



Mafalda Cotrim Coradinho

Licenciada em Ciências da Engenharia Civil

Castelo de Paderne – caracterização histórica e material

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Civil

Orientador: Professora Doutora Paulina Faria, Professora
Associada, Faculdade de Ciências e Tecnologia,
Universidade Nova de Lisboa

Co-orientador: Doutor António Santos Silva, Investigador
Auxiliar, Laboratório Nacional de Engenharia Civil

Presidente: Doutor Carlos Chastre Rodrigues, Professor Auxiliar da
Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa

Arguente: Doutora Maria Idália Gomes, Professora Auxiliar do Instituto
Superior de Engenharia de Lisboa

Vogal: Doutora Paulina Faria, Professora Associada da Faculdade de
Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa

Copyright © Mafalda Cotrim Coradinho, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

A ti mãe...

Agradecimentos

Em primeiro lugar gostaria de expressar a minha sincera gratidão aos meus orientadores, Professora Doutora Paulina Faria e Doutor António Santos Silva pela transmissão de conhecimento, pela disponibilidade, apoio, ajuda e por fazerem com que eu desse o meu melhor.

Em segundo lugar, gostaria de agradecer a todo o Departamento dos Matérias – Núcleo de Materiais Metálicos, do Laboratório Nacional de Engenharia Civil, por todo o acompanhamento na realização da campanha experimental de caracterização química e mineralógica, e em especial ao geólogo Luís Almeida por toda a ajuda no decorrer da análise petrográfica que sem os seus conhecimentos não seria possível.

Ao Engenheiro Vítor Silva pelo acompanhamento durante a campanha experimental de caracterização física e mecânica, durante a campanha experimental *in situ* e por todos conselhos dados ao longo do processo de redação.

Ao arquiteto José Lima, pelo acompanhamento e ajuda na campanha experimental *in situ*.

À Doutora Natércia Magalhães, da DRCAI, pela partilha de informação relativa às intervenções de 2004/2005, 2007 e 2017/2018 e pelo acompanhamento à obra para realização de ensaios *in situ*.

À In Situ pela partilha de informação referente à intervenção realizada em 2018, e pelo acompanhamento à obra para a realização de ensaios *in situ*.

A Ápio Pifano, da STAP, pela partilha de conhecimento relativa à intervenção de 2004/2005.

À Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) pelo seu apoio através do projeto PTDC/EPH-PAT/4684/2014: DB-HERITAGE - Base de dados de materiais de construção com interesse histórico e patrimonial, no qual se insere a presente dissertação.

Quero agradecer a todos os meus amigos, pelo apoio que sempre me deram ao longo da minha vida, por toda a paciência e ajuda para que eu nunca desistisse.

Ao meu namorado, Vitor Lourenço, por todo o amor, paciência, amizade e companheirismo nas alturas mais difíceis, e em especial por aturar o meu mau feitio.

A toda a minha família, em particular à minha mãe, Carla Cotrim, por tudo o que sempre fez por mim, por estar sempre ao meu lado e pelo exemplo de mulher que é...sem ela não teria sido possível. À minha irmã, Catarina Cotrim, pela amizade, ajuda e por todas as revisões que fez ao longo da presente dissertação. Ao meu padrao e amigo António Lourenço, pela ajuda, preocupação e carinho.

Resumo

A crescente preocupação com a conservação do património construído em Portugal, ou mesmo a necessidade dum maior conhecimento dessas construções, faz com que a caracterização material e a documentação das intervenções sejam etapas imprescindíveis para apoio às ações de intervenção/conservação.

De entre o património histórico construído em Portugal encontram-se as fortalezas militares islâmicas, construções de defesa que foram essencialmente construídas à base de terra.

A presente dissertação pretende caracterizar os processos construtivos, os materiais utilizados e as intervenções efetuadas no Castelo de Paderne, fortaleza islâmica de taipa militar (terra húmida estabilizada com cal e compactada entre taipais sucessivos), e para a qual não existe muita documentação sobre estas matérias.

Procedeu-se ao levantamento e análise das intervenções corridas no Castelo de Paderne a que se teve acesso, tendo-se conseguido obter informações das intervenções efetuadas desde 1986. Simultaneamente realizaram-se ensaios laboratoriais de caracterização química, mineralógica, física e mecânica de amostras recolhidas na muralha, ermida e torre Albarrã desta fortificação. No que diz respeito à caracterização química e mineralógica foram efetuados ensaios de difração de raios X, análise térmica, determinação de resíduo insolúvel, análise petrográfica e análise microestrutural por microscopia eletrónica de varrimento com microanálise de raios X. A caracterização física e mecânica incluiu ensaios de análise granulométrica, determinação da massa volúmica, dureza superficial, resistência à compressão, módulo de elasticidade dinâmico, comportamento face à água e à abrasão. Foram igualmente realizados ensaios *in situ* em zonas das muralhas exteriores e na torre do Castelo para que a sua caracterização fosse tão completa quanto possível. Os valores obtidos para os diversos ensaios foram analisados e comparados com resultados da literatura e com as observações realizadas *in situ*.

Este trabalho apresenta contributos para o registo documental e físico dos materiais e técnicas que foram utilizadas na construção do Castelo de Paderne e nas intervenções que foram efetuadas desde 1986, possibilitando que os projetos e as obras de conservação futuras possam ser melhor fundamentadas. Considera-se que, desta forma, a história e autenticidade dos materiais e tecnologias construtivas neste e noutros monumentos semelhantes poderão ser melhor preservados.

Palavras-chave: cal, conservação, fortaleza islâmica, intervenção, período Almóada, taipa militar, terra

Abstract

The growing concern in Portugal with the conservation of the built heritage and the need of detailed description of those constructions to assure that possible interventions are done right turns the material characterization and documentation of any intervention mandatory.

In the historical built heritage in Portugal take part Islamic fortresses that are mainly built with earth.

The following thesis intends to characterize the building processes, the materials used and the interventions made in the Castle of Paderne, an Islamic fortress of lime stabilized rammed earth (earth additivated with air lime and compacted in layers inside formworks). There is not much documentation available on these matters.

An assessment and analysis of the interventions in the Castle of Paderne was made based on the available documents. It was possible to observe the results of those interventions since 1986. Several characterization tests were made with samples collected in the fortress wall, small chapel that was built inside and Albarrã tower. In terms of chemical and mineralogical characterization X rays diffraction, thermal analysis, insoluble residue determination, petrographic studies and X rays microanalysis tests were performed. The physical and mechanic characterization was made recurring to granulometric analysis, determination of density, surface hardness, compression strength, dynamic elasticity module, reaction to water and abrasion. There were also tests made *in situ* on the exterior walls of the castle and in the tower in order to guarantee a characterization as complete as possible. The results obtained for the several testes were analyzed and compared with literature results and *in situ* observations.

Therefore, with the documental record and the physical record of the materials and technics used in construction of the Castle of Paderne, and the interventions that have been carried since 1986, this thesis intends to provide key information to help future projects and interventions to plan them correctly. It is considered that this may contribute to a more efficient preservation of history and authenticity of the materials and construction technics used in the Castel of Paderne and other similar monuments.

Key words: Almohad period, conservation, earth, intervention, islamic Fortress, lime stabilized rammed earth, lime.

Abreviaturas

Institucionais:

ASTM - American Society for Testing and Materials

CEN - Comité Européen de Normalisation

DEC - Departamento de Engenharia Civil

DGEMN - Direção Geral dos Edifícios e Monumentos Nacionais

DIN - Deutsches Institut für Normung

DRCAIlg – Direção Regional de Cultura do Algarve

FCT NOVA - Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade NOVA de Lisboa

IPPAR - Instituto Português do Património Arquitetónico

IPQ - Instituto Português de Qualidade

LNEC - Laboratório Nacional de Engenharia Civil

NZS - New Zealand Standards

SIPA - Sistema de Informação para o Património Arquitetónico

UNL - Universidade NOVA de Lisboa

ZEP - Zona Especial de Proteção

Amostras:

AM – Amostras recolhidas em 2000 pelo LNEC

AM1 - Argamassa 1 de revestimento da ermida recolhida em 2000

AM2 - Argamassa 2 de revestimento da ermida recolhida em 2000

AM4 - Argamassa 4 de assentamento de alvenaria, pertencente à ermida recolhida em 2000

AM6 - Argamassa 6 de assentamento de alvenaria, pertencente à ermida recolhida em 2000

AM10 - Bloco solto 10 de taipa da muralha noroeste recolhido em 2000

AM11 - Bloco solto 11 de taipa da muralha noroeste recolhido em 2000

CP2018 – Amostras de taipa recolhidas em Janeiro de 2018 no âmbito de visita realizada por membros do projeto DB-Heritage

CP2018A - Bloco de taipa do cunhal nordeste ao nível do primeiro taipal da base da torre recolhido no início de 2018

CP2018B - Bloco de taipa do corpo da torre na zona da faixa central recolhido no início de 2018

CP2018C - Bloco de taipa do cunhal nordeste ao nível central da torre recolhido no início de 2018

Ensaios:

ATD – Análise térmica diferencial

ATG – Análise termogravimétrica

c – Coeficiente de capilaridade

E_{din} – Módulo de elasticidade dinâmico

DRX – Difração de raios X

DTG – Análise termogravimétrica diferencial

EDS – Microanálise de raios X

HR – Humidade relativa

M – Massa de água absorvida por capilaridade

m – Massa de água seca

MV – Massa volúmica aparente

MEV – Microscópio eletrónico de varrimento

P_{ma} – Perda de massa por abrasão

R_c – Resistência à compressão

RI – Resíduo insolúvel

T - Temperatura

Ts1 – Taxa de secagem da fase 1

Ts2 – Taxa de secagem da fase 2

W_i – Absorção de água a baixa pressão

Índice de Texto

1. Introdução	1
1.1 ENQUADRAMENTO	1
1.2 OBJETIVOS E METODOLOGIA.....	1
1.3 ESTRUTURA E ORGANIZAÇÃO	2
2. Arquitetura de taipa militar	3
2.1 A TERRA COMO MATERIAL DE CONSTRUÇÃO	3
2.2 O DOMÍNIO MUÇULMANO NA PENÍNSULA IBÉRICA	3
2.3 FORTIFICAÇÕES DO PERÍODO DO DOMÍNIO MUÇULMANO	4
2.3.1 Castelo de Silves	4
2.3.2 Castelo de Alcácer do Sal	5
2.3.3 Fortaleza de Juromenha	6
2.3.4 Castelo de Moura.....	7
2.3.5 Castelo de Monteagudo.....	8
2.3.6 Castelo de Reina	9
2.3.7 Castelo de Niebla.....	10
2.4 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DE AMOSTRAS DE CONSTRUÇÕES EM TERRA.....	11
3. Castelo de Paderne.....	15
3.1 DESCRIÇÃO GERAL	15
3.2 CRONOLOGIA DAS INTERVENÇÕES	17
3.2.1 Intervenção no século XX não datada.....	18
3.2.2 Intervenção em 1986	18
3.2.3 Intervenção em 2004/05	18
3.2.4 Intervenção em 2007	20
3.2.5 Intervenção em 2017/18	21
4. Campanha Experimental	25
4.1 LOCALIZAÇÃO E DESCRIÇÃO DAS AMOSTRAS	25
4.2 PROCEDIMENTOS ADOTADOS NA CAMPANHA EXPERIMENTAL – ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA E MINERALÓGICA	27
4.2.1 Observação à lupa binocular	30
4.2.2 Observação ao microscópio petrográfico	32
4.2.3 Observação ao microscópio eletrónico de varrimento com microanálise de raios X.....	33
4.2.4 Análise mineralógica por difração de raios X	34
4.2.5 Análise termogravimétrica e térmica diferencial.....	35
4.2.6 Determinação do resíduo insolúvel	36
4.2.7 Análise granulométrica do agregado por ataque de ácido	37
4.1 PROCEDIMENTOS ADOTADOS NA CAMPANHA EXPERIMENTAL – ENSAIOS DE CARATERIZAÇÃO FÍSICA E MECÂNICA.....	39

4.3.1	Massa volúmica aparente	39
4.3.2	Dureza superficial	39
4.3.3	Módulo de elasticidade dinâmico.....	40
4.3.4	Abrasão a seco	41
4.3.5	Resistência à compressão.....	42
4.3.6	Erosão por gotejamento- Geelong test.....	43
4.3.7	Absorção de água a baixa pressão por tubos de Karsten	44
4.3.8	Absorção de água por capilaridade	44
4.3.9	Secagem.....	46
4.4	PROCEDIMENTOS ADOTADOS NA CAMPANHA EXPERIMENTAL – ENSAIOS REALIZADOS <i>IN SITU</i>	47
4.4.1	Resistência superficial por esclerómetro pendular	47
4.4.2	Velocidade de propagação de ultrassons	48
4.4.3	Absorção de água a baixa pressão por tubos de Karsten	48
5.	Resultados e discussão	51
5.1	ANÁLISE VISUAL.....	51
5.2	CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA E MINERALÓGICA	51
5.2.1	Observação à lupa binocular	51
5.2.2	Observação ao microscópio petrográfico	51
5.2.3	Observação ao microscópio eletrónico de varrimento com microanálise de raios X (MEV/EDS)	56
5.2.4	Análise mineralógica por DRX.....	61
5.2.5	Análises por ATG/DTG/ATD.....	64
5.2.6	Resíduo insolúvel.....	66
5.2.7	Análise granulométrica por ataque de ácido	67
5.2.8	Determinação do traço das amostras de argamassa e de taipa	68
5.3	CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E MECÂNICA	69
5.3.1	Massa volúmica aparente	69
5.3.2	Dureza superficial	71
5.3.3	Módulo de elasticidade dinâmico.....	73
5.3.4	Abrasão a seco	73
5.3.5	Resistência à compressão.....	74
5.3.6	Erosão por gotejamento- Geelong test.....	76
5.3.7	Absorção de água a baixa pressão por tubos de Karsten	77
5.3.8	Absorção de água por capilaridade	79
5.3.9	Secagem.....	82
5.4	CARACTERIZAÇÃO REALIZADA <i>IN SITU</i>	84
5.4.1	Resistência superficial por esclerómetro pendular	85
5.4.2	Velocidade de propagação de ultrassons	86
5.4.3	Absorção de água a baixa pressão por tubos de Karsten	87
6.	Conclusões.....	89
6.1	CONSIDERAÇÕES FINAIS	89

6.2	DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	90
	Referências Bibliográficas	91
	Anexo A – Curva granulométrica escarpão.....	A.1
	Anexo B – Resultados da análise visual	B.1
	Anexo C – Resultados da caracterização química, mineralógica e granulométrica	C.1
	Anexo D – Resultados da caracterização física e mecânica	D.1
	Anexo E – Resultados dos ensaios <i>in situ</i>	E.1

Índice de Figuras

Figura 2.1 Castelo de Silves.....	5
Figura 2.2 Torre do Castelo de Alcácer do Sal	6
Figura 2.3 Fortaleza de Juromenha	7
Figura 2.4 Castelo de Moura	8
Figura 2.5 Castelo de Monteagudo	8
Figura 2.6 Castelo de Reina	9
Figura 2.7 Castelo de Niebla	10
Figura 3.1 Planta esquemática do Castelo	15
Figura 3.2 Ermida de Nossa Senhora da Assunção em 2007	16
Figura 3.3 Arco que une a torre às muralhas.....	17
Figura 3.4 Blocos de taipa efetuados nas obras de conservação de 2004/05, observados em 2018	19
Figura 3.5 Estado em 2018 da muralha Nascente reparada por terra projetada em 2004/0: A - vista geral; B – pormenor	20
Figura 3.6 Armaduras de aço inox liso expostas após degradação em zona de terra projetada	20
Figura 3.7 Cunhal Nordeste da muralha	21
Figura 3.8 Pormenor da utilização de varões de aço inox nervurados aplicados com bucha química para reforço da taipa nova a realizar em cunhal da torre, após preparação da taipa original	22
Figura 3.9 Provetes de taipa realizados na obra destinados à seleção da melhor dosagem a aplicar: fase 1 (A); fase 2 (B) – dosagem do provete da esquerda foi a escolhida.....	22
Figura 3.10 Alçado Nascente da torre observando-se a taipa antiga (em baixo) e nova (em cima) com “janela” de taipa antiga; vista das gárgulas de drenagem da cobertura na fachada Norte	23
Figura 3.11 Torre Albarrã após intervenção de 2018: A – alçado Norte com taipa nova; B – alçado Sul com argamassa de preenchimento de lacunas; C – alçado Nascente	23
Figura 4.1 Separação das amostras para os ensaios: A - Identificação e catalogação da amostra; B – separação de fragmentos para os diversos ensaios.....	26
Figura 4.2 Localização dos ensaios realizados in situ	27
Figura 4.3 Localização do ensaio de absorção de água a baixa pressão por tubos de Karsten: A – muralha; B – torre Nascente; C – torre Norte	28
Figura 4.4 Localização do ensaio de velocidade de propagação de ultrassons: A – muralha; B – muralha; C – torre; D – torre.....	29
Figura 4.5 Preparação da amostra desagregada: A - desagregação com martelo de borracha; B – esquartelamento	29
Figura 4.6 Preparação da fração fina: A - peneiro 106 µm; B- amostra por peneirar; C-fração fina	30
Figura 4.7 Preparação da fração global: A - moagem com auxílio de almofariz e pilão; B- amostra que ficou retida no peneiro; C- fração global.....	30
Figura 4.8 – Componentes para preparação da resina epóxi para a impregnação das amostras	30
Figura 4.9 - Impregnação das amostras: A - equipamento para a impregnação sob vácuo; B - recipientes com as amostras após impregnação	31

