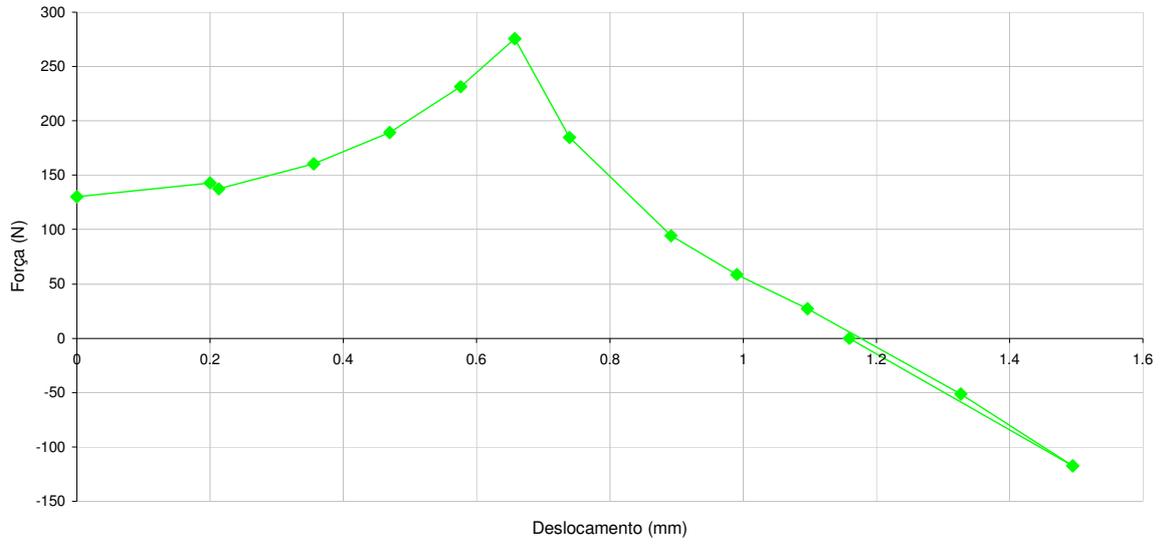
FORÇA - Cal em pasta e Fragmentos de Tijolo - CpPTCON



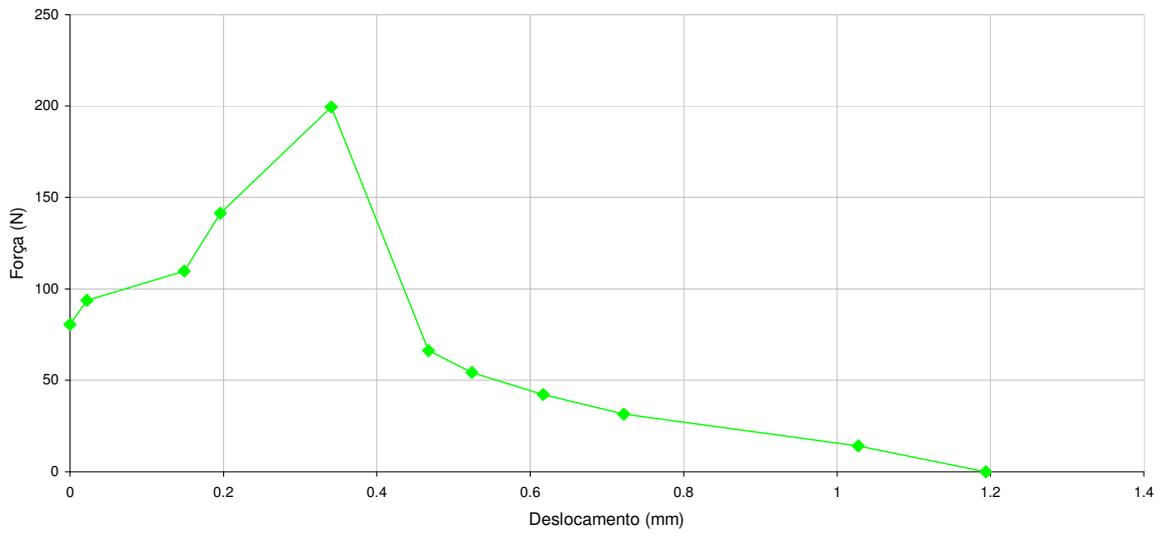
FORÇA-DESLOCAMENTO - Cal em pasta e Fragmentos de Tijolo - CpPTCON



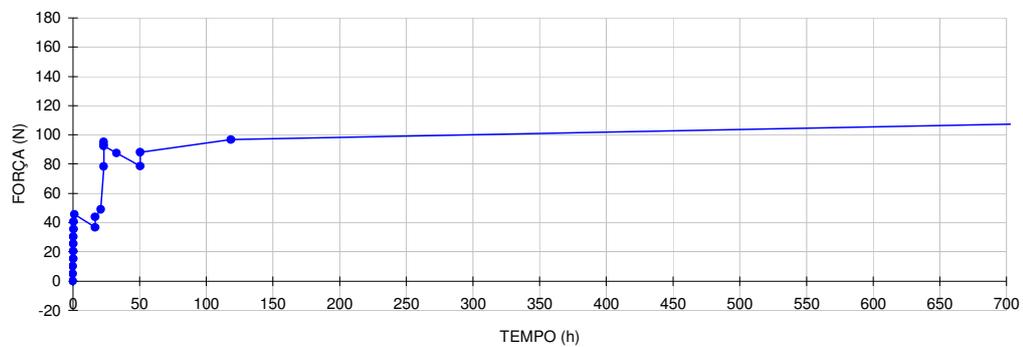
FORÇA-DESLOCAMENTO - Cal em pasta e Fragmentos de Tijolo - CpPTCON



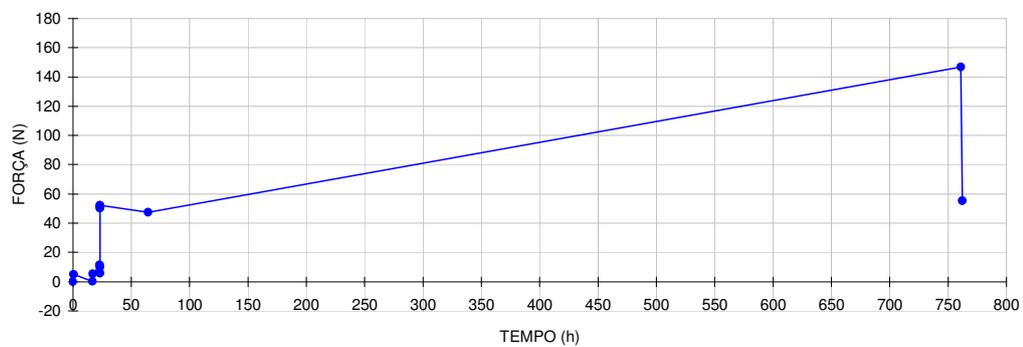
FORÇA-DESLOCAMENTO - Cal em pasta e Fragmentos de Tijolo - CpPTCON