Figura 4.10 - Equipamentos para o corte de amostras: A – Logitech CS10; B – Buehler Isomet 4000	31
Figura 4.11 Observação à lupa binocular Olympus SZH10	32
Figura 4.12 Observação ao microscópio petrográfico Olympus BX60	32
Figura 4.13 Imagens observadas ao microscópio petrográfico: A - nicóis cruzados; B - nicóis paralelos.....	32
Figura 4.14 Observação ao MEV: A – Recobrimento das amostras com liga de ouro; B – MEV JEOL JSM 6400	33
Figura 4.15 - Imagem de elétrons retrodifundidos ao MEV (amostra de argamassa de revestimento)	34
Figura 4.16 A - Difrátometro de raios X; B - difratograma.....	35
Figura 4.17 Preparação das amostras para DRX: A - material utilizado na preparação; B - enchimento do porta amostras	35
Figura 4.18 Análise termogravimétrica e térmica diferencial: A - Gráfico ATG/DTG/ATD da amostra CP2018B; B - equipamento SETARAM TGA 92	36
Figura 4.19 A – Agitadores magnéticos para determinação do resíduo insolúvel; B – Filtragem do resíduo do ataque ácido para determinação do resíduo insolúvel	37
Figura 4.20 Agitador de peneiros para a separação granulométrica	38
Figura 4.21 A – Cadinho de Gooch utilizado para filtragem da solução para análise granulométrica; B – Bomba de vácuo para filtragem da areia	38
Figura 4.22 Ensaio de dureza superficial em amostra de taipa militar com durómetro Shore A	40
Figura 4.23 Ensaio de amostra de taipa militar no Zeus Resonance Meter	40
Figura 4.24 Equipamento de resistência à abrasão	41
Figura 4.25 Preparação dos provetes para o ensaio de compressão: A – corte; B - aplicação de argamassa para regularizar a base	42
Figura 4.26 Ensaio compressão de uma amostra de taipa militar com equipamento ZWICK Z050	43
Figura 4.27 Ensaio em amostra de taipa militar de erosão por gotejamento	43
Figura 4.28 Ensaio de absorção de água a baixa pressão com tubo de Karsten numa amostra de taipa militar.....	44
Figura 4.29 A – Amostras de taipa e de reboco da ermida em contato com água no ensaio de capilaridade; B – Pesagem de amostra no seu cesto em balança de precisão.....	45
Figura 4.30 Curva de absorção de água por capilaridade e representação do coeficiente de capilaridade.....	46
Figura 4.31 Curvas de secagem: A – curva para determinação da taxa de secagem Ts1; B – curva para determinação da taxa de secagem Ts2	47
Figura 4.32 Ensaio de resistência superficial com esclerómetro pendular em bloco de taipa reconstruído em 2004	47
Figura 4.33 Ensaio de velocidade de propagação de ultrassons em terra projetada em 2004	48
Figura 4.34 Ensaio de absorção de água por tubos de Karsten pelo método vertical em argamassa de reparação aplicada na torre	49

Figura 5.1 Amostras observadas à lupa binocular: A – AM1; B – AM2; C – AM10; D – AM11; E – CP2018A; F – CP2018B; G – CP2018C; H – CP2018D	52
Figura 5.2 Amostras observadas ao microscópio petrográfico com nicóis paralelos: A – AM1; B – AM2; C – AM10; D – AM11; E – CP2018A; F – CP2018B; G – CP2018C; H – CP2018D	54
Figura 5.3 Amostras observadas ao microscópio petrográfico com nicóis cruzados: A – AM1; B – AM2; C – AM10; D – AM11; E – CP2018A; F – CP2018B; G – CP2018C; H – CP2018D	55
Figura 5.4 Amostra AM1: A - Imagem ao MEV; B – Espetro EDS correspondente a um nódulo de cal.....	56
Figura 5.5 Amostra AM2: A - Imagem ao MEV; B – Espetro EDS da camada de barramento exterior (cal cálcica); C – Espetro EDS da camada intermédia do barramento; D – Espetro EDS da camada interior do barramento (cal dolomítica).....	57
Figura 5.6 Amostra AM10: A - Imagem ao MEV; B – Espetro EDS dum nódulo de cal (cálcica); C – Espetro EDS de quartzo; D – Espetro EDS dum grão de calcário; E – Espetro EDS de feldspato; F – Espetro EDS da mica.....	58
Figura 5.7 Amostra AM10: A - Imagem ao MEV; B – Espetro EDS da pasta do ligante de terra e cal, mas mais rica em terra; C – Espetro EDS da pasta do ligante de terra e cal; D – Espetro EDS da pasta do ligante de terra e cal, , mas mais rica em cal	58
Figura 5.8 Amostra AM11: A - Imagem ao MEV; B – Espetro EDS dum grão de calcário; C – Espetro EDS dum feldspato; D – Espetro EDS dum nódulo de cal cálcica	59
Figura 5.9 Amostra CP2018A: A - Imagem ao MEV; B – Espetro EDS de silicatos de cálcio	59
<i>Figura 5.10 Amostra CP2018B: A - Imagem ao MEV; B – Espetro EDS numa zona de pasta rica em cal cálcica; C – Espetro EDS de silicato de cálcio; D – Espetro EDS dum nódulo de cal cálcica</i>	<i>60</i>
<i>Figura 5.11 Amostra CP2018C: A - Imagem ao MEV; B – Espetro EDS numa zona da pasta do ligante rica em cal cálcica; C – Espetro EDS numa zona de pasta do ligante rica em terra</i>	<i>60</i>
<i>Figura 5.12 Amostra CP2018D: A - Imagem ao MEV; B – Espetro EDS de óxido/hidróxido de ferro</i>	<i>61</i>
Figura 5.13 – Difractograma de raios X da amostra CP2018A: Global – vermelho; FFina – azul	61
Figura 5.14 Difractograma de raios X da amostra CP2018B: Global – vermelho; FFina – azul	61
Figura 5.15 Difractograma de raios X da amostra CP2018C: Global – vermelho; FFina – azul	62
Figura 5.16 Difractograma de raios X da amostra CP2018D: Global – vermelho; FFina – azul	62
Figura 5.17 Curva ATG/DTG/ATD da amostra de taipa CP2018A	64
Figura 5.18 Curva ATG/DTG/ATD da amostra de taipa CP2018B	64
Figura 5.19 Curva ATG/DTG/ATD da amostra de taipa CP2018C	65
Figura 5.20 Curva ATG/DTG/ATD da amostra de taipa CP2018D	65
Figura 5.21 Curvas da distribuição granulométrica do agregado fino nas amostras de taipa da torre	68
Figura 5.22 Resultados da dureza superficial Shore A de amostras de argamassa e de taipa militar	72
<i>Figura 5.23 Resultados do módulo de elasticidade dinâmico de amostras de taipa militar</i>	<i>73</i>
<i>Figura 5.24 Ensaio de erosão por gotejamento: A – provete antes do ensaio; B - mancha de água após ensaio.....</i>	<i>77</i>
<i>Figura 5.25 Evolução da absorção de água a baixa pressão por tubos de Karsten em amostras de argamassa e de taipa militar.....</i>	<i>78</i>

<i>Figura 5.26 Evolução da absorção de água a baixa pressão por tubos de Karsten – amostras de argamassa de assentamento da ermida</i>	<i>78</i>
<i>Figura 5.27 Evolução da absorção de água a baixa pressão por tubos de Karsten – amostras de taipa militar da muralha.....</i>	<i>79</i>
<i>Figura 5.28 Evolução da absorção de água a baixa pressão por tubos de Karsten – amostras de taipa militar da torre</i>	<i>79</i>
<i>Figura 5.29 Curvas de capilaridade das amostras de taipa militar das muralhas: A - AM10; B - AM11.....</i>	<i>80</i>
<i>Figura 5.30 Curvas de capilaridade das amostras de taipa militar da torre: A - CP2018B, B - CP2018C e C - CP2018D.....</i>	<i>80</i>
<i>Figura 5.31 Curvas de secagem de amostras de taipa militar da muralha em função do tempo em horas: A – AM10; B – AM11</i>	<i>82</i>
<i>Figura 5.32 Curvas de secagem de amostras de taipa militar da muralha em função da raiz do tempo: A – AM10; B – AM11</i>	<i>82</i>
<i>Figura 5.33 Curvas de secagem de amostras de taipa militar da torre em função do tempo em horas: A – CP2018B; B – CP2018C; C – CP2018D.....</i>	<i>83</i>
<i>Figura 5.34 Curvas de secagem de amostras de taipa militar da torre em função da raiz do tempo: A – CP2018B; B – CP2018C; C – CP2018D.....</i>	<i>83</i>
<i>Figura 5.35 Resultados (valor médio e de desvio-padrão) da resistência por esclerómetro pendular realizados na muralha.....</i>	<i>85</i>
<i>Figura 5.36 Resultados (valor médio e de desvio-padrão) da resistência por esclerómetro pendular realizados na torre</i>	<i>85</i>
<i>Figura 5.37 Curvas de absorção de água a baixa pressão por tubos de Karsten na torre: A - provete; B – argamassa de reparação</i>	<i>87</i>
<i>Figura 5.38 Curvas de absorção de água a baixa pressão por tubos de Karsten na muralha anterior a 2004.....</i>	<i>88</i>

Índice de Tabelas

Tabela 2.1 Ensaio de caracterização realizados por diversos autores em amostras de taipa, blocos de terra comprimida e argamassa de terra	12
Tabela 2.2 Ensaio de caracterização realizados por diversos autores em amostras de taipa militar	13
Tabela 3.1 Composição em volume utilizada na intervenção de 2017/18	22
Tabela 4.1 Amostras analisadas na campanha experimental laboratorial	25
Tabela 4.2 Amostras sujeitas a ensaios químicos e físicos	26
Tabela 4.3 Ensaio realizado in situ - descrição e localização das zonas ensaiadas	28
Tabela 4.4 Peneiros da série ASTM para a separação granulométrica	38
Tabela 5.1 Resumo dos principais aspetos observados à lupa binocular em amostras de argamassa e de taipa militar do Castelo de Paderne	53
Tabela 5.2 Composição mineralógica obtida por DRX das amostras de taipa da torre	63
Tabela 5.3 Composição mineralógica DRX das amostras de taipa da muralha	63
Tabela 5.4 Perdas de massa obtidas por ATG para as amostras de taipa da torre	66
Tabela 5.5 Perdas de massa obtidas por ATG de amostras de argamassa e de taipa da muralha	66
Tabela 5.6 Resultados do resíduo insolúvel para as amostras de taipa da torre do Castelo de Paderne	67
Tabela 5.7 Resultados do resíduo insolúvel de amostras de taipa militar	67
Tabela 5.8 Resultados da análise granulométrica do agregado: valores de material retido e passado para as amostras de taipa da torre	67
Tabela 5.9 Composição ponderal das amostras de taipa da torre	68
Tabela 5.10 Composição ponderal das amostras de taipa da muralha	69
Tabela 5.11 Resultados da massa volúmica aparente obtida	70
Tabela 5.12 Massa volúmica de amostras de taipa corrente recolhidas em três construções antigas no Alentejo	70
Tabela 5.13 Massa volúmica de amostras de taipa corrente recolhidas na região do Alentejo	70
Tabela 5.14 Massa volúmica de provetes reproduzindo taipas correntes	71
Tabela 5.15 Massa volúmica de provetes de argamassas de terra	71
Tabela 5.16 Massa volúmica provetes de argamassas de cal com terra	71
Tabela 5.17 Massa volúmica de blocos de terra comprimida estabilizados com cimento	71
Tabela 5.18 Dureza superficial Shore A de amostras de taipa corrente	72
Tabela 5.19 Resultados de perda de massa por abrasão a seco de amostras de taipa militar	74
Tabela 5.20 Resultados de resistência à compressão de amostras de taipa militar	74
Tabela 5.21 Resistência à compressão de amostras de taipa corrente	75
Tabela 5.22 Resistência à compressão de provetes de argamassa de cal e terra	75
Tabela 5.23 Resistência à compressão de provetes de argamassa de terra e cal	75
Tabela 5.24 Resistência à compressão de blocos de terra	76
Tabela 5.25 Resultados de perda de massa por erosão por gotejamento de amostras de taipa militar	76

Tabela 5.26 Resultados do ensaio de erosão por gotejamento em amostras de taipa militar: valores de água retida	77
Tabela 5.27 Resultados do ensaio de erosão por gotejamento em amostras de taipa militar: dimensão da mancha de água	77
Tabela 5.28 Resultados do coeficiente de capilaridade de amostras de taipa militar	81
Tabela 5.29 Massa volúmica de amostras de taipa corrente.....	81
Tabela 5.30 Resultados do coeficiente de capilaridade de argamassas de reparação de taipa.....	81
Tabela 5.31 Resultados do coeficiente de capilaridade de argamassas de cal e terra.....	82
Tabela 5.32 Resultados da taxa de secagem de amostras de taipa militar da muralha e da torre.....	84
Tabela 5.33 Resultados da taxa de secagem inicial de amostras de argamassa de cal hidratada	84
Tabela 5.34 Resultados da taxa de secagem inicial de amostras de argamassa de cal e terra	84
Tabela 5.35 Resultados da velocidade de propagação de ultrassons.....	86
Tabela 5.36 Resultados de absorção de água a baixa pressão por tubos de Karsten (em bloco de taipa realizado em 2004)	88

1. Introdução

1.1 Enquadramento

A utilização de terra como material de construção corresponde a uma prática comum desde a pré-história (Bruno et al. 2010) e que se estendeu de forma corrente nos países desenvolvidos até à 1ª metade do século XX. Depois de algumas décadas em que não foi muito utilizada, o interesse pelo uso da terra como material de construção renasceu nos países desenvolvidos principalmente desde o final do século XX associado a questões de sustentabilidade.

As construções com terra encontram-se dispersas por todo o mundo, tendo uma maior incidência nas zonas de climas quentes e de baixa pluviosidade (Font 2005), pois a ação da água é um dos principais problemas associados a este tipo de construções. Além da água da chuva, a água presente nos solos que é absorvida por ascensão capilar consiste num enorme problema pois pode ainda transportar sais solúveis (principalmente cloretos e nitratos) que provocam várias anomalias, nomeadamente ao nível estrutural dessas construções (Faria 2006; Braga e Estevão 2012).

A terra foi e é usada nas construções em diversas técnicas construtivas, nomeadamente em paredes monolíticas (por exemplo, a taipa, obtida pela compactação de camadas sucessivas de uma mistura à base de terra húmida dentro de uma cofragem, designada de taipal), em alvenarias de blocos de terra (por exemplo de adobe) (Rocha 2015) e em argamassas para assentamento ou de reboco (Faria e Lima 2018). Na técnica construtiva da taipa destaca-se a taipa militar, em que na composição da terra húmida utiliza-se uma percentagem de cal aérea. Esta adição, que constitui uma estabilização da taipa, aumenta significativamente a durabilidade da taipa face à ação da água. As construções em taipa militar tiveram uma grande disseminação com a invasão muçulmana da península ibérica, sendo possível ainda hoje constatar o enorme número de fortificações erguidas dessa altura (Bruno 2005). Dessas fortificações destacam-se as que são apresentadas na presente dissertação, como é o caso em Portugal do Castelo de Paderne (com maior destaque no presente trabalho), o Castelo de Silves, o Castelo de Alcácer do Sal, a Fortaleza de Juromenha e o Castelo de Moura. Das fortificações presentes em Espanha é de destacar o Castelo de Monteagudo, o Castelo de Reina e o Castelo de Niebla.

A falta de documentação dos materiais e técnicas utilizadas durante o processo de construção são um obstáculo para a prossecução de intervenções corretas. De facto, para que essas intervenções tenham melhores desempenhos é necessário que haja compatibilidade de materiais e de técnicas. Desta forma é necessário o estudo prévio das construções e uma análise ao resultado de intervenções passadas, para assim ser possível ter dados que suportem corretas intervenções de conservação e reparação.

1.2 Objetivos e metodologia

O objetivo da presente dissertação é, com base na análise visual, caracterização física, mecânica, química e microestrutural de amostras de materiais presentes na estrutura amuralhada e restantes construções do Castelo de Paderne, da análise da documentação existente sobre as intervenções anteriores e recolhida

sobre a intervenção realizada em 2017/2018, contribuir com informação que permita fundamentar intervenções futuras neste Castelo e em construções similares. Para a caracterização dos materiais e técnicas utilizadas foram tidas em conta todas as intervenções na estrutura defensiva e a cuja documentação se teve acesso.

O Castelo de Paderne é um dos casos de estudo incluído na base de dados de materiais de construção com valor histórico e patrimonial do projeto DB-HERITAGE (PTDC/EPH-PAT/4684/2014), financiado pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia. O projeto DB-HERITAGE, coordenado pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil e com a participação da Faculdade de Ciências da Universidade Nova de Lisboa, Universidade de Aveiro e Universidade de Évora, tem como um dos principais objetivos a criação duma base de dados com a compilação de informação sobre o desempenho de materiais empregues em estruturas de valor patrimonial e histórico com o intuito de auxiliar futuras intervenções no património construído, utilizando as melhores técnicas e materiais.

Na presente dissertação pretende-se “contar a história” do Castelo de Paderne relativamente às intervenções a que foi sujeito, com o objetivo de, através do registo documental e físico dos materiais utilizados e da ação ocorrida com essas intervenções passadas, contribuir para a definição de intervenções corretas com vista à melhor preservação deste tipo de monumentos.

1.3 Estrutura e organização

A presente dissertação encontra-se dividida em seis capítulos. No primeiro capítulo, capítulo atual, é efetuado um enquadramento ao tema com os respetivos objetivos e metodologia e a estrutura organizacional do texto.

No capítulo dois é apresentado o estado dos conhecimentos em relação ao tema estudado, efetuando-se uma descrição de diversas obras da arquitetura militar islâmica. No capítulo três é descrito o Castelo de Paderne, caso de estudo desta dissertação, referindo-se as diversas intervenções efetuadas até aos dias de hoje a que se teve acesso e a análise do estado atual dessas mesmas intervenções.

No quarto capítulo é efetuada a descrição da campanha de amostragem e de todos os ensaios realizados, *in situ* e em laboratório, durante a campanha experimental.