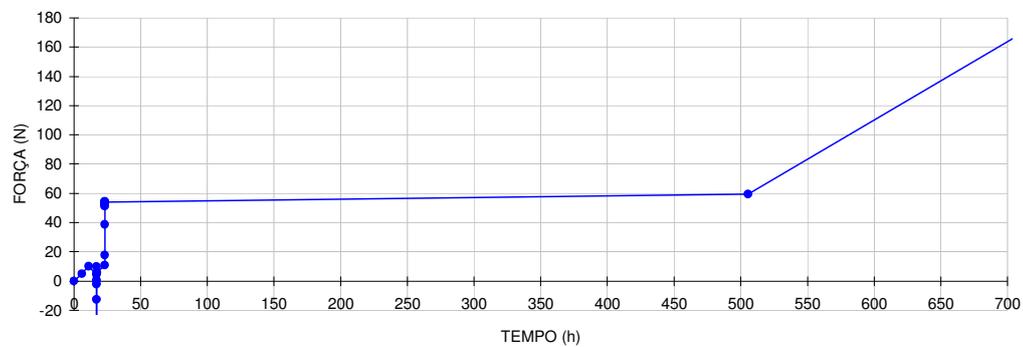
FORÇA - Cal e Cinzas Volantes - CCV



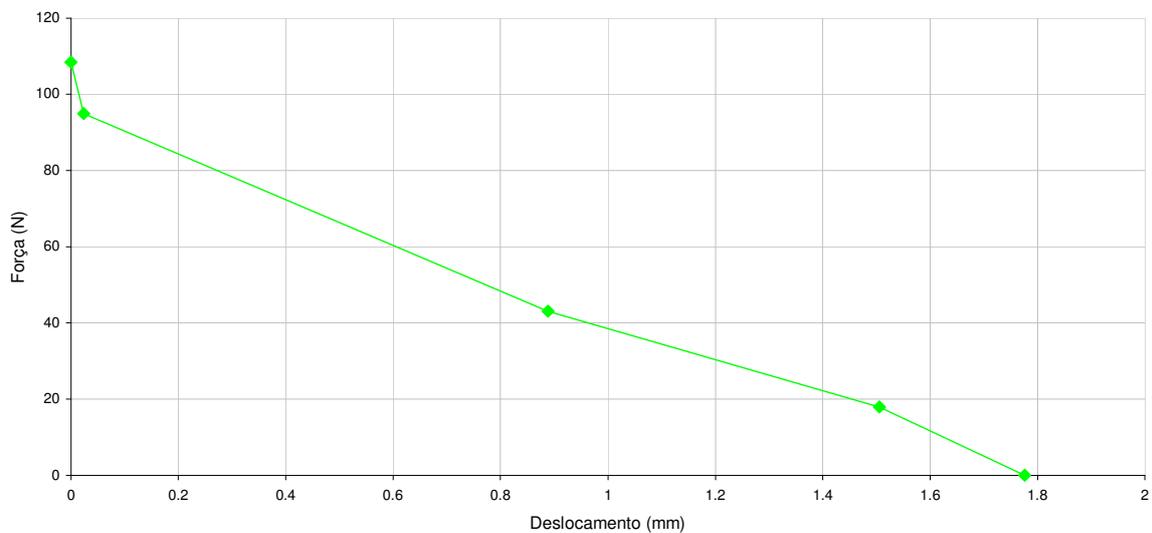
FORÇA - Cal e Cinzas Volantes - CCV



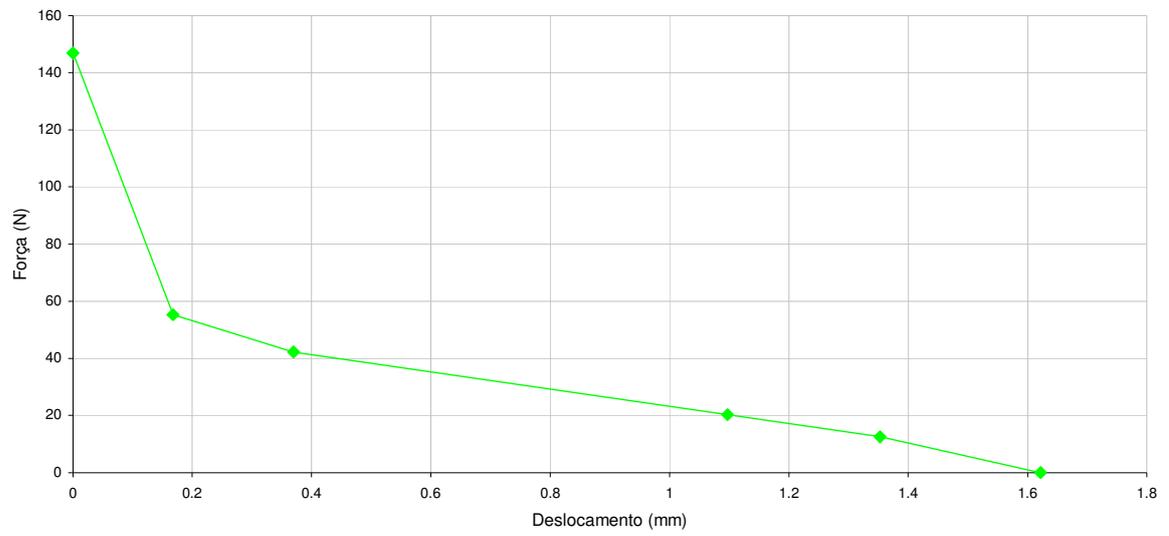
FORÇA - Cal e Cinzas Volantes - CCV



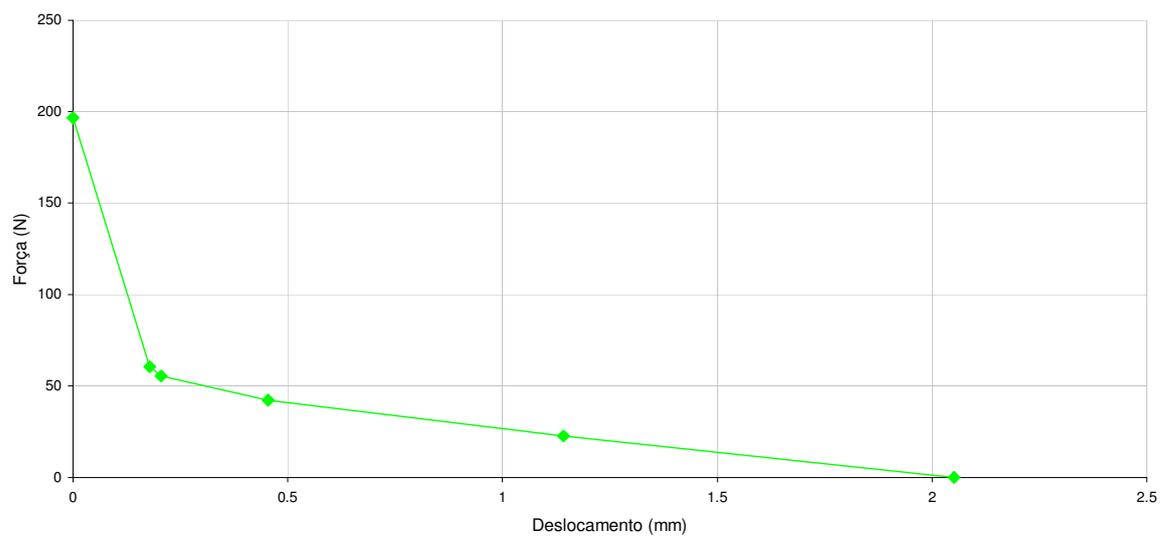
FORÇA-DESLOCAMENTO - Cal e Cinzas Volantes - CCV



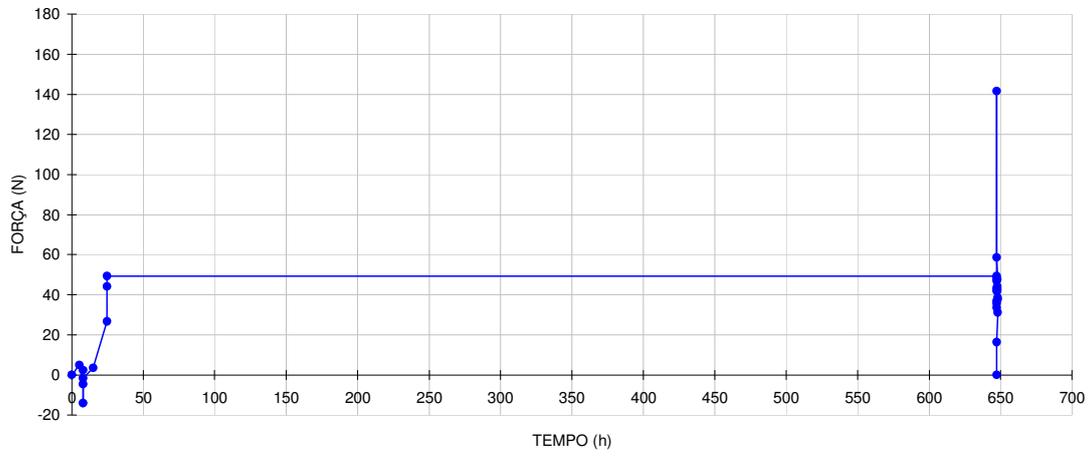
FORÇA-DESLOCAMENTO - Cal e Cinzas Volantes - CCV