No quinto capítulo são apresentados e analisados todos os resultados obtidos durante a campanha experimental e, sempre que possível, é realizada uma comparação com resultados obtidos por outros autores na mesma ou em fortificações similares. São também efetuadas comparações entre a taipa tradicional e a taipa militar.

No sexto, e último, capítulo apresentam-se as conclusões obtidas do trabalho realizado e tecem-se algumas considerações sobre propostas de trabalhos futuros.

No anexo A encontra-se a curva granulométrica da terra utilizada para a intervenção de 2017/18 no Castelo de Paderne. No anexo B apresenta-se a análise visual efetuada a todas as amostras antes da sua preparação para os diversos ensaios. Nos anexos C, D e E são apresentados, com um maior detalhe, os resultados de caracterização química e mineralógica, física e mecânica e os ensaios realizados *in situ*, respetivamente.

2. Arquitetura de taipa militar

2.1 A terra como material de construção

A utilização de terra como material de construção corresponde a uma técnica bastante antiga. A fácil trabalhabilidade, quando adicionada água, e os baixos custos associados à sua utilização fazem com que a terra durante milénios tenha sido um dos materiais de construção mais utilizados no mundo. As construções em terra encontram-se principalmente, embora não exclusivamente, em zonas de verões quentes e de baixa pluviosidade (Font 2005).

Em Portugal, houve um declínio na utilização da terra na construção a partir da 2ª metade do séc. XX. Entretanto muitas das construções realizadas com terra foram demolidas devido a pressões urbanísticas, principalmente em zonas mais urbanas. Mesmo assim, existe uma grande incidência de construções utilizando uma das técnicas construtivas associadas à terra principalmente no sul de Portugal, nomeadamente no Algarve e Baixo Alentejo.

De entre as construções com terra, as técnicas vernáculas mais utilizadas para a execução de paredes são o tabique, para paredes não resistentes, a alvenaria de adobe e a taipa para paredes resistentes. Em construção mais recente usam-se também blocos de terra comprimida em alvenarias.

O tabique corresponde a uma técnica de construção utilizada principalmente na execução de paredes divisórias, embora no norte de Portugal tenha sido também utilizado em paredes exteriores. É efetuada uma estrutura ligeira de madeira, constituída essencialmente por prumos verticais e tábuas de preenchimento, às quais são pregadas ripas de madeira, meios troncos de pequeno diâmetro ou canas. A estrutura é posteriormente revestida e preenchida com uma argamassa de terra ou de terra e cal (Faria 2005).

O adobe é um bloco de terra moldado e seco ao ar, constituído por uma pasta de terra, que pode conter, ou não, agregados, como areia ou fibras, e que é utilizado na execução de alvenarias assentes com argamassa também de terra, de cal ou mista de terra e ca aérea. São efetuados adobes de dimensões variáveis através do uso de moldes, estes tradicionalmente de madeira (Gonçalves e Gomes 2012).

A taipa tradicional corresponde a uma técnica de construção em que uma terra desterroada e húmida é compactada entre taipais de madeira (apoiados em agulhas do mesmo material) em camadas sucessivas, por um maço ou pilão, formando assim estruturas monolíticas. Uma das vertentes da taipa na construção, usada em castelos e fortificações militares, é a taipa militar. Nesta, é adicionada cal aérea à terra húmida antes de ser colocada nas camadas a serem apiloadas, tornando assim a estrutura mais resistente à água.

2.2 O domínio muçulmano na península ibérica

A conquista pelos muçulmanos da península ibérica iniciou-se em 711 com o objetivo de espalhar a sua religião, o islamismo, e de uma procura por melhores condições de vida, sendo que em 714 já quase a totalidade do al-Andaluz estava sob o seu domínio. Ocuparam a península ibérica mais de 700 anos, tendo sido em 1249 a sua expulsão de Portugal e em 1492 ocorreu a sua expulsão do território espanhol (Proença 2015).

O domínio muçulmano na península ibérica pode ser dividido em três períodos distintos. O primeiro período corresponde ao início do domínio muçulmano e da criação de um emirado, no entanto dependente do califado de Damasco. O segundo período corresponde ao emirado e califado de Córdoba e o terceiro período corresponde ao final do califado e à formação de reinos de taifas e do reino de Granada. Em termos cronológicos, o primeiro período ocorreu entre os anos de 711 e 756, o segundo período entre 756 e 1031 e, por fim, o último período corresponde aos anos de 1031 até à expulsão dos muçulmanos da península ibérica em 1492.

No último período do domínio muçulmano surgiram os Almorávidas e os Almóadas, que vieram pregar a guerra santa e desestruturar as relações anteriormente criadas entre os muçulmanos e os cristãos (Proença 2015). O califado Almóada correspondeu a um período de domínio muçulmano que surgiu no século XII e estendeu-se até meados do século XIII, após o enfraquecimento e conseqüente declínio do império Almorávida. Os Almóadas, provenientes de Marrocos controlaram a península ibérica, desde o início da monarquia até à dinastia de D. Afonso III, tendo sido o último califado a ocupar o território.

O património arquitetónico deixado pelos Almóadas é bastante vasto, sendo que maior parte das construções usam a terra como material e estão dispostas ao longo do sul da península ibérica. A utilização de terra compactada com adição de cal nas suas construções é um dos traços presentes no período Almóada, bem como a utilização de formas bastante regulares na disposição estrutural com pequenas particularidades. Algumas destas particularidades são as portas em cotovelo e a presença de torres Albarrãs em pontos estratégicos de defesa (Branco Correia 2017).

A grande devoção pela fé islâmica verifica-se na introdução de mesquitas e capelas na maior parte das construções erguidas ou modificadas durante o período Almóada.

O período islâmico Almóada não só deixou de herança as enormes estruturas defensivas, como também é visível a presença de algumas obras ao nível da hidráulica, como o caso das várias cisternas e canalizações construídas neste período para armazenamento e transporte de água. A preocupação com o ordenamento do território era uma constante durante a construção Almóada.

2.3 Fortificações do período do domínio muçulmano

Foram várias as fortificações erguidas no domínio muçulmano, sendo que algumas foram já estudadas por diversos autores. Em Portugal destacam-se o Castelo de Silves, o Castelo de Alcácer do Sal, a Fortaleza de Juromenha, o Castelo de Moura e o Castelo de Paderne. Este último será detalhado no capítulo seguinte. Das fortificações presentes em Espanha é de destacar o Castelo de Monteagudo, o Castelo de Reina e o Castelo de Niebla.

2.3.1 Castelo de Silves

O Castelo de Silves, com a identificação IPA 00001288, na base de dados do sistema de informação para o património arquitetónico (SIPA) (W1) (Figura 2.1) situa-se nesta cidade, capital do respetivo concelho, distrito de Faro. Não se conhece ao certo a data em que esta fortificação foi erguida; no entanto, estima-se que tenha sido entre os séculos VIII e IX, no domínio muçulmano. Esta fortificação apesar de erguida anteriormente apresenta características do período Almóada, o que pode ser justificado por todas as reformulações que sofreu.



Figura 2.1 Castelo de Silves (SIPA W1)

Presente na Carta Militar nº 595, Silves, Esc. 1/25 000 (Instituto Geográfico do Exército 1993a), a fortificação foi classificada como monumento nacional pelo Decreto-Lei (DL) de 16 de junho de 1910 e publicado no Diário de Governo (DG) n.º 136, de 23-06-1910 e foi atribuída à área envolvente a classificação de zona especial de proteção (ZEP) pela Portaria de 25-05-1948, publicada no DG, II Série, n.º 151, de 1-07-1948.

Com uma planta poligonal irregular, tem uma área de aproximadamente 12000 m², apresenta duas entradas e 11 torres. A muralha de taipa militar é revestida a arenito vermelho, mais conhecido por grés de Silves. No entanto, não se sabe em que época terá sido efetuado este revestimento. Os taipais utilizados na sua construção, bem como na maioria das construções deste período, têm côvados de 40 a 45 cm (Bruno 2005).

Na muralha foram encontrados fragmentos de osso, além de materiais como quartzo, hematite, calcite, gesso e materiais cerâmicos. O traço em massa de cal:terra utilizado nesta fortificação foi de 1:2 (Cravo 1989).

Nas décadas de 30 e 40 do século XX foram realizadas obras de conservação, incluindo consolidação da muralha Almóada, e a reconstrução de algumas das torres que se encontravam em ruínas. Desde 1965 até ao ano de 1993 foram efetuadas obras de reconsolidação em quase todos os anos consecutivos, estas obras basearam-se na reconstrução de alguns troços de muralha, consolidação de algumas zonas e fechamento de juntas, obras estas que foram sempre levadas a cabo pela Direção Geral de Edifícios e Monumentos Nacionais (DGEMN).

A partir do ano 2000 as obras passaram a ser levadas a cabo pela Câmara Municipal de Silves, nesse mesmo ano foram efetuadas obras de recuperação com a execução do respetivo sistema de escoamento de águas pluviais. Em 2002 foram reconstruídos dois cunhais e foi efetuado o fechamento das juntas que já se encontravam danificadas (W1).

2.3.2 Castelo de Alcácer do Sal

O Castelo de Alcácer do Sal (Figura 2.2), com a identificação IPA.00003440, na base de dados SIPA (W1). Encontra-se situado na cidade de Alcácer do Sal, distrito de Setúbal, e encontra-se presente na Carta Militar nº 476, Alcácer do Sal, Esc. 1/25 000 (Instituto Geográfico do Exército 1993b).



Figura 2.2 Torre do Castelo de Alcácer do Sal (adaptado de W2)

O Castelo e as suas muralhas de taipa militar foram erguidos no século XII, período Almóada do domínio muçulmano, tendo sido classificado como monumento nacional pelo DL de 16 de junho de 1910 e publicado no DG n.º 136, de 23-06-1910.

A fortificação apresenta uma planta irregular que acompanha a morfologia do terreno, com dois planos de muralhas. Ostenta duas entradas, uma a norte e outra a nascente, e sete torres, de forma sensivelmente quadrangular. Na sua muralha, foram utilizados taipais com as dimensões de côvados de 40-45 cm, e apresenta um traço volumétrico de cal:terra de 1:4 a 1:5 (Bruno 2005).

A partir do século XIX a fortificação foi deixada ao abandono, o que levou à degradação e destruição total de vários troços da muralha. No início do século XX, foram inclusive utilizados explosivos para a extração de pedaços da muralha que foram vendidos como blocos de alvenaria (Trindade Chagas 2005).

Finalmente na década de 90 do século XX iniciou-se o processo de conservação e reabilitação de toda a fortificação, tendo a mesma passado a abrigar uma pousada. Das obras de conservação fizeram parte a reparação da muralha, que manteve a mesma estrutura e materiais da muralha original. Efetuaram-se preenchimentos de lacunas de superfícies da muralha com argamassas, constituídas por terra e cal, com características semelhantes à taipa original (Trindade Chagas 2005).

2.3.3 Fortaleza de Juromenha

A fortaleza de Juromenha (Figura 2.3), com a identificação IPA.00004461, na base de dados SIPA (W1), encontra-se situada na antiga freguesia de Juromenha, concelho de Alandroal, distrito de Évora, no Alentejo. Erguida no século XVII, foi classificada como imóvel de interesse público pelo Diário da República (DR) n.º 41/191 de 18-07-1957, encontra-se presente na Carta Militar nº 441, Juromenha (Alandroal), Esc. 1/25 000 (Instituto Geográfico do Exército 1993c).

Fortaleza do período do domínio muçulmano, apresenta uma planta irregular com muralhas de taipa militar e 17 torres, também de taipa militar ou de alvenaria de pedra aparelhada. No interior da fortificação encontra-se um castelo, o Castelo de Juromenha, que, tal como as torres, apresenta os dois materiais.

As muralhas da Fortaleza de Juromenha exibem um embasamento com pedra da região e cunhais reforçados com silhares de granito e xisto. Por uma questão defensiva, e para fingir uma constituição com

material mais resistente, toda a taipa das muralhas encontrava-se revestida com um reboco de argamassa à base de cal aérea, simulando grandes silhares de pedra, não tendo sido encontrada informação do respetivo traço.



Figura 2.3 Fortaleza de Juromenha (adaptado de W3)

Os taipais que foram utilizados para a construção da muralha apresentam uma altura de 92 cm (2 côvados de 46 cm) e uma espessura de 1,55 m e 1,80 m (4 côvados), respeitando assim a proporção entre dimensões utilizadas nas construções do domínio muçulmano de 1:2 (altura : espessura) (Bruno 2005).

Foram várias as obras de conservação na fortaleza, sendo de destacar as realizadas pela DGEMN entre os anos de 1950 e 1996. A muralha islâmica foi uma das zonas mais intervencionadas, com obras em 1984/85 e 1988/89 (Bruno 2000). As obras de conservação realizadas em 1984/85 consistiram na execução de taipa para enchimento e consolidação de alguns paramentos. Nesta intervenção foi utilizado cimento, além da cal e da terra da região. Nas obras de 1988/89, que incidiram sobre a fachada norte da muralha, foram consolidadas fendas por injeção e executada taipa para reconstrução, na qual foi apenas utilizada terra (com agregados de dimensão adequada) e cal aérea (Bruno 2000).

A fortaleza, devido a diversos fatores humanos e naturais, foi sujeita a um processo de degradação acelerado, que nem as diversas obras de conservação foram suficientes para travar. Atualmente grande parte da muralha islâmica encontra-se em ruínas.

2.3.4 Castelo de Moura

O castelo de Moura (Figura 2.4), com a identificação IPA.00000993, na base de dados SIPA (W1), encontra-se situada na antiga freguesia de São João Baptista, concelho de Moura, distrito de Beja no Alentejo. Erguido entre os séculos XI - XII, foi classificado como imóvel de interesse público DR n.º 33 587 de 27-03-1944, encontra-se presente na Carta Militar nº 501, Moura, Esc. 1/25 000 (Instituto Geográfico do Exército 1993d).

Fortaleza do período do domínio muçulmano, apresenta uma planta sensivelmente retangular com muralhas de taipa militar e uma torre de menagem a sudeste, a entrada para o recinto fortificado, tal como em grande parte das construções da época é efetuada por uma porta em cotovelo.

O castelo e as suas muralhas são de taipa militar e é possível verificar a existência de vestígios de rebocos e pinturas a simular silhares de pedra, tática defensiva bastante comum (Bruno 2005). Os taipais que foram utilizados para a construção da muralha apresentam uma altura de côvados de 40 a 45 cm e uma espessura de 1,55 m de adarve e 0,55 m de parapeito (Bruno 2005).



Figura 2.4 Castelo de Moura (adaptado de W1)

A destruição do castelo e suas muralhas iniciou-se com o fim da Guerra da Restauração, com a implantação de vários edifícios nas zonas onde outrora se ergueram muralhas. Em 1809 grande parte dos muros de taipa do castelo e recinto fortificado foram utilizados como matéria prima para a produção de salitre numa fábrica que veio a implementar-se naquele local (Macias 1992).

As obras de conservação efetuadas em toda a fortaleza foram essencialmente levadas a cabo pela DGMN, sendo que as primeiras obras documentadas datam de 1959, com o intuito de refazer e devolver a autenticidade do recinto que se perdeu, com a reconstrução da muralha a Norte. Em 1971 e 1972 foi recuperada a muralha junto à alcáçova e a igreja foi reconstruída. Em 1982 foram efetuados trabalhos ao nível da cobertura da igreja e em 1985 foram efetuadas obras de recuperação (W1).

Em 2018, após as obras terem passado para a alçada da Câmara Municipal de Moura foi publicado um anúncio de procedimento, para futuras obras de conservação das muralhas que preveem a injeção de caldas, pregagens e realização de novos rebocos (W1).

2.3.5 Castelo de Monteagudo

O Castelo de Monteagudo e seu recinto fortificado localiza-se a cerca de 5 km de Murcia, na província de mesmo nome em Espanha (Figura 2.5).

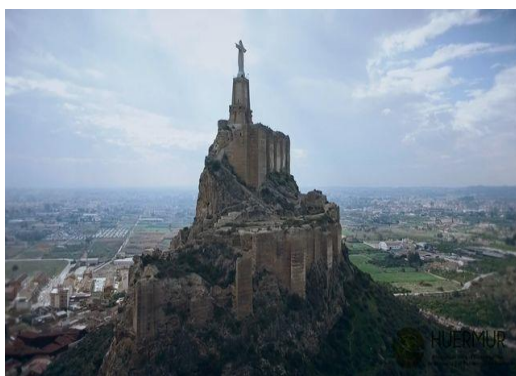


Figura 2.5 Castelo de Monteagudo (adaptado de W4)

Fortaleza do período de domínio muçulmano na península ibérica, com início de construção no século XII, apresenta uma planta poligonal, sensivelmente retangular, que acompanha os desníveis do terreno. De taipa militar apresenta uma área de cerca de 1300 m², estando situado no cume de uma montanha rochosa. Apresenta várias torres de forma prismática retangular (Palazón e Castillo 1995).

Os taipais utilizados na construção da sua muralha são de 80 a 84 cm, o que corresponde a dois côvados de 45. No que diz respeito às suas torres, são de taipa militar tal como a restante fortificação, no entanto apresentam a particularidade de que devido ao seu posicionamento nas esquinas formam ângulos interiores. Nas zonas mais elevadas do Castelo verifica-se a presença de algum material cerâmico na execução de abóbodas que serviriam de cobertura para zonas de armazéns ou silos (Palazón e Castillo 2011).

O recinto fortificado encontra-se desde 1985 registado como bem de interesse cultural, pela segunda cláusula adicional da lei 16/1985 de 25 de junho, pelo Património Histórico Espanhol.

Várias escavações arqueológicas estão documentadas, e algumas intervenções de restauro foram efetuadas, no entanto não foi possível datar essas intervenções. As principais intervenções que se verificam são ao nível das muralhas de taipa, em que foram refeitos alguns blocos que se encontravam em falta.