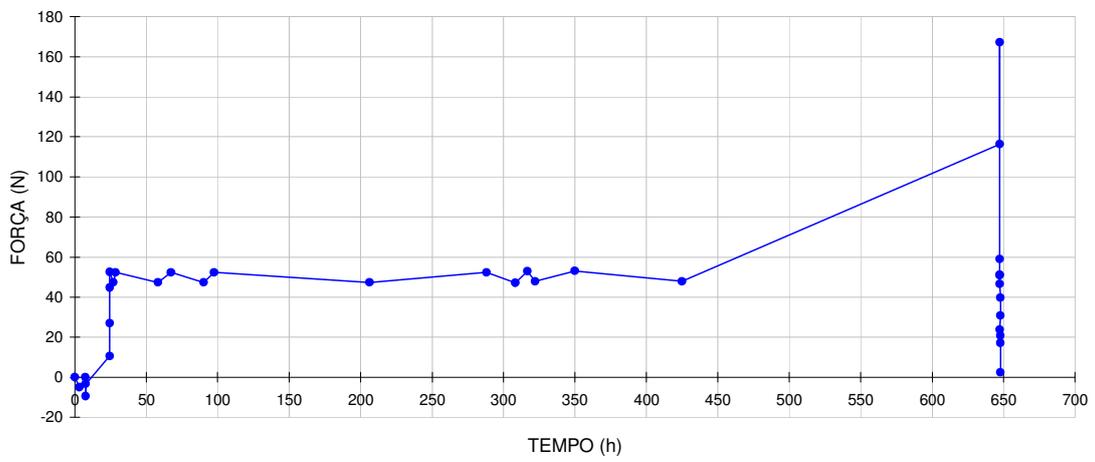
FORÇA-DESLOCAMENTO - Cal e Cinzas Volantes - CCV



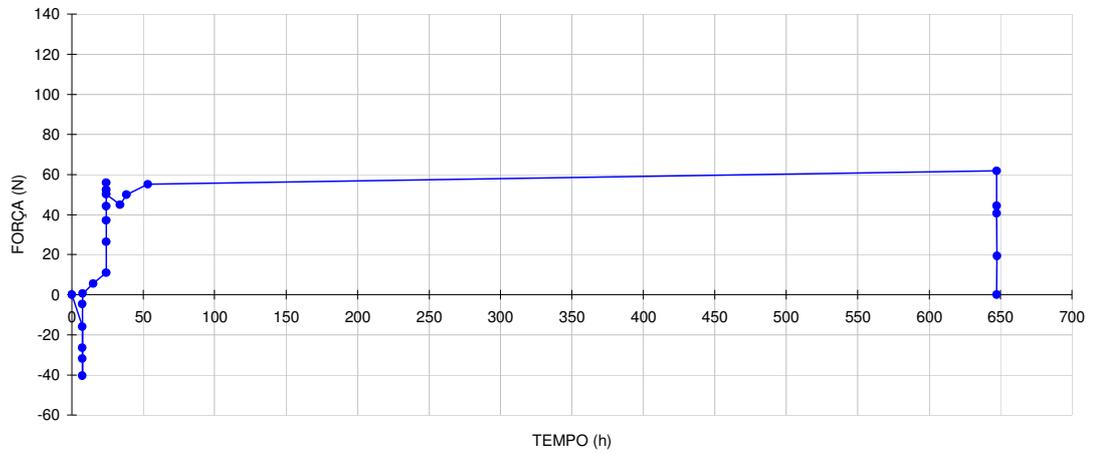
FORÇA - Cal e Resíduo de Argila Expandida - CRAE



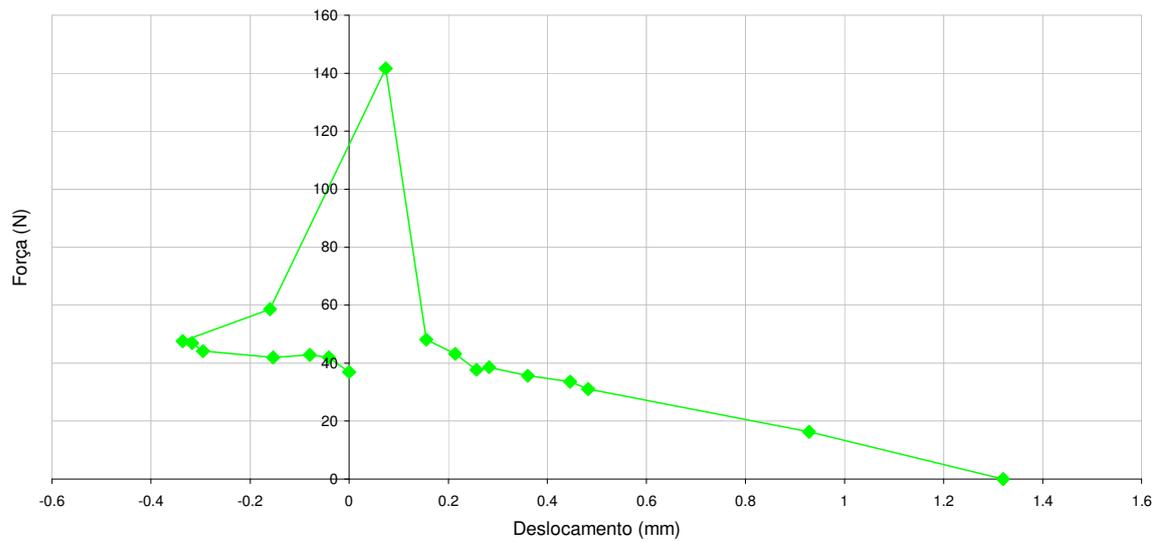
FORÇA - Cal e Resíduo de Argila Expandida - CRAE