Após a divulgação de um vídeo por parte da Asociación para la Conservación de la Huerta y el Patrimonio de Murcia, em que se dava conta do estado de degradação do recinto fortificado, o governo regional tomou a decisão de proceder a obras com carácter urgente para que a autenticidade e o valor histórico não se perca (W4).

Atualmente encontra-se erguida no recinto interior do Castelo de Monteagudo uma estátua com cerca de 14 m de altura em homenagem ao cristo de Monteagudo.

2.3.6 Castelo de Reina

O Castelo de Reina encontra-se situado em Espanha, na província de Badajoz e município de Reina (Figura 2.6). Ao longo da muralha é visível a utilização de dois tipos de taipa. Nas camadas inferiores a taipa apresenta uma tonalidade mais escura, devido à adição de cerâmicas e agregados de grandes dimensões. Esta taipa apresenta uma coesão baixa. A taipa das camadas superiores apresenta uma elevada percentagem de cal que, devido ao processo de carbonatação, lhe confere uma maior durabilidade (Rocha 2005).



Figura 2.6 Castelo de Reina (Rocha 2003)

Em 2002 o castelo de Reina foi sujeito a obras de conservação que englobaram 5 fases. As obras incidiram na consolidação e reparação das muralhas, incluindo a realização de nova taipa contra a taipa existente na muralha. Esta técnica assemelha-se, dentro do possível, à técnica original. No entanto, são apenas utilizados taipais de um dos lados e o processo é muito mais difícil e moroso que a realização de taipa em situação normal. Foi utilizada em zonas em que a parte inferior tinha perdido espessura significativa e a muralha estava em risco de colapso. O apiloamento ou compactação não se pode realizar na vertical, o que gera ações em diversas direções e o fecho de um bloco de taipa de preenchimento de lacuna na base

de uma parede, contra a taipa existente, é particularmente difícil de realizar. As obras de conservação incluíram também a realização de novos blocos de taipa em zonas em que a taipa existente estava completamente destruída. Para definir a execução dos novos blocos de taipa foram realizados 28 provetes com terra local e diversas misturas e dosagens, que se deixaram em envelhecimento natural, tendo-se selecionado uma com o traço, em volume, de 1:2:2,5 (ligante:areia:terra) (Rocha 2003). Não se teve conhecimento de qual o ligante utilizado. Após a realização dos provetes decidiu-se também que o apiloamento dos novos blocos de taipa deveria ser mecânico por vibração.

2.3.7 Castelo de Niebla

O Castelo de Niebla encontra-se situado em Espanha, na província de Huelva e município de Niebla (Figura 2.7). Não se conhece ao certo a data em que foram erguidos o castelo e o perímetro amuralhado; no entanto, estima-se que tenha ocorrido entre os séculos XI e XII, do período de domínio muçulmano na península ibérica. A sua muralha é de taipa militar, bem como as suas 47 torres, o perímetro amuralhado apresenta uma extensão de cerca de 2 km e uma área total de implementação de 16 hectares. O embasamento é feito em alvenaria de pedra e os cunhais são reforçados com silhares de pedra, apresenta materiais e técnica do período Almorávida e Almóada.



Figura 2.7 Castelo de Niebla (Zamorano 2007)

O perímetro amuralhado e o respetivo Castelo sofreram algumas intervenções no início do século XX e a mais significativa ocorreu no final do mesmo século. A degradação a que a fortificação chegou prendeu-se com diversos fatores, entre eles o terramoto de Lisboa em 1755, a ocupação pelos franceses durante a guerra da independência e a utilização do mesmo enquanto pedreira (Zamorano 2007).

Nos anos de 1950 e 1962 o castelo e as suas muralhas sofreram intervenções, levadas a cabo pelo Arquiteto Félix Hernández Giménez, que já teria planeado essa intervenção ao longo de vários anos. A intervenção incidiria principalmente em cinco pontos considerados fulcrais pelo arquiteto, na remoção de elementos parasitários e na limpeza da zona envolvente, a destruição de algumas construções que punham em causa a autenticidade da estrutura, reforço de fundações existentes, consolidação de zonas deterioradas e a substituição de troços da fortaleza degradados (Zamorano 2007).

A intervenção mais importante iniciou-se em 1980, tendo englobado diversas fases. Foi inicialmente dirigida pelo Arquiteto Ismael Guarner, e posteriormente pelo Arq. Manuel Lopez Vicente.

As obras incidiram na consolidação e reparação das muralhas, incluindo a realização de nova taipa, que foi executada com um taipal ou com dois. Posteriormente, em toda a muralha foi efetuado um capeamento,

de forma a proteger e homogeneizar a taipa exposta. A taipa que foi utilizada na intervenção apresenta um traço de 3:3:2:2:1 de terra, agregados com dimensão inferior a 20mm, areia, cal e cimento, respetivamente (Canivell e Graciani 2014).

No que diz respeito ao reforço das zonas mais sensíveis foram colocados varões de aço inoxidável e blocos de pedra. No Castelo, torre de menagem e nas torres 7, 10 e 11 foram aplicados consolidantes e hidrófugos à base de silicato de etilo (Canivell e Graciani 2014).

2.4 Ensaios de caracterização de amostras de construções em terra

Procedeu-se a uma análise bibliográfica para recolha de caracterização material de construções com terra. Verifica-se que algumas amostras de construções em terra têm vindo a ser caracterizadas quer quanto às suas propriedades físicas, quer quanto às suas propriedades químicas. Alguns desses estudos e respetivos ensaios estão sumarizados nas Tabelas 2.1 e 2.2.

Verifica-se que os estudos realizados por outros autores a monumentos de taipa militar foram estudos essencialmente sobre aspetos históricos e arqueológicos, sendo que aspetos como a caracterização material e a análise a intervenções realizadas desde a sua construção são pouco aprofundados. Apenas algumas amostras de taipa militar foram analisadas no que diz respeito às propriedades químicas e mineralógicas.

No que diz respeito à taipa corrente, blocos de terra comprimida e argamassas de cal e terra, os resultados recolhidos dizem respeito apenas a ensaios de caracterização física e mecânica. Na Tabela 2.1 é igualmente apresentada a gama de resultados de alguns ensaios realizados pelos diversos autores, com alguns dos quais no capítulo 5 é efetuada uma comparação e discussão dos resultados.

Os resultados obtidos pelos diversos autores para a massa volúmica aparente, são semelhantes para amostras de taipa corrente ou amostras de blocos de terra comprimida, apresentando um valor mais elevado que as amostras de argamassas de terra e cal estudadas por outros autores. Quanto à resistência à compressão, as amostras de taipa corrente apresentam valores intermédios aos obtidos por argamassa de terra e cal e blocos de terra comprimida.

No que diz respeito aos ensaios de comportamento face à presença de água, verifica-se que as amostras de taipa corrente apresentam uma capacidade de absorção de água mais lenta em comparação com as amostras de argamassas de terra e cal.

Tabela 2.1 Ensaios de caracterização realizados por diversos autores em amostras de taipa, blocos de terra comprimida e argamassa de terra

Ensaio	Autor	Tipo de amostra	Gama de resultados
Massa volúmica aparente	Silva 2013	Taipa corrente	1840 – 2120 kg/m ³
	Gomes 2013	Taipa corrente	1694 – 2276 kg/m ³
	Faria et al. 2012	Taipa corrente	1846 – 2003 kg/m ³
	Ribeiro et al. 2016	Blocos de terra comprimida estabilizado com cimento	1880 kg/m ³
	Faria 2016	Argamassa de cal aérea com substituição parcial da massa de cal por terra em 5%, 10%, 25% e 50%.	1552 – 1597 kg/m ³
	Gomes et al. 2014a	Argamassa de terra com adição em massa de 5%, 10% e 15% de cal aérea.	1854 – 1880 kg/m ³
Dureza Superficial	Ferreira 2017a	Taipa corrente	48,52 – 56,28 Shore A
	Faria et al. 2014	Taipa corrente	71,5 ± 11,8 Shore A
Módulo de elasticidade dinâmico	Braga e Estevão 2012	Taipa corrente	256 N/mm ²
Absorção de água por capilaridade	Faria et al. 2012	Taipa corrente	0,9 – 6,39 kg/(m ² .min ^{1/2})
	Faria 2016	Argamassa de cal aérea com substituição parcial da massa de cal por terra em 5%, 10%, 25% e 50%.	3,24 – 4,42 kg/(m ² .min ^{1/2})
	Gomes et al. 2016	Argamassa de terra com adição em massa de 5%, 10% e 15% de cal aérea.	1,78 – 3,95 kg/(m ² .min ^{1/2})
Secagem	Faria 2016	Argamassa de cal aérea com substituição parcial da massa de cal por terra em 5%, 10%, 25% e 50%.	0,23 – 0,28 kg/m ² .h
	Gomes et al. 2018	Argamassa de terra com adição em massa de 5%, 10% e 15% de cal aérea.	0,13 – 0,14 kg/m ² .h
Resistência à compressão	Mateus et al. 2005	Taipa corrente	0,61 – 1,55 N/mm ²
	Braga e Estevão 2012	Taipa corrente	0,87 N/mm ²
	Ribeiro et al. 2016	Blocos de terra comprimida	1,38 N/mm ²
	Gomes et al. 2014b	Blocos de terra e blocos de terra comprimida	0,88 – 4,22 N/mm ²
	Faria 2016	Argamassa de cal aérea com substituição parcial da massa de cal por terra em 5%, 10%, 25% e 50%.	0,51 – 0,72 N/mm ²
	Gomes et al. 2018	Argamassa de terra com adição em massa de 5%, 10% e 15% de cal aérea.	0,11 – 0,28 N/mm ²
Resistência Superficial por esclerómetro pendular	Faria et al. 2014	Taipa corrente	87 ± 6 Vicker
Absorção de água a baixa pressão por tubos de Karsten (método vertical)	Faria et al. 2014	Taipa corrente	14,8 ± 0,8 mlr

Tabela 2.2 Ensaio de caracterização realizados por diversos autores em amostras de taipa militar

Ensaio	Autor	Tipo de amostra
Análise mineralógica	Cravo 1989	Taipa militar do Castelo de Silves
	Santos Silva 2001	Taipa militar do Castelo de Paderne
Análise térmica	Santos Silva 2001	Taipa militar do Castelo de Paderne
Determinação do resíduo insolúvel	Cravo 1989	Taipa militar do Castelo de Silves
	Santos Silva 2001	Taipa militar do Castelo de Paderne

3. Castelo de Paderne

3.1 Descrição geral

O Castelo de Paderne, um dos sete castelos presentes na bandeira portuguesa, localiza-se na freguesia de Paderne, concelho de Albufeira, no distrito de Faro e encontra-se presente na carta Militar nº 596, Algoz (Silves), Esc. 1/25 000 (Instituto Geográfico do Exército 1993e).

Com uma área de implementação de cerca de 3100 m² e um perímetro amuralhado de 230 m apresenta paredes de taipa militar com cerca de 2 m de espessura e 10 m de altura (Figura 3.1) (Quitério 2010).

O Castelo de Paderne corresponde a uma fortificação militar muçulmana do período Almóada. Erguido em meados do século XII, o Castelo de Paderne é um “hins” (designação árabe para uma estrutura defensiva), uma fortificação amuralhada de planta trapezoidal. Tem apenas uma porta em cotovelo - característica pouco comum deste período - e uma torre Albarrã. Corresponde a uma das mais importantes obras desta altura em Portugal.

Como qualquer construção histórica, ao longo das épocas foi sofrendo alterações, ampliações, sobreposições, entre outros. No recinto interior da fortificação encontra-se uma igreja, a Ermida de Nossa Senhora da Assunção, testemunho de ocupação cristã. Este é o único local da fortificação que apresenta revestimentos, ao invés da taipa exposta.

O castelo de Paderne foi classificado como imóvel de interesse público pelo DR n.º 516/71 de 22-11-1971, e à área envolvente foi atribuída a classificação de ZEP pela Portaria n.º 978/99, DR, II Série, n.º 215, de 14-09-1999. Anteriormente à delimitação ZEP, no ano de 1997, o Castelo de Paderne foi cedido ao Instituto Português de Património Arqueológico (IPPAR), órgão pertencente ao Ministério da Cultura.

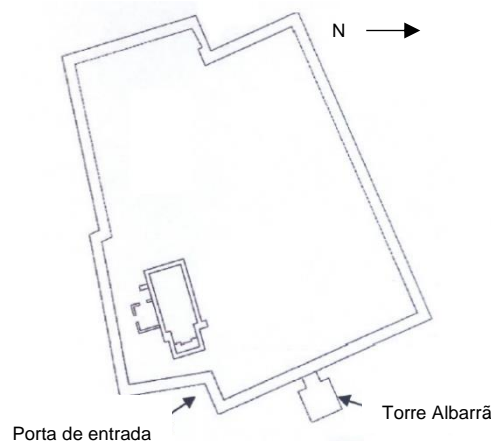


Figura 3.1 Planta esquemática do Castelo (adaptado de Santos Silva 2001)

A ermida que se encontra no interior do recinto (Figura 3.2), foi erguida posteriormente ao recinto fortificado. Denominada por Ermida de Nossa Senhora da Assunção, ou Ermida de Nossa Senhora do Castelo, apresenta uma forma quadrangular com uma altura de 2,42 m. É constituída por uma capela-mor com paredes de alvenaria e cobertura abobadada, um arco de cruzeiro redondo, igualmente de alvenaria, tem dois alta-

res laterais com imagens religiosas e duas portas (Ramalho 2014). Trata-se de uma construção em alvenaria de pedra irregular com juntas preenchidas de argamassa de terra e cal; em algumas zonas é visível a utilização de revestimentos de adorno ou proteção no interior (Santos Silva 2001).



Figura 3.2 Ermida de Nossa Senhora da Assunção em 2007 (Ramalho 2014)

A estrutura amuralhada é constituída por taipa militar e embasamento de pedra com 1,90 m de largura e uma espessura de paredes de 2,00 m; os taipais utilizados na sua construção mediam sensivelmente 2,64 m (Margalha et. al 2002). As muralhas apresentam de forma bem visível as concavidades das agulhas de madeira utilizadas na construção de taipa original, que permitem assim verificar a métrica dos taipais utilizados.

A fortificação apresenta apenas uma torre, o que, tal como descrito anteriormente, é uma característica pouco comum na época. Prende-se com o facto de a fortificação estar implantada no topo de uma colina de difícil acesso, sendo que o único ponto de entrada seria a este, onde a torre se encontra. A torre presente na fortificação é de taipa militar e embasamento de pedra, tal como as muralhas. Apresenta uma forma quadrangular com dimensões de 5,84 m por 5,70 m e uma altura de 9,30 m, estando ligada às muralhas por um passadiço de taipa em forma de arco (Catarino e Inácio 2006), e o seu embasamento é em pedra (Figura 3.3). A torre não tem acesso ao interior, sendo construída sobre um bloco maciço de pedra. Em algumas zonas do exterior da torre é visível um barramento à base de cal que, ao longe, simulava silhares de pedra.

Toda a taipa empregue na fortificação apresenta duas tonalidades diferentes: uma mais clara em menor quantidade e uma outra de tonalidade mais acastanhada (Santos Silva 2001). A taipa apresenta delimitações para criar a ilusão de silhares de pedra e, desta forma, desincentivar o ataque dos oponentes.

O Castelo de Paderne é um dos castelos mais importantes do período de domínio muçulmano na península ibérica e que em melhor estado de preservação se conseguiu conservar (Quitério 2010). Mesmo após o abandono que sofreu a partir do século XVI e as intervenções a que foi sujeito, os processos construtivos que foram utilizados e as métricas respetivas conseguem ainda observar-se.



Figura 3.3 Arco que une a torre às muralhas

Atualmente, é possível visitar o Castelo de Paderne pelo seu exterior, havendo várias empresas de turismo que organizam visitas guiadas. O interior do recinto fortificado é apenas aberto uma vez por semana para visitantes com acompanhamento de um guarda.

3.2 Cronologia das intervenções

Tal como em todas as construções, existem anomalias associadas, e o caso das construções em taipa militar não é exceção, sendo que os principais agentes de deterioração são os atmosféricos, como a água das chuvas e o vento com partículas em suspensão. A deterioração destas construções ocorre principalmente nas bases, onde a água se infiltra por ascensão capilar, e nos topos onde a ação da chuva é mais significativa. Junto à base há também mais partículas em suspensão no ar, erodindo essa zona da parede, e salpicos da chuva que embatem no chão e daí na superfície.

Apesar da preocupação de utilização de materiais e técnicas de forma a obter uma durabilidade maior, a fortificação sofreu algumas degradações e até em alguns casos desmoronamentos, associadas ao envelhecimento natural, ao abandono e à falta de reparações a que a construção esteve sujeita.

Para que os processos de degradação sejam minorados e de forma a manter o património arquitetónico foi necessária a realização de um conjunto de intervenções. Algumas intervenções realizadas até aos dias de hoje apresentaram benefícios, outras nem tanto. Quando as intervenções efetuadas não são as mais indicadas, o processo de degradação pode ser ainda mais acelerado devido à incompatibilidade de matérias ou técnicas.

As intervenções levadas a cabo foram essencialmente as mesmas que foram efetuadas noutras fortificações do mesmo período, sempre tendo em conta que os materiais e técnicas utilizadas nunca roubaram a identidade do monumento. Estas intervenções consistiram essencialmente na remoção e limpeza de vegetação envolvente, reforço de fundações e de zonas em piores condições e o desmonte com posterior realização de troços de muralha inexistentes.

Estão documentadas cinco grandes intervenções levadas a cabo pelos organismos responsáveis pelo monumento, designadamente no século XX (não datada), em 1986, 2004/05, 2007 e 2017/18. Sabe-se, no entanto, que a fortificação sofreu outras intervenções no início do século XX.