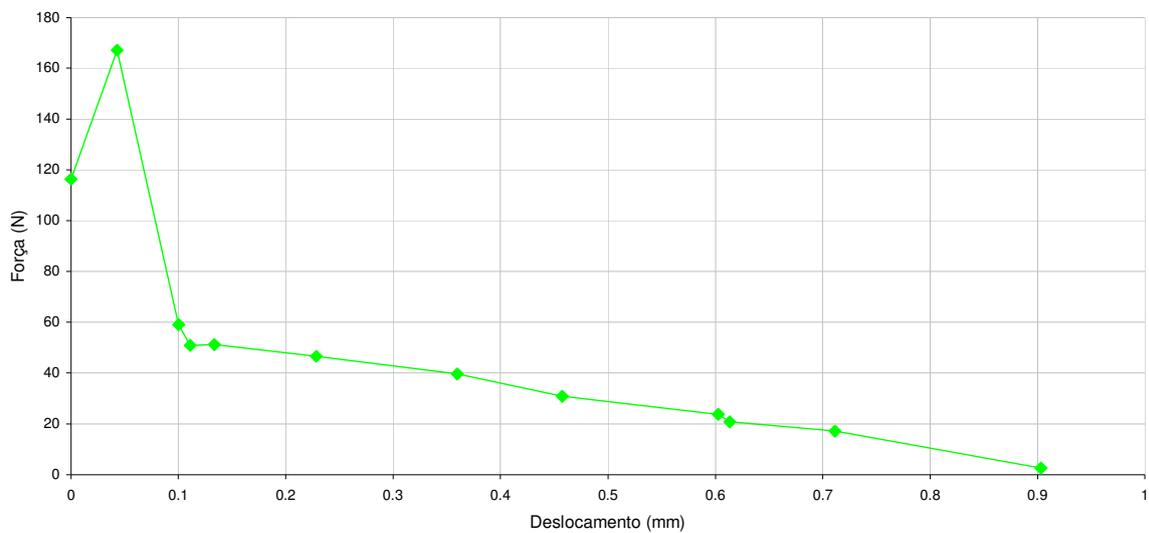
FORÇA - Cal e Resíduo de Argila Expandida - CRAE



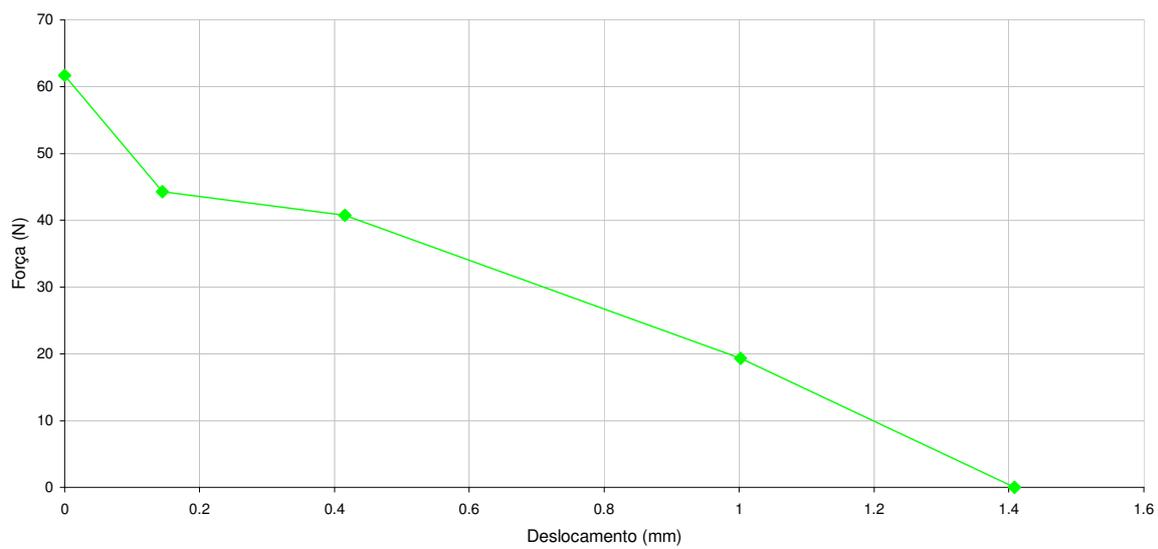
FORÇA-DESLOCAMENTO - Cal e Resíduo de Argila Expandida - CRAE



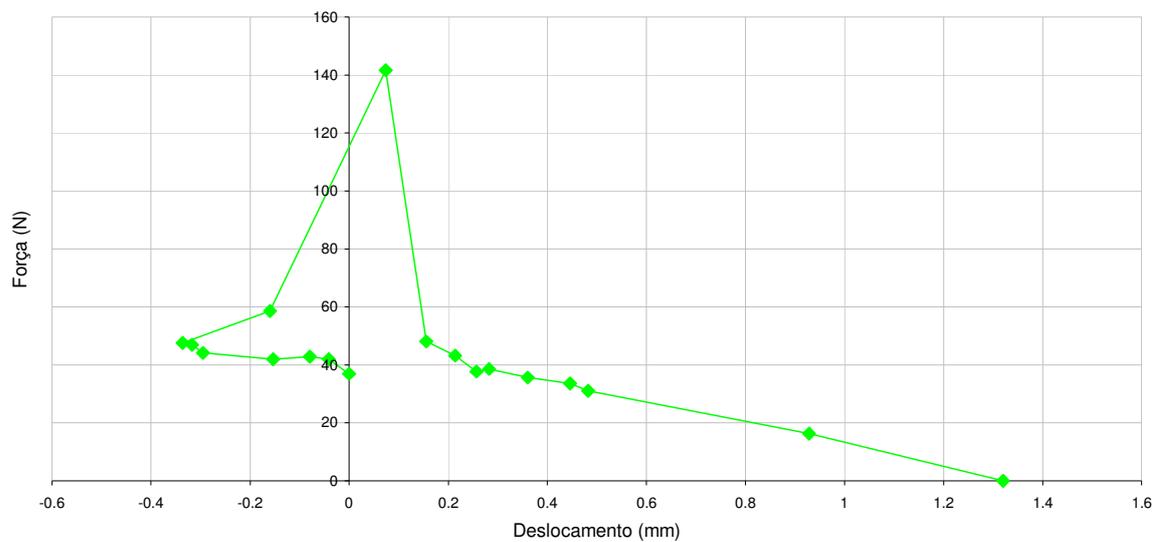
FORÇA-DESLOCAMENTO - Cal e Resíduo de Argila Expandida - CRAE