3.2.1 Intervenção no século XX não datada

Durante o século XX, e apesar das intervenções estarem pouco documentadas, por informação transmitida oralmente sabe-se que foram introduzidas argamassas de cimento Portland em algumas zonas da muralha para preenchimento de lacunas, nomeadamente no refechamento de juntas. Por comparação de intervenções realizadas em outras fortificações durante o período do Estado Novo, depreende-se que esta fortificação não foi objeto da intervenção correntemente efetuada nesse período.

3.2.2 Intervenção em 1986

Em 1971 a classificação do castelo de Paderne como imóvel de interesse público fez com que a DGEMN avançasse com as obras de conservação e de reconstrução de algumas zonas das muralhas de taipa, da torre e do arco que se encontra à entrada da fortificação.

Em algumas zonas da torre Albarrã é referido que foram realizadas consolidações com silicato de etilo. O silicato de etilo corresponde a um consolidante utilizado para consolidação de materiais de grande absorção, até mesmo pedra. Corresponde a um produto hidrófugo que sela as juntas e poros existentes nos materiais utilizados na construção. Embora não se saiba exatamente onde foi aplicado, admite-se que a sua aplicação poderá justificar o mau estado de conservação de algumas zonas da torre.

3.2.3 Intervenção em 2004/05

A intervenção que teve início em 2004 foi levada a cabo pela empresa STAP, com direção de obra do Engenheiro José Paulo Costa e assessoria do Arquiteto Manuel Lopez Vicente, responsável por outras obras de conservação e reparação em outras fortificações da altura. Esta intervenção incidiu essencialmente nas muralhas Almóadas do Castelo. A obra de conservação das muralhas de taipa teve uma duração total de 12 meses, de julho de 2004 a julho de 2005, segundo projeto colocado a concurso pelo IPPAR.

Para a realização das obras de conservação da muralha foram efetuados diversos ensaios de caracterização do recinto fortificado, ensaios laboratoriais de caracterização de amostras de argamassa e de taipa levados a cabo pelo LNEC (Santos Silva 2001) e ensaios de caracterização geológica e geotécnica dos solos de fundação.

As muralhas do Castelo foram em algumas zonas reconstruídas de raiz (caso de troço da muralha orientada a Sul), tendo sido refeito o embasamento de pedra e realizados novos blocos de taipa. As lacunas existentes nas bases de algumas zonas das muralhas (grande perda de espessura, nomeadamente na base da muralha exposta a Nascente) foram preenchidas por terra projetada por serem consideradas zonas de difícil apiloamento.

Para a execução dos novos blocos de taipa foram estudadas diversas misturas até à obtenção das que se considerou ter a melhor dosagem de terra local (incluindo já fração fina e os seus agregados naturais), gravilha, areia e pasta (terra e cal), para que os novos blocos apresentassem características semelhantes à taipa existente, não só mecânicas, mas também visuais. Para tal foram realizados provetes de diversas dosagens até ser obtida uma taipa com as características e cor consideradas otimizadas (Quitério 2010).

Os blocos de taipa foram refeitos tendo em atenção as técnicas que se considerou terem sido usadas na altura da sua construção, embora com algumas adaptações do processo construtivo. Ao invés da utilização de agulhas de madeira utilizaram-se varões roscados para servir de aperto aos taipais de madeira. Em termos construtivos o processo passou pela abertura dos negativos para a introdução das agulhas que serviram de suporte aos taipais subsequentes. Após a colocação dos taipais sobre as agulhas e consequente aparafusamento, foram então colocados os varões roscados sempre envoltos em pedras, para que a sua retirada após a finalização do bloco de taipa fosse facilitada. Após a realização de toda a cofragem foi introduzida a mistura à base de terra, húmida, dentro dos taipais em camadas com cerca de 12 cm de altura, que após compactação constituíram camadas sucessivas com cerca de metade desta altura (Pifano 2005).

Passados 14-15 anos verifica-se que os blocos de taipa nova se distinguem claramente dos originais, apresentando um bom estado de conservação, tal como é recomendado a nível internacional para intervenções em património histórico, mas não de forma chocante. As escorrências de elementos superiores das muralhas e a degradação natural que têm sofrido também contribuíram para a sua boa integração (Cotrim et al. 2018) (Figura 3.4).

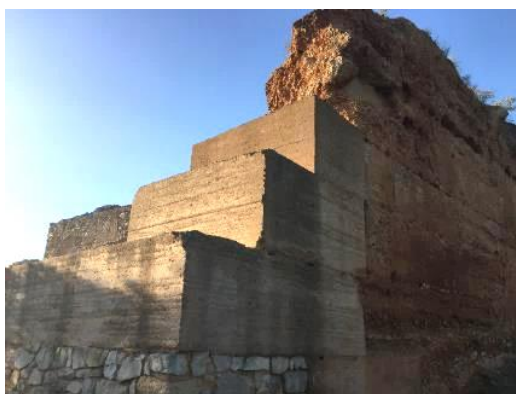


Figura 3.4 Blocos de taipa efetuados nas obras de conservação de 2004/05, observados em 2018

Na zona da base das muralhas de taipa militar que apresentava perda de espessura foi feita a remoção do material com falta de coesão e, em seguida, foi feita a reposição do material em falta por um processo de projeção. A terra projetada foi executada com uma mistura à base de terra semelhante à da taipa nova (obviamente sem agregados grossos), mas aplicada com muito mais água e sem compactação. A técnica consistiu na projeção sobre o elemento vertical da mistura à base de terra com o auxílio de um equipamento dotado de duas câmaras pressurizadas. A mistura com terra foi propulsionada com a ajuda de ar comprimido e água adicionada na pistola de projeção. Todo este processo de projeção foi realizado com velocidades bastante elevadas, na ordem dos 300 km/h (Cóias e Costa 2004). No total foram realizados 20,6 m³ de projeção (Pifano 2005).

Atualmente é notória a perda de espessura por falta de coesão e a falta de material nas zonas reparadas em 2004/2005 pela técnica da projeção de terra (Cotrim et al. 2018) (Figura 3.5). São também observadas armaduras de aço inoxidável liso com cerca de 10 mm de diâmetro, que se encontram à vista nalgumas áreas dessa zona, e que se supõe terem sido colocadas na fase de execução destes trabalhos (Figura 3.6). Estas armaduras apresentam corrosão em alguns troços que aparentam corresponder a zonas de

soldadura, que pode ser devida a essa mesma soldadura (material usado não adequado para aço inoxidável ou temperatura atingida que deteriorou esse aço).

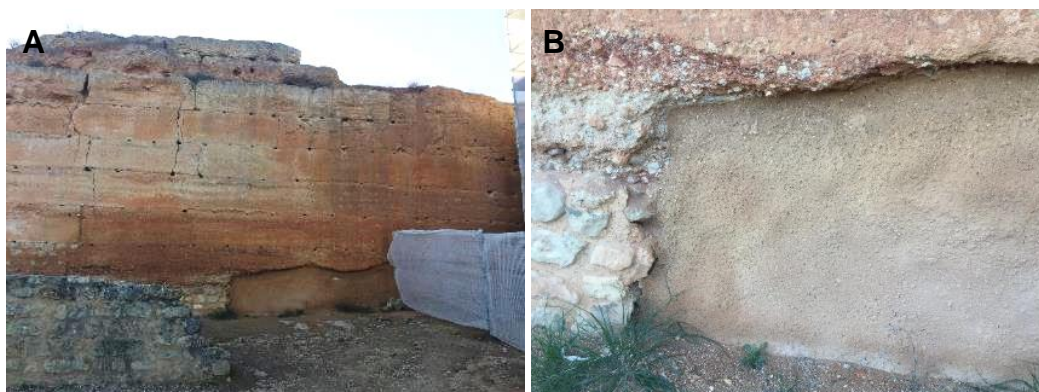


Figura 3.5 Estado em 2018 da muralha Nascente reparada por terra projetada em 2004/0: A - vista geral; B – pormenor (Cotrim et al. 2018)



Figura 3.6 Armaduras de aço inox liso expostas após degradação em zona de terra projetada

3.2.4 Intervenção em 2007

De acordo com informação transmitida oralmente, no decorrer da intervenção de 2004/2005, a Direção Regional de Cultura do Algarve (DRCAIlg) chegou à conclusão de que os cunhais da muralha não se encontravam estáveis, principalmente os cunhais de Noroeste e Nordeste (Figura 3.7). Assim, em 2007 foi feita uma intervenção na tentativa da estabilização desses cunhais, com base no projeto de intervenção elaborado em 2004. A empresa responsável por esta intervenção foi a STAP. Com um prazo previsto de 2 meses, a obra decorreu de janeiro a abril de 2007.

Para o reforço dos cunhais foi referido no projeto que seriam aplicadas pregagens de aço inoxidável AISI 304, com diâmetro de 20 mm, ou varões nervurados laminados a quente, de diâmetro 32 mm, selados com injeção com calda de cal hidráulica, cal aérea, cimento branco e água, com um traço em massa de 1:1,1:5:3.

Não havendo informação relativa à composição da taipa nova de 2004/05 e em virtude das taipas realizadas nestas duas intervenções apresentarem aspeto semelhante, admite-se que foi utilizada a mesma composição.



Figura 3.7 Cunhal Nordeste da muralha

3.2.5 Intervenção em 2017/18

A intervenção que decorreu entre 2017 e 2018 centrou-se na conservação da torre Albarrã, que já tinha sido alvo de intervenção no ano de 1986. A obra foi executada pela empresa In Situ, sendo o projeto da autoria do Arquiteto Manuel Lopez Vicente, que na intervenção de 2004 assessorou as obras do IPPAR. Neste sentido, a DRCAIlg, o Município de Albufeira e a Fundação Millennium BCP fizeram uma parceria para que a intervenção fosse possível.

A intervenção teve como principal foco solucionar o problema da perda de espessura na torre Albarrã, essa perda de espessura deveu-se essencialmente a envelhecimento natural por exposição a fenómenos atmosféricos. O conjunto de trabalhos a realizar incluiu a demolição, limpeza da alvenaria que constitui o embasamento exterior, reparação de juntas, reparação da taipa danificada, realização de uma cobertura na torre e consolidação exterior.

O processo de demolição consistiu na eliminação de argamassas de intervenções anteriores e remoção de zonas mais degradadas da taipa ou do embasamento em pedra; com a limpeza da alvenaria exterior efetuou-se simultaneamente a reparação das juntas na alvenaria de pedra da ponte que liga a torre às muralhas.

Realizaram-se troços de taipa nova contra a taipa militar existente, e efetuou-se o preenchimento de lacunas com argamassas de reparação. Em zonas com grande perda de espessura e, principalmente, em cunhais foi feito o reforço com armaduras de aço inoxidável nervurado com diâmetro de cerca de 10 mm. A taipa existente foi “limpa” de forma a eliminar material desagregado e a criar banquetas para a produção da taipa nova. Os varões de aço inox nervurados foram fixados à taipa existente através de bucha química (Figura 3.8). Não se teve acesso à profundidade dessa bucha. A função destes varões não aparenta ser de reforço estrutural; apenas ajudam na sustentação da nova taipa.

Os taipais utilizados para a realização da nova taipa apresentam 2,5 m de largura e 0,8 a 0,9 m de altura, e são constituídos por tábuas de madeira com 2,5 cm de espessura. De um modo geral só foram aplicados taipais exteriores uma vez que a taipa nova foi realizada contra a taipa existente. A compactação foi realizada manualmente, segundo informação transmitida oralmente



Figura 3.8 Pormenor da utilização de varões de aço inox nervurados aplicados com bucha química para reforço da taipa nova a realizar em cunhal da torre, após preparação da taipa original (Cotrim et al. 2018)

O projeto inicial da torre encontrava-se pouco detalhado ao nível da composição da mistura de terra a utilizar para a colmatação de lacunas de taipa existentes na torre. Por isso, a empresa In Situ teve necessidade de proceder à execução de amostras de taipa com diferentes terras e estabilizações (Figura 3.9), para seleção da mistura de materiais a utilizar na taipa nova a executar, que deveria ser semelhante e compatível com a taipa militar antiga existente. Chegando-se a uma composição em volume diferente consoante a dimensão das lacunas, estando esta composição detalhada na Tabela 3.1. De informação recolhida na DRCAIg no total terem sido demolidos/retirados cerca de 50 m³ de taipa da torre. A curva granulométrica da terra detritica encontra-se no Anexo A.

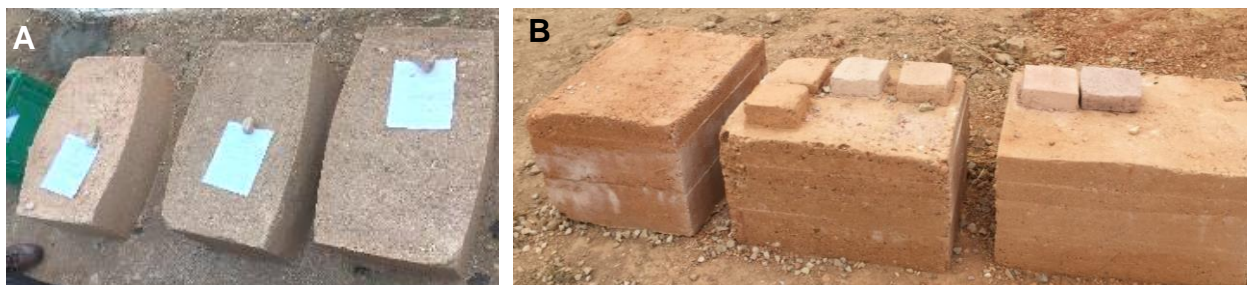


Figura 3.9 Provetes de taipa realizados na obra destinados à seleção da melhor dosagem a aplicar: fase 1 (A); fase 2 (B) – dosagem do provete da esquerda foi a escolhida

Tabela 3.1 Composição em volume utilizada na intervenção de 2017/18

Composição em volume	Cal aérea	Cal hidráulica	finos (terra detritica)	terra detritica	areia	gravelha	brita 1	brita 2
Taipa - Lacunas de grande dimensões	2	1	1	4	4	3	2	1
Argamassa - Lacunas de pequenas dimensões	1	-	-	1	2	-	-	-

O tratamento do topo da torre foi efetuado com recurso a uma argamassa de capeamento com ligeira pendente para o interior, o topo da torre apresenta uma caleira, que apresenta o mesmo material que o pavimento. A caleira drena a água através de gárgulas de aço corten, dispostas no paramento Norte da

torre (Figura 3.10). O aço corten utilizado é um aço bastante antigo e com a oxidação já muito estabilizada, no qual foi aplicado um produto selante para evitar escorrências.



Figura 3.10 Alçado Nascente da torre observando-se a taipa antiga (em baixo) e nova (em cima) com “janela” de taipa antiga; vista das gárgulas de drenagem da cobertura na fachada Norte

As obras efetuadas na torre, em termos visuais encontram-se bem enquadradas na restante fortificação, sendo visíveis, como é aceite a nível internacional para intervenções em património histórico, mas não de forma chocante (Figura 3.11).

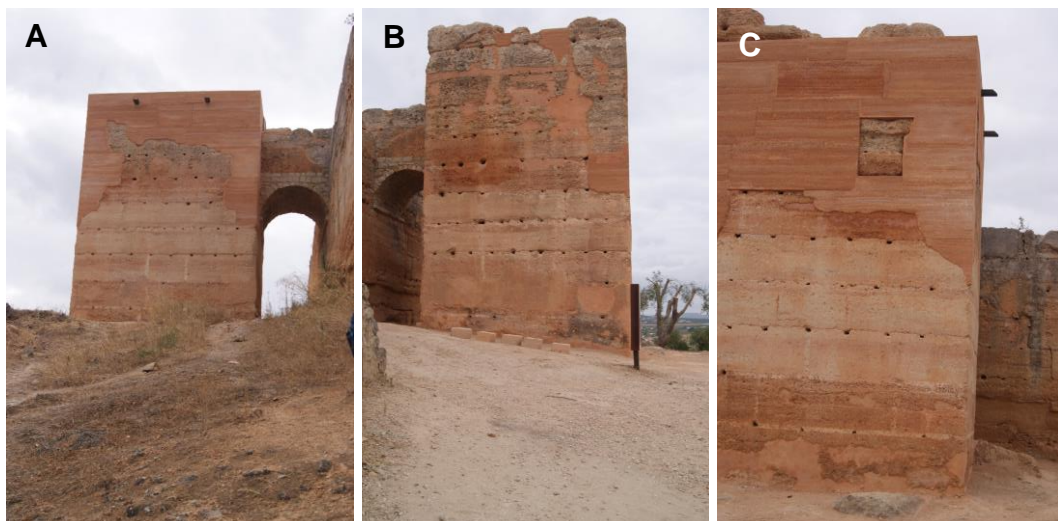


Figura 3.11 Torre Albarã após intervenção de 2018: A – alçado Norte com taipa nova; B – alçado Sul com argamassa de preenchimento de lacunas; C – alçado Nascente

4. Campanha Experimental

De modo a que fosse possível caracterizar qualitativamente e quantitativamente a taipa utilizada no Castelo de Paderne, quer na sua construção, quer nas intervenções realizadas após esse período, foram recolhidas amostras e realizados um conjunto de ensaios laboratoriais e *in situ*. Além disto, os ensaios realizados são utilizados ainda para comparar com os resultados dos ensaios obtidos por outros autores em fortificações do mesmo período. No presente capítulo são em primeiro lugar descritas as amostras do ponto de vista de localização e sua extração e, em seguida, são apresentados todos os procedimentos experimentais adotados durante a campanha experimental realizada. A campanha experimental foi realizada em simultâneo no Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade NOVA de Lisboa (DEC – FCT NOVA) e no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC). Além da campanha experimental laboratorial foram realizados ensaios *in situ* no Castelo de Paderne.

4.1 Localização e descrição das amostras

Foram recolhidas (algumas anteriormente) e analisadas dez amostras do castelo de Paderne, quatro das quais fazem parte da torre, quatro correspondem a amostras da ermida e as restantes duas correspondem a amostras das muralhas. As designações das amostras recolhidas, atribuídas pelo LNEC no âmbito do projeto DB-Heritage, estão apresentadas na tabela que se segue, em que se indica o ano de recolha e respetiva localização no recinto fortificado (Tabela 4.1).

Tabela 4.1 Amostras analisadas na campanha experimental laboratorial

Designação	Ano	Tipo e localização	Dimensão [mm]
AM1	2000	Argamassa de revestimento da ermida	61x45
AM2		Argamassa de revestimento da ermida	37x48
AM4		Argamassa de assentamento de alvenaria, pertencente à ermida	77x68
AM6		Argamassa de assentamento de alvenaria, pertencente à ermida	74x65
AM10		Bloco solto de taipa da muralha noroeste	96x117
AM11		Bloco solto de taipa da muralha noroeste	173x113
CP2018A	2018	Taipa do cunhal nordeste - nível do primeiro taipal da base da torre	70x37
CP2018B		Taipa do corpo da torre - zona da faixa central que apresenta uma tonalidade mais avermelhada na fachada Nascente, é a zona da torre que visualmente apresenta uma maior degradação	210x120
CP2018C		Taipa do cunhal nordeste - nível central da torre, zona de tonalidade mais amarelada; a nível visual apresenta uma menor degradação	123x140
CP2018D		Taipa do topo da torre ao nível da cobertura	315x203

Nota: São apresentadas as duas maiores dimensões de cada amostra

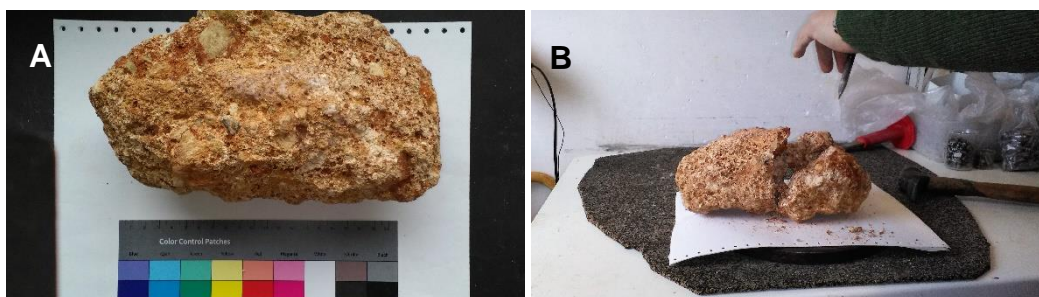


Figura 4.1 Separação das amostras para os ensaios: A - Identificação e catalogação da amostra; B – separação de fragmentos para os diversos ensaios

Na Tabela 4.2 encontram-se os ensaios realizados e as amostras que foram analisadas em cada ensaio, quer físicos quer químicos.

Tabela 4.2 Amostras sujeitas a ensaios químicos e físicos

Ensaio	Amostras
Análise mineralógica por difração de raios X	CP2018A; CP2018B; CP2018C; CP2018D
Análise termogravimétrica e térmica diferencial	CP2018A; CP2018B; CP2018C; CP2018D
Determinação do resíduo insolúvel	CP2018A; CP2018B; CP2018C; CP2018D
Análise granulométrica do agregado por ataque de ácido	CP2018A; CP2018B; CP2018C; CP2018D
Observação à lupa binocular	CP2018A; CP2018B; CP2018C; CP2018D; AM1; AM2; AM10; AM11
Observação ao microscópio petrográfico	CP2018A; CP2018B; CP2018C; CP2018D; AM1; AM2; AM10; AM11
Observação ao microscópio eletrónico de varrimento com microanálise de raios X	CP2018A; CP2018B; CP2018C; CP2018D; AM1; AM2; AM10; AM11
Massa volúmica aparente	CP2018B; CP2018C; CP2018D; AM4; AM6; AM10; AM11
Dureza superficial	CP2018B; CP2018C; CP2018D; AM4; AM6; AM10; AM11
Módulo de elasticidade dinâmico	CP2018B; CP2018C; CP2018D; AM10; AM11
Abrasão a seco	CP2018B; CP2018C; CP2018D
Resistência à compressão	CP2018D; AM10; AM11
Erosão por gotejamento	CP2018B; CP2018C; CP2018D; AM10; AM11
Absorção de água a baixa pressão por tubos de Karsten	CP2018B; CP2018C; CP2018D; AM4; AM6; AM10; AM11
Absorção de água por capilaridade	CP2018B; CP2018C; CP2018D; AM10; AM11
Secagem	CP2018B; CP2018C; CP2018D; AM10; AM11

Os ensaios *in situ* foram realizados nos locais sinalizados na Figura 4.2 e nos materiais assinalados na Tabela 4.3. Na Figura 4.2 a localização do ensaio de tubos de Karsten encontra-se identificado a vermelho e a do ensaio de velocidade de propagação de ultrassons encontra-se identificado a azul. Não se encontram identificados os locais de ensaio de resistência superficial por esclerómetro pendular pois neste caso o ensaio foi efetuado ao redor de toda a fortificação. Foi ainda ensaiado um provete de taipa militar, com dimensões aproximadas de 50 cm de altura por 50 cm de largura e 75 cm de comprimento, e que serviu como teste para a seleção da composição de taipa a utilizar na intervenção de 2018 na torre Albarrã. Este provete estava colocado no exterior da muralha, perto da torre Albarrã, e encontra-se identificado por P.

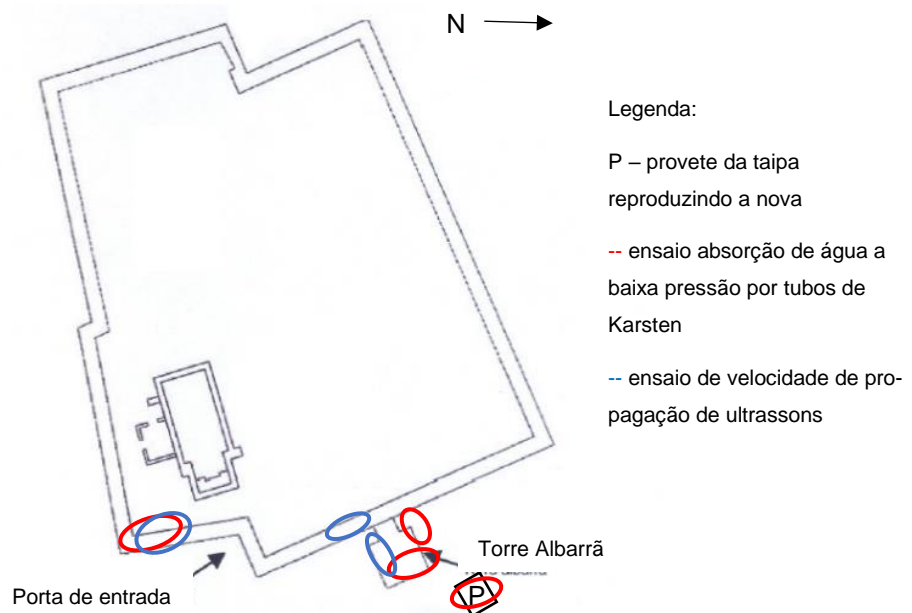


Figura 4.2 Localização dos ensaios realizados *in situ*

Nas Figuras 4.3 – 4.4 apresentam-se os alçados das zonas da muralha e torre onde se efetuaram os ensaios de absorção de água a baixa pressão por tubos de Karsten e velocidade de propagação de ultrassons, respetivamente. Para a realização dos ensaios registaram-se as condições de temperatura e humidade relativa de 25 ± 2 °C e 60 ± 5 % HR.

4.2 Procedimentos adotados na campanha experimental – ensaios de caracterização química e mineralógica

Os procedimentos adotados para cada ensaio são descritos em seguida, bem como as amostras que foram sujeitas a esses mesmos ensaios.

Para a realização dos ensaios de caracterização química e mineralógica foi necessária uma preparação prévia das amostras a ensaiar, que consistiu na separação das amostras em diversas frações (fração fina, fração global e amostra desagregada).

Para a preparação de cerca de 100 g de amostra desagregada utilizou-se com cuidado um martelo de borracha para, na separação da amostra, nunca se partir os agregados mais grosseiros ou as partículas de areia. Após a desagregação da amostra esta foi esquartejada para assim ser possível a separação dos 100 g pretendidos (Figura 4.5).

Tabela 4.3 Ensaio realizados in situ - descrição e localização das zonas ensaiadas

Ensaio	Localização	Orientação	Materiais
Resistência superficial por esclerômetro pendular	Muralha	Norte, Sul, Nascente e Poente	Taipa original
	Muralha	Norte, Sul, Nascente e Poente	Blocos de taipa da intervenção de 2004
	Torre	Norte, Sul, Nascente e Poente	Taipa original
	Torre	Norte, Sul e Nascente	Argamassa de reparação de 2018
	Torre	Sul	Blocos de taipa da intervenção de 2018
	Torre	Norte, Sul, Nascente e Poente	Taipa original
	Provete	Norte, Sul, Nascente e Poente	Taipa utilizada na torre na intervenção de 2018
Velocidade de propagação de ultrassons	Muralha	Nascente	Taipa original
	Muralha	Nascente	Blocos de taipa da intervenção de 2004
	Muralha	Nascente	Terra projetada na intervenção de 2004
	Torre	Sul	Taipa original
	Torre	Sul	Blocos de taipa da intervenção de 2018
Absorção de água a baixa pressão por tubos de Karsten	Muralha	Nascente	Taipa original
	Muralha	Nascente	Blocos de taipa da intervenção de 2004
	Torre	Nascente	Taipa original
	Torre	Norte	Argamassa de reparação de 2018
	Provete	Nascente	Taipa utilizada na torre na intervenção de 2018

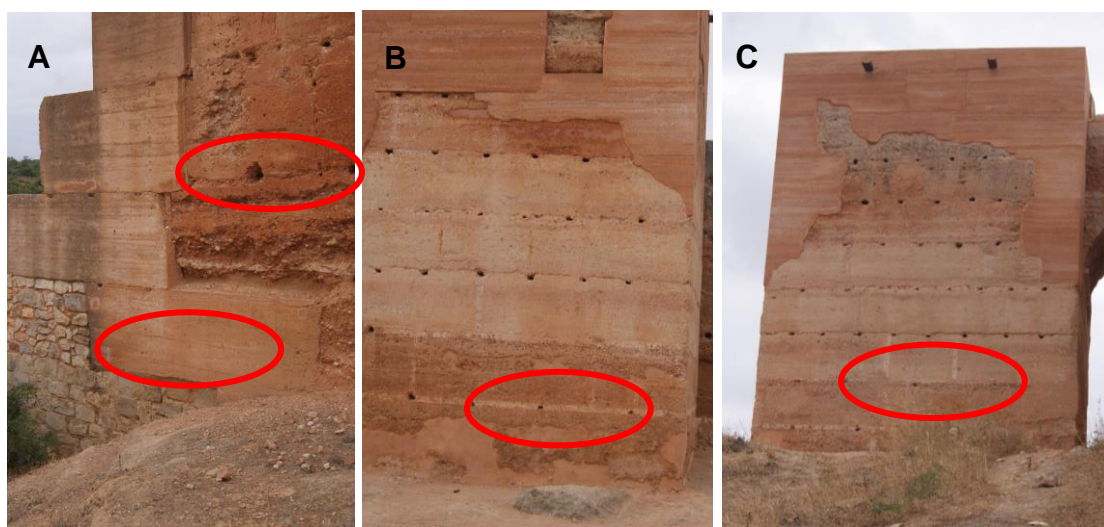


Figura 4.3 Localização do ensaio de absorção de água a baixa pressão por tubos de Karsten: A – muralha; B – torre Nascente; C – torre Norte

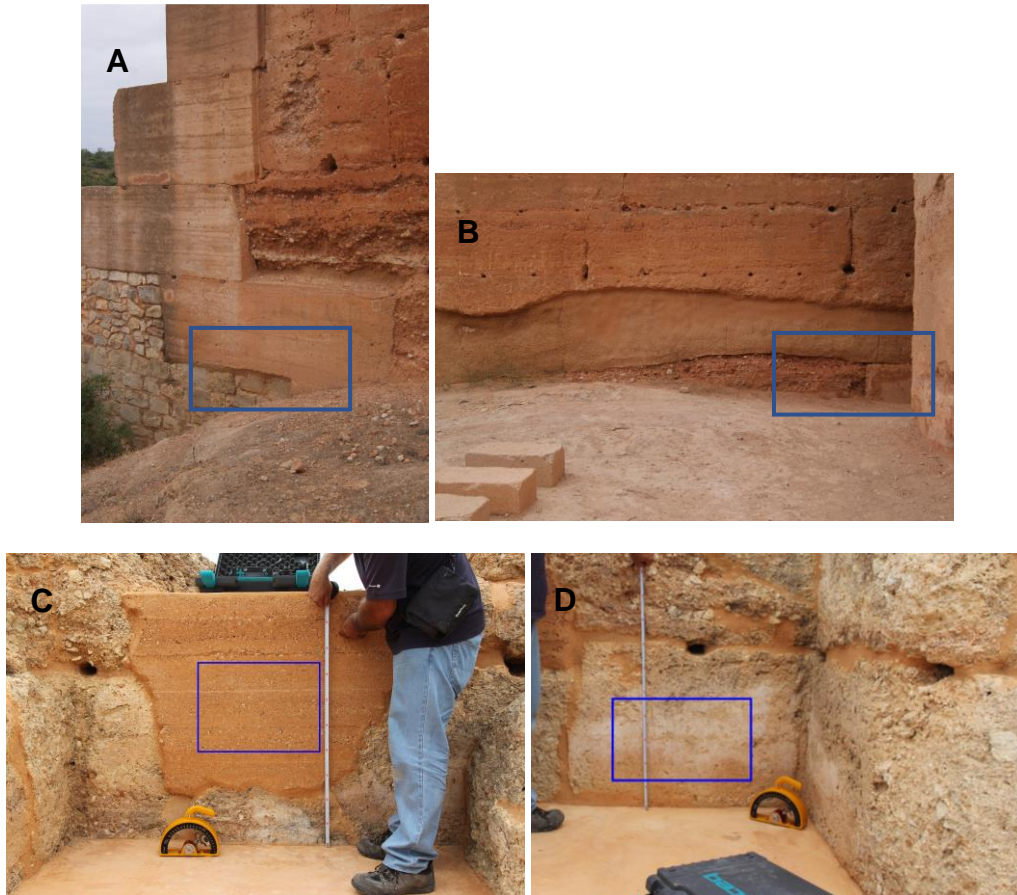


Figura 4.4 Localização do ensaio de velocidade de propagação de ultrassons: A – muralha; B – muralha; C – torre; D – torre



Figura 4.5 Preparação da amostra desagregada: A - desagregação com martelo de borracha; B – esquartelamento

A amostra desagregada foi utilizada para os ensaios de granulometria e para a realização da análise química.

Após a preparação da amostra desagregada iniciou-se a preparação da amostra da fração fina: separou-se um total de 2 g de cada amostra através de um peneiro com uma malha de 106 μm (Figura 4.6). A fração fina corresponde a uma toma da amostra mais concentrada na pasta do aglutinante e destina-se ao estudo mais aprofundado dos componentes dessa pasta.

Por último preparou-se um total de 5 g de amostra global, isto é, uma porção representativa da amostra integral que foi moída para os ensaios de difração de raios X e de análise térmica.



Figura 4.6 Preparação da fração fina: A - peneiro 106 μm ; B- amostra por peneirar; C-fração fina

A preparação da amostra global consistiu na moagem de 5 g da amostra com o auxílio de um almofariz e de um pilão, para que posteriormente a amostra fosse peneirada no peneiro de malha 106 μm . Sempre que sobrou material no peneiro o processo repetiu-se até que toda a amostra estivesse reduzida a uma dimensão inferior à malha (Figura 4.7)

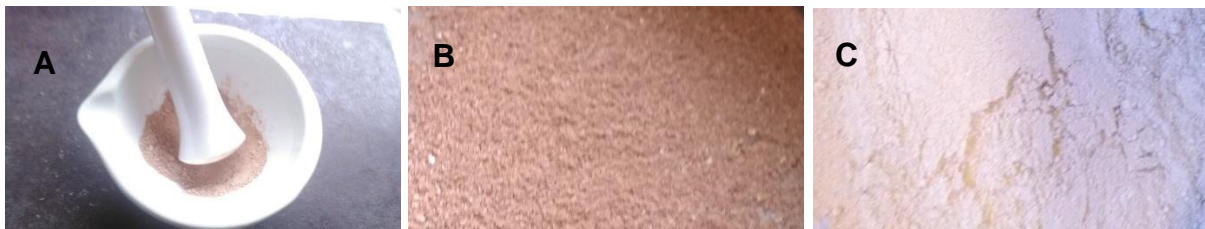


Figura 4.7 Preparação da fração global: A - moagem com auxílio de almofariz e pilão; B- amostra que ficou retida no peneiro; C- fração global

4.2.1 Observação à lupa binocular

Uma vez que se verificou que algumas das amostras apresentavam várias camadas procedeu-se à análise estratigráfica por microscopia ótica (lupa binocular). Assim, de cada amostra selecionou-se um provete que foi impregnado com uma resina epóxi (Figura 4.8) em câmara de vácuo (Logitech IU30), para que todo o espaço poroso ficasse preenchido (Figura 4.9A). As amostras para impregnação foram colocadas em recipientes de silicone (Figura 4.9B).