FORÇA-DESLOCAMENTO - Cal e Resíduo de Argila Expandida - CRAE

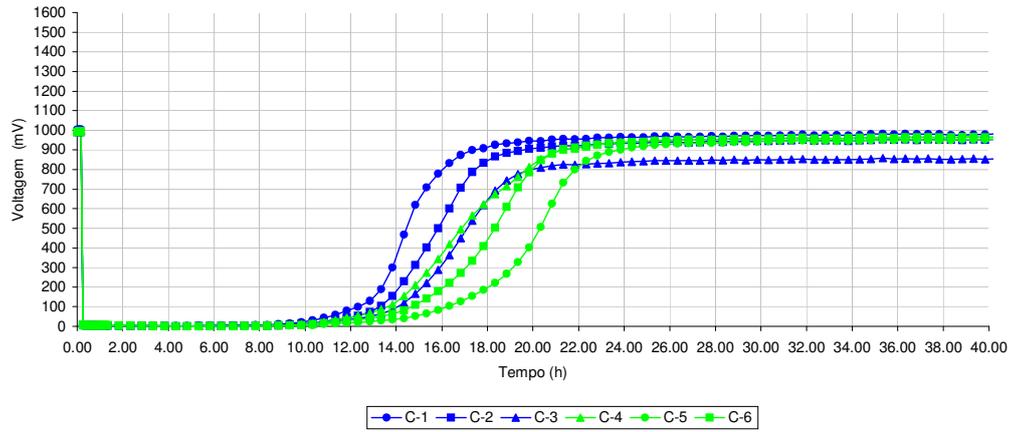


FORÇA-DESLOCAMENTO - Cal e Resíduo de Argila Expandida - CRAE

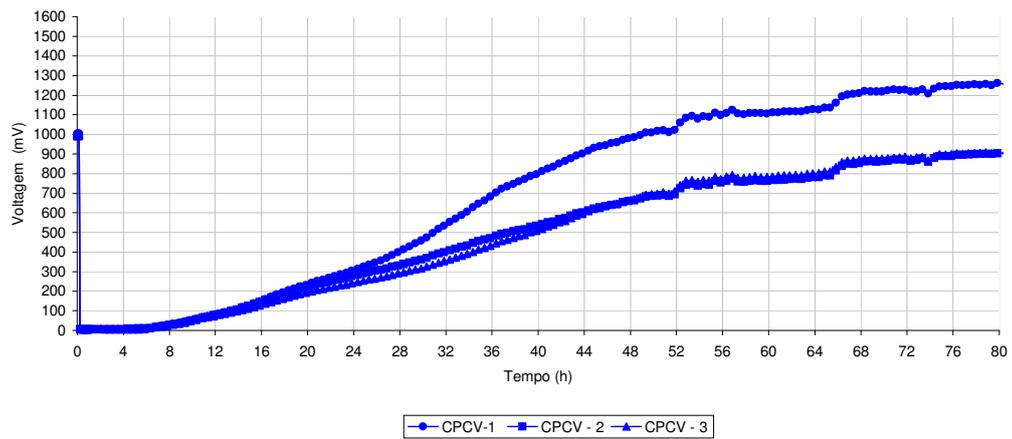


Ensaio de capacidade de impermeabilização