Figura 4.8 – Componentes para preparação da resina epóxi para a impregnação das amostras

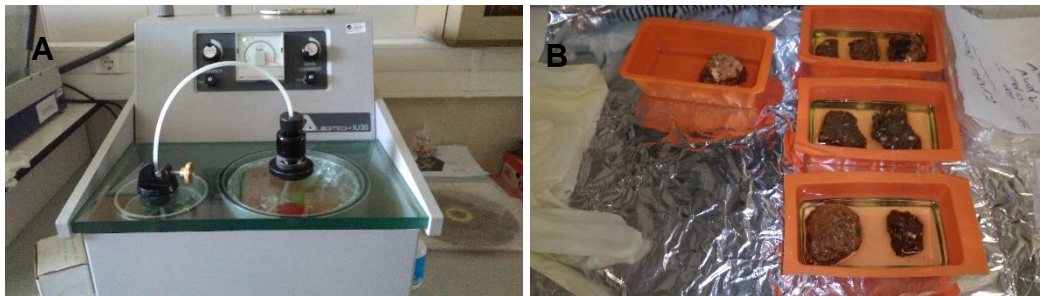


Figura 4.9 - Impregnação das amostras: A - equipamento para a impregnação sob vácuo; B - recipientes com as amostras após impregnação

Após a impregnação e endurecimento da resina à temperatura ambiente nesses recipientes, efetuou-se o corte da resina para separação das amostras numa máquina de corte (Logitech CS10). De seguida efetuou-se um corte de precisão (Buehler Isomet 4000) no sentido transversal à superfície externa, para a obtenção duma superfície plana (Figura 4.10). Esta superfície foi depois reimpregnada, seguindo-se o polimento com abrasivos específicos numa máquina de polimento (Logitech PM5) com óxido de alumínio de 15 e 9 μm , e depois numa polidora Struers LaboPol-35 com um fluido oleoso de diamante em suspensão de (6, 3, 1 e 0,25 μm) até à obtenção de uma superfície plana e polida.

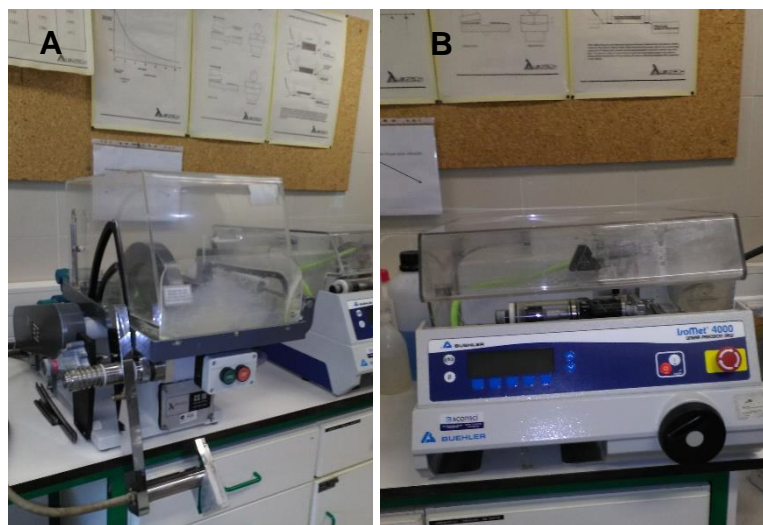


Figura 4.10 - Equipamentos para o corte de amostras: A – Logitech CS10; B – Buehler Isomet 4000

As amostras foram observadas à vista desarmada e numa lupa binocular (Olympus SZH10) (Figura 4.11) para discrição de diversos detalhes, tais como: número e espessura das camadas; cor da matriz e dos agregados; granulometria do agregado; tipo de grão do agregado; adições na matriz (tijolo, carvão, entre outros); e estado de conservação (ataque biológico, falta de aderência, falta de coesão, fissuras, entre outros).



Figura 4.11 Observação à lupa binocular Olympus SZH10

4.2.2 Observação ao microscópio petrográfico

A petrografia estuda as características estruturais, mineralógicas e químicas de materiais pétreos, bem como de materiais artificiais como as argamassas e betões. Neste trabalho utilizou-se um microscópio petrográfico de luz polarizada em modo de transmissão (Olympus BX60) (Figura 4.12), que é dotado de uma platina rotativa e de dois filtros polarizadores, ou nicóis. As visualizações ao microscópio petrográfico podem apresentar-se com nicóis cruzados ou nicóis paralelos (Figura 4.13).

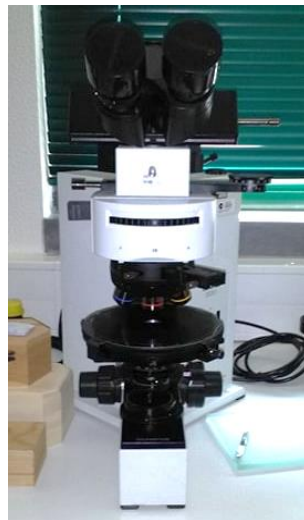


Figura 4.12 Observação ao microscópio petrográfico Olympus BX60

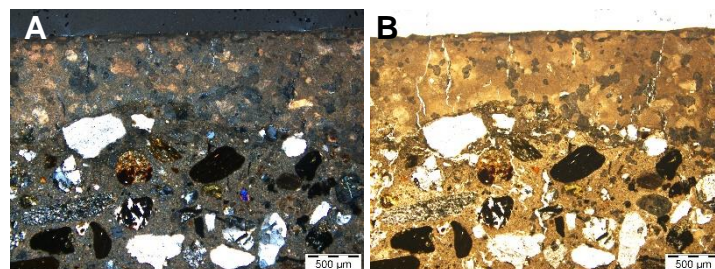


Figura 4.13 Imagens observadas ao microscópio petrográfico: A - nicóis cruzados; B - nicóis paralelos

Para esta análise prepararam-se lâminas delgadas, a partir das amostras anteriormente impregnadas (secção 4.2.1), para observação em luz transmitida. A preparação das lâminas iniciou-se com o corte de uma fatia com cerca de 5 mm de espessura da amostra impregnada e que foi depois novamente impregnada. Após a secagem, procedeu-se ao polimento da superfície com óxido de alumínio de 15 e 9 μm a fim de ser colada a uma lâmina de vidro de espessura conhecida. De referir que uma das superfícies das lâminas de vidro foi previamente desbastada até se obter a espessura desejada para a lâmina. Após a colagem da amostra à lâmina, durante sensivelmente 12 horas com o auxílio duma pequena prensa, procedeu-se a um novo corte para se obter uma espessura de amostra de cerca de 200 μm . Seguidamente procedeu-se ao desbaste numa polidora mecânica (Logitech PM5) com abrasivo de óxido de alumínio de 15 e 9 μm para obtenção de uma espessura final de amostra cerca de 30 μm . Esta preparação foi finalizada com o polimento numa máquina Struers LaboPol-35 usando um fluído oleoso de diamante em suspensão de 6, 3, 1 e 0,25 μm até à obtenção de uma lâmina delgada polida, à semelhança do efetuado para observação à lupa binocular.

4.2.3 Observação ao microscópio eletrónico de varrimento com microanálise de raios X

A observação ao microscópio eletrónico de varrimento (MEV) com microanálise de raios X (EDS) de amostras de matrizes visa o estudo da microtextura, porosidade e microfissuração e a análise de substâncias neoformadas. Apresenta como grande vantagem o estudo da composição química do ligante e dos agregados, a estratigrafia dos revestimentos, a deteção de compostos de neoformação e de degradação, estes por vezes em quantidades vestigiais, possibilitando assim a interpretação das causas de degradação e a caracterização da natureza dos materiais constituintes.

Neste ensaio foram observados os provetes em lâmina delgada de cada uma das amostras. Estes foram recobertos com uma liga de ouro (Figura 4.14A) de forma a tornar as superfícies a observar condutoras do feixe eletrónico do MEV. As observações foram realizadas num MEV JEOL JSM 6400 no modo de eletrões retrodifundidos e, em simultâneo, realizou-se a análise química através de um sistema EDS Inca X-Sight da marca Oxford Instruments (Figura 4.14B).

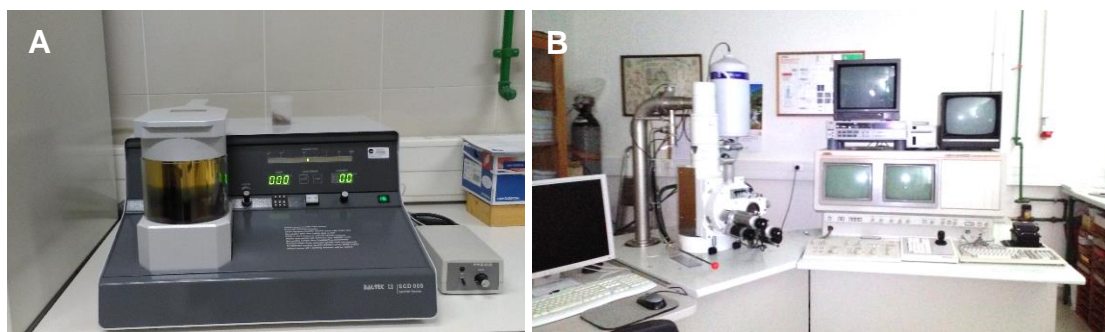


Figura 4.14 Observação ao MEV: A – Recobrimento das amostras com liga de ouro; B – MEV JEOL JSM 6400

No MEV existem vários tipos de detetores de eletrões emitidos pela amostra, os quais permitem obter imagens de grande interesse acerca das características das amostras. A imagem gerada por eletrões retrodifundidos fornece imagens de relevo e de composição, isto é, imagens de grande contraste em função do número atómico dos elementos presentes na amostra (Figura 4.15). Assim, zonas nas imagens com

uma tonalidade escura correspondem a elementos de baixo número atômico, enquanto zonas muito claras correspondem a elementos de número atômico elevado (Santos Silva et al. 1994).

Em complemento, efetuaram-se análises químicas pontuais por EDS e mapas de raios X com a distribuição elementar dos elementos químicos principais presentes nas zonas em análise. Nos mapas de raios X as imagens da distribuição elementar são geradas com falsas cores em que, e de forma análoga ao indicado para as imagens de elétrons retrodifundidos, a tonalidade mais clara corresponde à zona de maior concentração no elemento em questão.

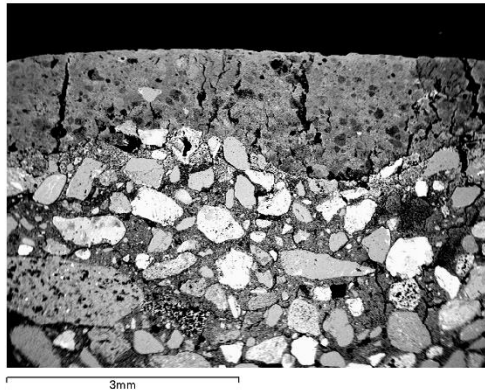


Figura 4.15 - Imagem de elétrons retrodifundidos ao MEV (amostra de argamassa de revestimento)

4.2.4 Análise mineralógica por difração de raios X

O ensaio de difração de raios X (DRX) consiste na incidência de um feixe monocromático de radiação X no material em análise. Uma vez que os átomos dos compostos cristalinos estão dispostos numa rede tridimensional, com distâncias reticulares da mesma ordem de grandeza dos comprimentos de onda da radiação X, vão funcionar como uma rede de DRX consoante as condições da Lei de Bragg (equação 4.1), permitindo assim a identificação dos compostos cristalinos presentes em amostras em pó.

$$n\lambda = 2d\sin(\theta) \quad \text{equação 4.1}$$

Na equação n é número inteiro, λ [Å] é o comprimento de onda da radiação; d [mm] é a distância entre planos e θ [°] é o ângulo de incidência do feixe de radiação.

Como resultado da difração obtêm-se espectros de difração (difratogramas) a partir dos quais se efetuou a análise qualitativa das amostras.

Foi utilizado um difratômetro Philips PW3710 utilizando a radiação Co K α com comprimento de onda $\lambda = 1,7983$ Å, operando com uma tensão de filamento de 35 KV e corrente de 45 mA. Os difratogramas foram obtidos entre 3° e 74° 2 θ , com uma velocidade de varrimento de 0,05° 2 θ s $^{-1}$ (Figura 4.16).

No ensaio de DRX foram utilizadas as frações globais e as frações finas, sendo estas previamente preparadas e introduzidas num porta-amostras metálico. As amostras em pó são introduzidas no porta-amostra em várias camadas delgadas, que são depois compactadas, até ao completo preenchimento do volume do porta-amostras (Figura 4.17).

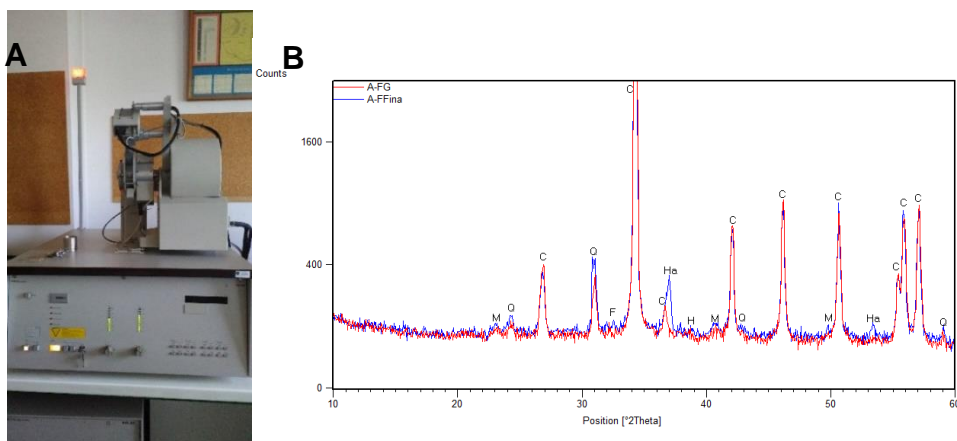


Figura 4.16 A - Difrátometro de raios X; B - difratograma

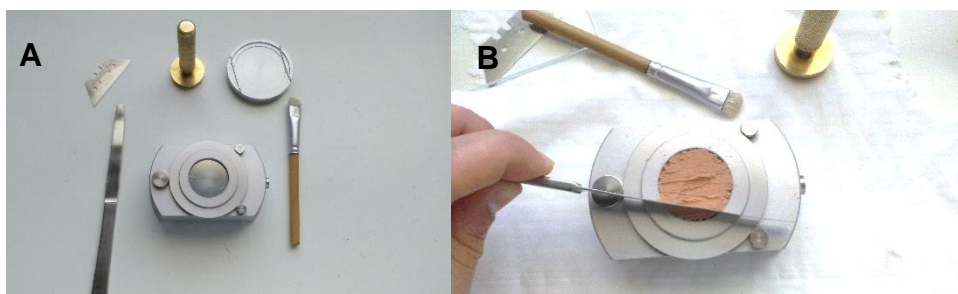


Figura 4.17 Preparação das amostras para DRX: A - material utilizado na preparação; B - enchimento do porta amostras

Este ensaio é muito usado na análise de argamassas antigas dado que permite obter informações muito significativas quanto à natureza do ligante e agregados e quanto à presença de materiais pozolânicos, bem como de produtos de alteração.

4.2.5 Análise termogravimétrica e térmica diferencial

A análise termogravimétrica (ATG) é uma técnica de análise térmica de materiais que monitoriza as perdas ou ganhos de massa de uma determinada amostra ao longo do tempo, quando aquecida (ou arrefecida) a uma velocidade constante. Neste processo quando ocorre uma reação que implique uma perda de massa (por exemplo, descarbonatação) ou ganho de massa (por exemplo, carbonatação) pode ser quantificada. As perdas de massa obtidas ocorrem, em geral, em intervalos de temperatura característicos da presença de um determinado composto. Uma variante da ATG é a sua derivada, que é comumente representada em simultâneo, sendo designada de análise termogravimétrica diferencial (DTG).

A análise térmica diferencial (ATD) é uma outra técnica de análise térmica em que é registada a diferença de temperatura entre a amostra em análise e um material que não sofre qualquer transformação na gama de temperatura do ensaio. A curva ATD, além de ser característica para uma dada substância permite a obtenção de dados quantitativos a partir das áreas integradas dos picos (Figura 4.18A).

Para a realização do ensaio utilizou-se um equipamento SETARAM TGA 92 (Figura 4.18B) tendo-se usado a fração global preparada para DRX. Os termogramas das amostras foram efetuados sob atmosfera inerte (árgon – 3 L/h), com velocidade de aquecimento uniforme de 10° C/min, desde a temperatura ambiente até 1000 °C.

Neste tipo de amostras as perdas de massa registadas entre os 25 e os 200 °C correspondem essencialmente à perda de água livre (de humidade) e à perda de água de eventuais compostos hidráulicos; a perda de massa entre os 200 e os 500 °C atribui-se essencialmente à perda de água devida à desidroxilação dos minerais de argila e alguns compostos hidratados de ferro; por fim, a perda de massa entre os 500 e os 900 °C deve-se essencialmente à reação de descarbonatação dos carbonatos.

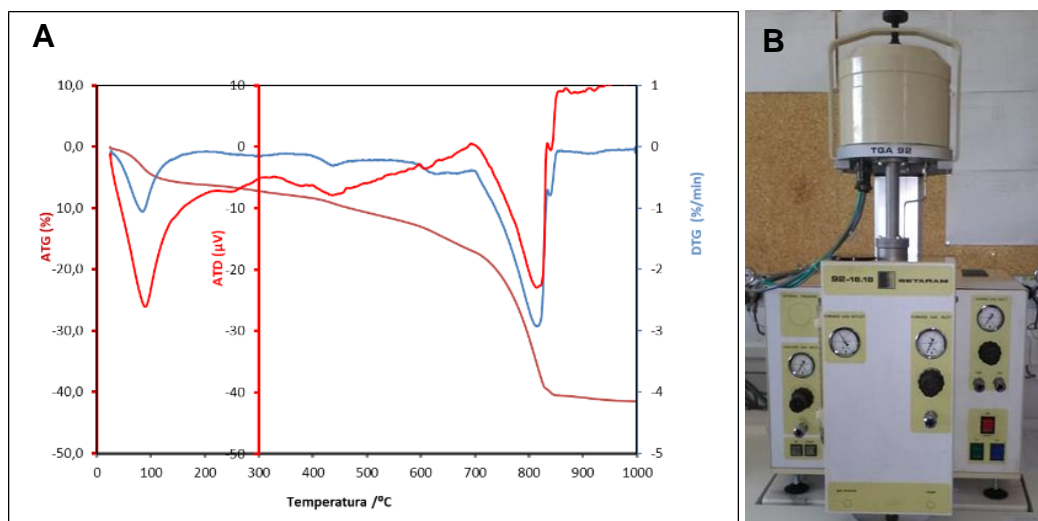


Figura 4.18 Análise termogravimétrica e térmica diferencial: A - Gráfico ATG/DTG/ATD da amostra CP2018B; B - equipamento SETARAM TGA 92

Dado que a reação de descarbonatação ocorre no intervalo de temperatura 550-900 °C, o teor de CaCO_3 pode ser calculado de acordo com a equação 4.2.

$$\text{Teor de CaCO}_3 = pm_{550-900} \times \frac{MM_{\text{CaCO}_3}}{MM_{\text{CO}_2}} \quad \text{equação 4.2}$$

Na equação $pm_{550-900}$ corresponde à perda de massa no intervalo 550-900 °C e $\frac{MM_{\text{CaCO}_3}}{MM_{\text{CO}_2}}$ é a razão molar entre os compostos envolvidos na reação de descarbonatação do CaCO_3 .