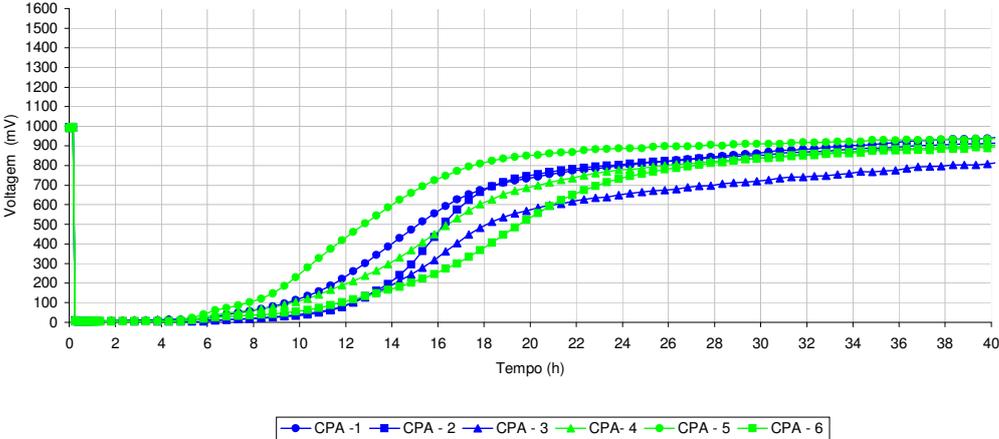
Cal - C



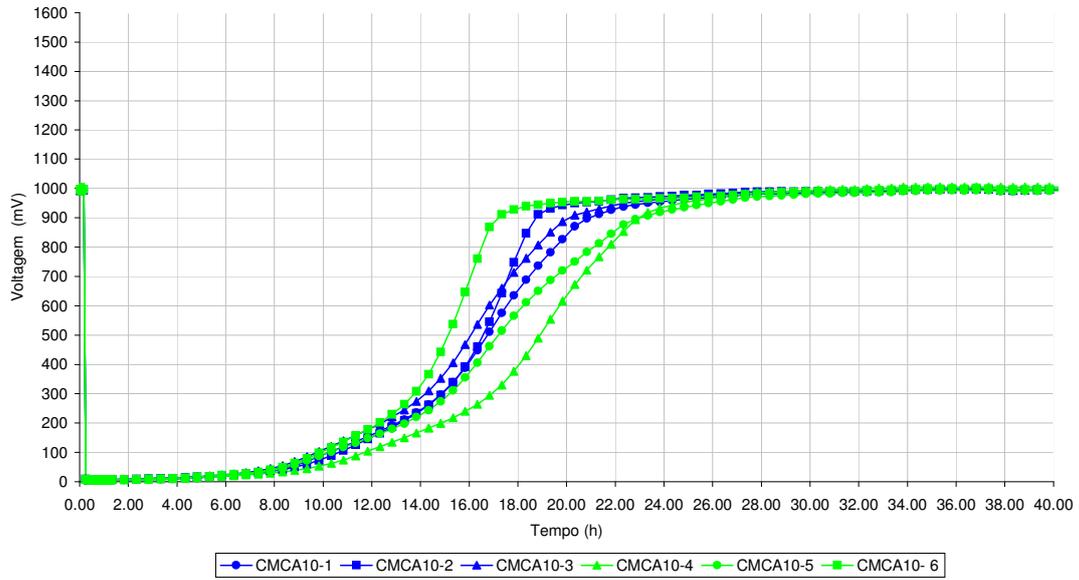
Cal e Pozolana de Cabo Verde - CPCV



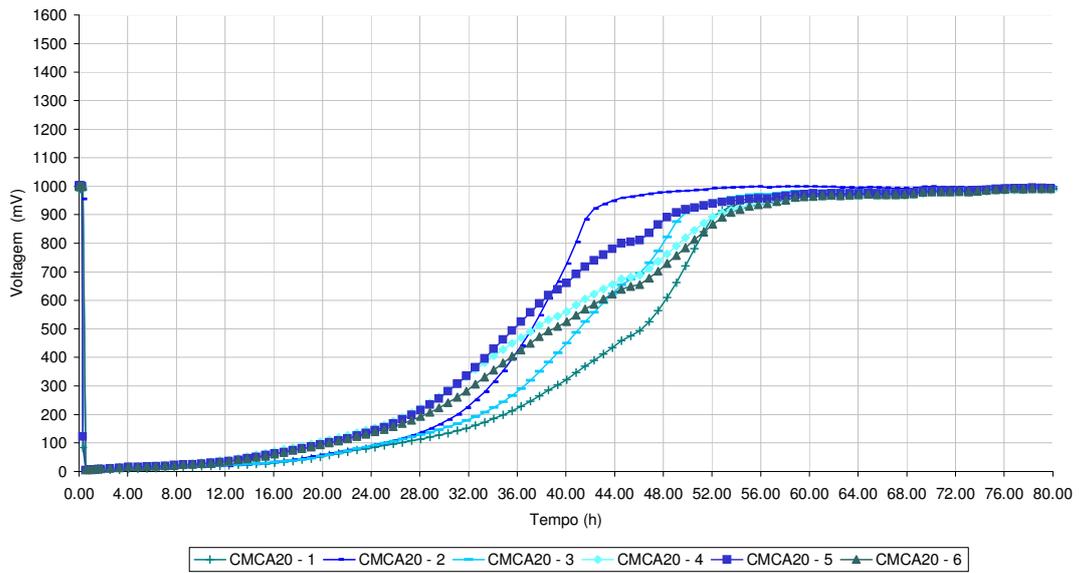
Cal e Pozolana dos Açores - CPA



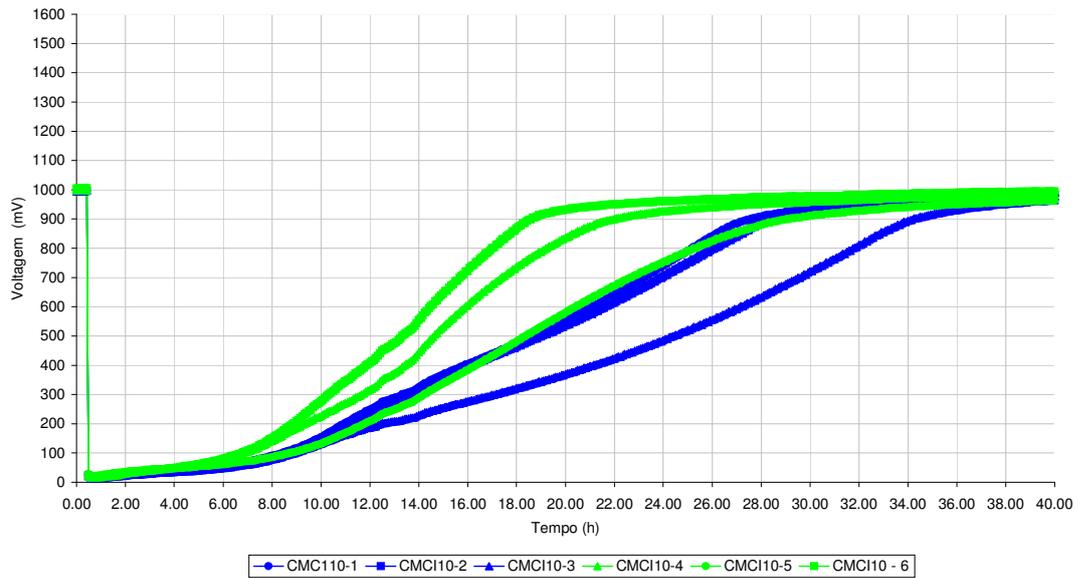
Cal e Metacaulino de Alvarães a 10%- CMCA10



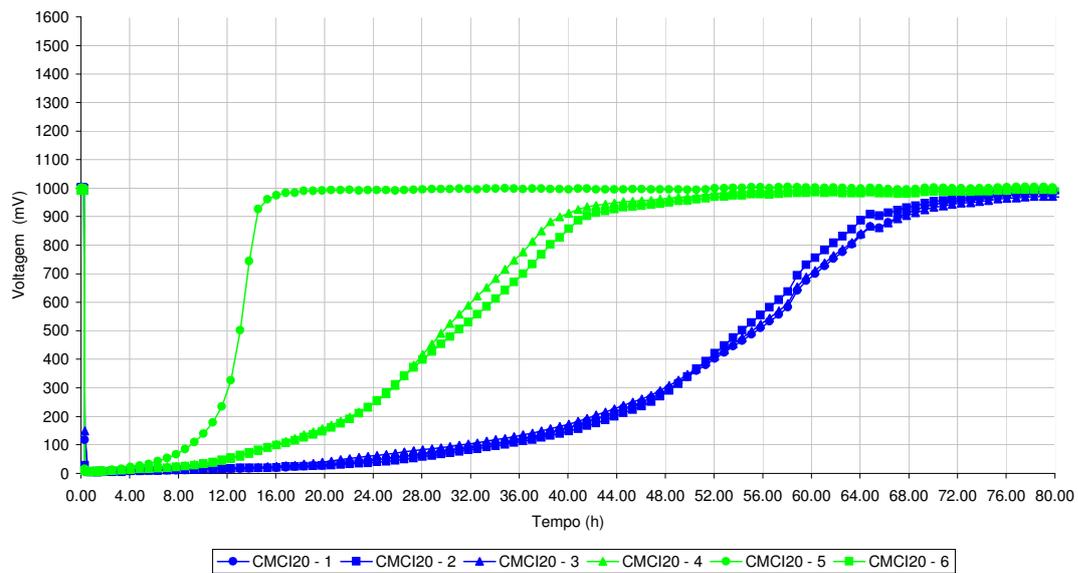
Cal e Metacaulino de Alvarães a 20% - CMCA20



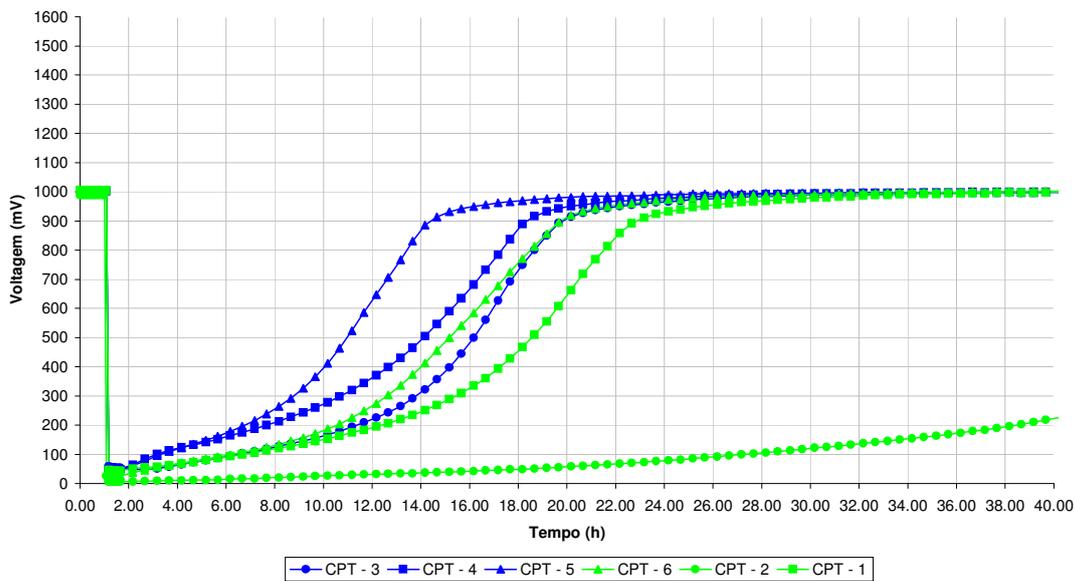
Cal e Metacaulino Industrial a 10% - CMCI10



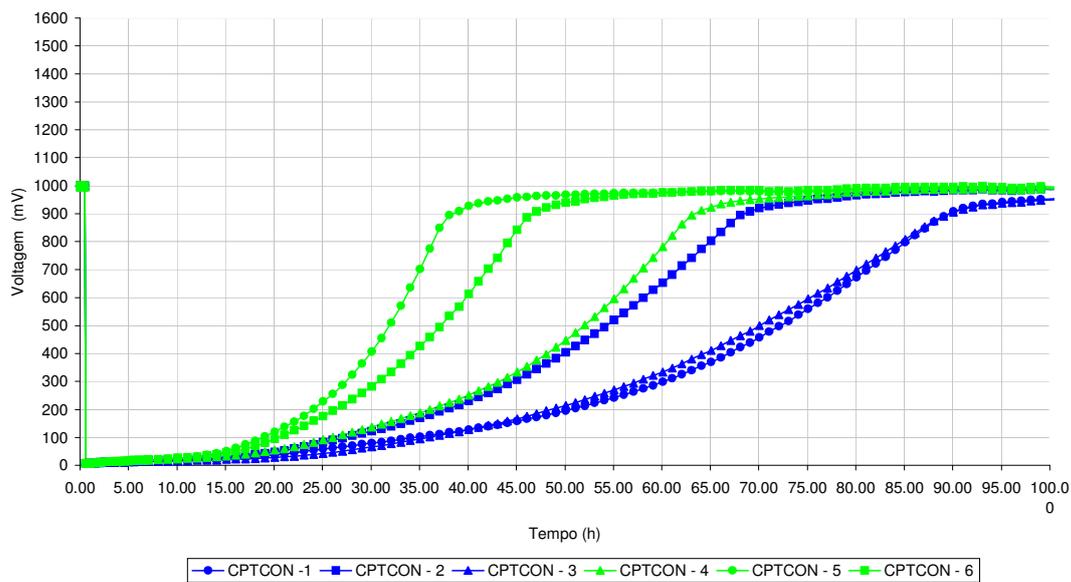
Cal e Metacaulino Industrial a 20% - CMCI20



Cal e Pó de Tijolo - CPT



Cal e Fragmentos de Tijolo - CPTCON



Cal e Resíduo de Argila Expandida - CRAE