4.2.6 Determinação do resíduo insolúvel

Para a determinação do resíduo insolúvel em ácido, isto é, material que traduz o teor existente de areia siliciosa, as amostras foram atacadas a quente com uma solução de ácido clorídrico 1:3 e posteriormente secas em estufa a 105 °C.

No ensaio foi utilizada apenas a fração global já previamente preparada como descrito em 4.3.2.

Para o ensaio foi necessário em primeiro lugar calcinar cadinhos de porcelana numa estufa a 1000 °C durante aproximadamente 1h. Após a calcinação, dos cadinhos foram pesados numa balança de precisão de 0,1 g. Introduziu-se cerca de 1 g da fração global da amostra num copo e adicionou-se 100 ml de água destilada num agitador magnético (Figura 4.19A), agitando durante 2 minutos.

Adicionou-se em seguida 40 ml de ácido nítrico (HNO_3) (1:10) (100 ml de HNO_3 com 1000 ml de água destilada) e mais 60 ml de água destilada. Voltou-se a agitar durante 30 minutos. Após completar os 30

minutos procedeu-se à verificação do pH da mistura: se o valor fosse diferente de 1 seria necessário a introdução de mais ácido nítrico.

Em seguida, filtrou-se o resíduo por um papel de filtro colocado num funil de vidro, e a solução foi recolhida num copo de plástico. Foi necessário lavar abundantemente o resíduo com água destilada, para que não ficassem retidas partículas finas no copo do ataque (Figura 4.19B).



Figura 4.19 A – Agitadores magnéticos para determinação do resíduo insolúvel; B – Filtragem do resíduo do ataque ácido para determinação do resíduo insolúvel

O resíduo que ficou retido no papel de filtro foi colocado dentro dos cadinhos de porcelana previamente calcinados e secos a 105 °C. Após secagem do papel de filtro a 105 °C o papel foi incinerado de forma gradual, com aumentos de temperatura até atingir o valor de 1000 °C. Atingindo esta temperatura, o cadinho e o resíduo foram calcinados durante mais 30 minutos. Em seguida, o conjunto foi colocado em exsiccador à temperatura ambiente e pesado posteriormente até se obter massa constante, valor que traduz a massa de resíduo insolúvel (RI). O teor de RI da amostra foi calculado de acordo com a equação 4.3.

$$RI = \frac{(c_1 - c)}{m} \times 100 \quad \text{equação 4.3}$$

Na equação RI [%] – resíduo insolúvel expresso em percentagem; c_1 [g] – massa do cadinho mais resíduo insolúvel; c [g] – massa do cadinho vazio; m [g] – massa da amostra a ensaiar.

4.2.7 Análise granulométrica do agregado por ataque de ácido

A análise granulométrica do agregado fino (areia, ensaio físico) foi efetuada segundo um procedimento interno não disponível em publicação, do LNEC para argamassas com agregado calcário na sua composição. Neste procedimento a amostra é atacada por períodos de alguns segundos com uma solução de ácido clorídrico diluído, HCl (1:10) (100 ml de HCl em 1000 ml de água destilada). O ataque é repetido várias vezes de forma a evitar ao máximo a dissolução de eventuais grãos de agregado calcário, e controlando em simultâneo a dissolução do ligante.

O ensaio foi efetuado na amostra desagregada e seca a 105 °C, durante 12 h, que foi previamente pesada e separada granulometricamente num agitador de peneiros (Figura 4.20). Os peneiros usados foram da série ASTM indicados na Tabela 4.4. O ensaio realizou-se com uma toma de amostra de cerca de 30 g.

Após separação granulométrica, cada uma das frações foi atacada com a solução de ácido HCl 1:10 (aproximadamente 50 ml) e agitada com a vareta durante cerca de um minuto. Em seguida, lavou-se abundantemente a solução com água destilada quente (até que não ocorresse mais libertação de CO_2) e filtrou-se por um cadinho de Gooch (Figura 4.21A) e sob vácuo (Figura 4.21B).



Figura 4.20 Agitador de peneiros para a separação granulométrica

Tabela 4.4 Peneiros da série ASTM para a separação granulométrica

Peneiro [Nº]	Abertura de malha
4	4,75 mm
8	2,36 mm
16	1,18 mm
30	600 μm
50	300 μm
100	150 μm
200	75 μm

Após filtração os cadinhos foram secos em estufa a 105 °C. Com a finalização do processo verificou-se, numa lupa binocular, a existência da cal em redor dos grãos de areia. Caso fosse visível essa presença seria necessário repetir todo o processo, até ao seu desaparecimento.

Finalizado o processo, todas as frações depois de secas foram novamente separadas granulometricamente e, em seguida pesadas, para ser possível o traçado das curvas granulométricas.

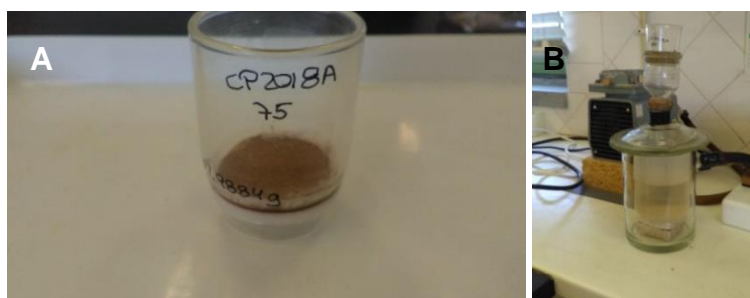


Figura 4.21 A – Cadinho de Gooch utilizado para filtração da solução para análise granulométrica; B – Bomba de vácuo para filtração da areia

4.1 Procedimentos adotados na campanha experimental – ensaios de caracterização física e mecânica

Os procedimentos adotados para cada ensaio são descritos em seguida, bem como as amostras que foram sujeitas a esses mesmos ensaios.

4.3.1 Massa volúmica aparente

Devido às dimensões e formatos irregulares das amostras, a massa volúmica aparente foi determinada pelo método da areia deslocada, adotando-se assim o procedimento de ensaio descrito em trabalhos anteriores embora para outros materiais e sem colocar em risco a utilização posterior das amostras para outros ensaios (Freire 2016; Santos 2017).

O ensaio consistiu na determinação do volume da amostra através da baridade da areia. Para tal, foi necessário em primeiro lugar determinar a baridade da areia segundo a NP EN 1097-3 (IPQ 2002). Para a determinação da baridade da areia utilizou-se um recipiente metálico de volume conhecido que foi preenchido de areia, compactado com pancadas suaves e rasado superiormente com uma régua.

Para a determinação da massa volúmica aparente das amostras estas foram inicialmente pesadas e depois introduzidas dentro de um recipiente de volume conhecido preenchendo-se o restante volume com areia, compactando e rasando superiormente. Desta forma é possível pesar a massa do conjunto e, a esta massa, subtrai-se a massa da amostra, ficando assim com a massa de areia “por deslocar”. A massa de areia “deslocada” é obtida através da subtração da massa de areia “por deslocar” à massa correspondente ao recipiente cheio de areia.

As pesagens das massas foram efetuadas com o auxílio de uma balança de precisão de 0,1 g.

A massa volúmica aparente de cada amostra, obteve-se através da equação 4.4.

$$MV = \frac{m_{amostra+areia}}{v_{areia\ deslocado}} \quad \text{equação 4.4}$$

Na equação $MV [kg/m^3]$ – massa volúmica da amostra; $m_{amostra+areia} [kg]$ – massa do conjunto amostra+areia; $v_{areia\ deslocado} [m^3]$ – volume de areia deslocado.

Para cada amostra o procedimento de ensaio foi realizado três vezes, obtendo assim um valor médio para a massa volúmica aparente.

4.3.2 Dureza superficial

Para o ensaio de dureza superficial recorreu-se à norma ASTM D2240 (ASTM 2010) e à ficha de ensaio FE Pa 49.1 (LNEC, 2016). O ensaio de dureza superficial Shore A foi inicialmente concebido para aplicação em borrachas; no entanto, foi adaptado para outros materiais e apresenta diferentes escalas de medições Shore A a Shore D. Por ser a do único durómetro disponível, a utilizada para as amostras em questão foi a escala Shore A, escala esta para materiais mais macios (Figura 4.22).



Figura 4.22 Ensaio de dureza superficial em amostra de taipa militar com durómetro Shore A

O ensaio consiste no registo da resistência superficial à penetração de uma agulha na extremidade do aparelho, quando pressionado sobre a superfície. Para a realização deste ensaio as amostras devem apresentar uma espessura mínima de 6,4 mm e uma dimensão quadrada de 50 mm. O equipamento de ensaio deverá ser encostado perpendicularmente à superfície da amostra e deverá ser mantido sobre pressão durante um segundo, para que o pino na sua extremidade faça acionar uma mola e o ponteiro girar numa escala de 0 a 100 graus Shore. Segundo a ficha de ensaio do LNEC (LNEC 2016), recomenda-se que os valores acima de 90 ou abaixo de 20 graus Shore não sejam contabilizados.

As amostras foram ensaiadas em oito pontos diferentes, obtendo-se uma média de oito valores para cada fragmento de amostras.

4.3.3 Módulo de elasticidade dinâmico

Para a determinação do módulo de elasticidade dinâmico das amostras foi adotado o procedimento de ensaio presente na NP EN 14146 (IPQ 2006). A realização do ensaio consiste na determinação da frequência de ressonância longitudinal obtida através da transmissão de uma vibração entre um emissor e um recetor, constituintes do aparelho “Zeus Resonance Meter” (Figura 4.23). Para uma maior coerência de valores foram registadas várias medições para um mesmo provete, alterando-se a posição da amostra em cada medição.



Figura 4.23 Ensaio de amostra de taipa militar no Zeus Resonance Meter

Ao equipamento “Zeus Resonance Meter” está associado um programa de cálculo onde se definem os parâmetros correspondentes às dimensões das amostras e respetivas massas.

Em primeiro lugar foram determinadas as massas das amostras; para isso foi utilizada uma balança de precisão de 0,001 g e, em seguida, as amostras foram colocadas entre o emissor e o recetor do equipamento. Desta forma o programa de cálculo determina de forma automática o valor do módulo de elasticidade dinâmico, em MPa, através da equação 4.5.

$$E_{din} = (2 \times l \times f_0)^2 \times \frac{\rho}{g} \times 10^{-6} \quad \text{equação 4.5}$$

Na equação $E_{din}[MPa]$ – módulo de elasticidade dinâmica; $l [m]$ – comprimento da amostra; $f_0 [Hz]$ – frequência de ressonância longitudinal; $\rho [N/m^3]$ – massa volúmica do material; $g [m/s^2]$ - Aceleração da gravidade.

Devido à grande porosidade e grande heterogeneidade dos materiais presentes na taipa, o ensaio é pouco conclusivo.

4.3.4 Abrasão a seco

O ensaio de abrasão a seco determina a resistência de um dado material à erosão superficial, e para tal considerou-se a norma DIN 18947 (DIN 2013) específica para rebocos de terra.

O ensaio consiste na medição da perda de massa de um dado provete com a rotação de uma escova de polietileno, completando um total de 20 ciclos com uma pressão de 2 kN (Figura 4.24).



Figura 4.24 Equipamento de resistência à abrasão

Dada a reduzida dimensão das amostras efetuou-se apenas uma medição para cada uma.

Em primeiro lugar as amostras foram pesadas numa balança de precisão de 0,001 g, para determinação da massa inicial. Após cada ensaio as amostras foram limpas com um pincel e pesadas novamente para se aferir a perda de massa. Para a aferição da perda de massa por abrasão (em g/cm²), determina-se a razão entre a perda de massa e a área de contacto da escova, através da equação 4.6.

$$P_{ma} = \frac{m_i - m_f}{s} \quad \text{equação 4.6}$$

Na equação $P_{ma}[g/cm^2]$ – perda de massa por abrasão; $m_i [g]$ – massa inicial da amostra; $m_f [g]$ – massa final da amostra; $S [cm^2]$ – área de desgaste, em contacto com a escova.

4.3.5 Resistência à compressão

O ensaio de resistência à compressão avalia a capacidade resistente que um determinado material apresenta ao carregamento vertical. Sendo um ensaio destrutivo, foi efetuado em último lugar na campanha experimental física e mecânica.

Para a realização do ensaio de resistência à compressão considerou-se a norma EN 1015-11 (CEN 1999), com ligeiras adaptações devido ao formato irregular dos provetes de taipa, baseadas na FE LNEC Pa 42 (LNEC 2015a).

Em primeiro lugar os provetes de taipa foram cortados aproximadamente em cubos de aresta entre 4,3 cm e 8,1 cm e duas faces opostas (base e topo) foram regularizadas, com a aplicação de uma argamassa de cimento com um traço em volume de 1:3, para que a carga aplicada no decorrer do ensaio fosse distribuída uniformemente (Figura 4.25).

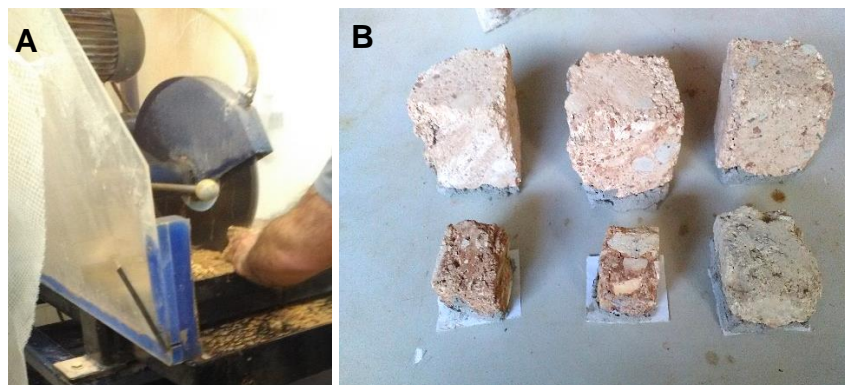


Figura 4.25 Preparação dos provetes para o ensaio de compressão: A – corte; B - aplicação de argamassa para regularizar a base

Para a realização do ensaio utilizou-se o equipamento ZWICK Z050 (Figura 4.26) com uma célula de carga de 50 kN e uma velocidade de 3 mm/min até os provetes atingirem a rotura. Após a rotura, o equipamento é parado e regista-se o valor da carga máxima obtida.

O programa de cálculo associado ao equipamento efetuou o registo gráfico em que relaciona o tempo, em segundos [s], com a força aplicada, em Newton [N], sendo que o valor da força de compressão máxima corresponde ao pico presente no gráfico.

O valor da resistência à compressão foi determinado através do quociente entre o valor da força máxima pela área comprimida, equação 4.7.

$$R_c = \frac{F_c}{S} \quad \text{equação 4.7}$$

Na equação $R_c[N/mm^2]$ – valor da resistência à compressão; $F_c [N]$ – força de compressão aplicada à amostra; $S [mm^2]$ – área da amostra.



Figura 4.26 Ensaio compressão de uma amostra de taipa militar com equipamento ZWICK Z050

4.3.6 Erosão por gotejamento- Geelong test

O ensaio de erosão por gotejamento permite avaliar a resistência de uma superfície exposta diretamente a gotas de água, gotas estas que são simuladas a partir de um equipamento experimental efetuado. O equipamento possui um depósito de água com orifício para o exterior efetuado através de uma torneira gotejadora com 2 mm de diâmetro e um suporte com uma inclinação de 30° com a horizontal onde se suportam as amostras, sendo que estas devem estar a uma distância de 400 mm (Figura 4.27).



Figura 4.27 Ensaio em amostra de taipa militar de erosão por gotejamento

Para a realização do ensaio foram efetuados os procedimentos experimentais da norma NZS 4298 (NZS 1998) e o efetuado em trabalhos anteriores (Ferreira 2017b).

Inicialmente o equipamento foi calibrado para que a água fosse gotejada a velocidade constante de 3 cm³/min, o que se traduzia num débito de caudal de 12 cm³ durante um intervalo de 4 minutos.

As amostras foram inicialmente pesadas numa balança de precisão de 0,1g e foram colocadas no suporte para o decorrer do ensaio. No final do ensaio foram novamente pesadas e, com o auxílio de uma craveira, foi medida a maior dimensão e a dimensão perpendicular da mancha de água que o ensaio originou. As amostras foram deixadas em ambiente de temperatura e humidade controlada até massa constante; em seguida foram pesadas novamente para determinar a diferença de massa que as amostras sofreram com a erosão.

4.3.7 Absorção de água a baixa pressão por tubos de Karsten

O ensaio de absorção de água a baixas pressões foi efetuado conforme descrito na norma EN 16302 (CEN 2013), tendo sido utilizados tubos de Karsten com uma escala de 0 a 4 ml (Figura 4.28). O método de ensaio adotado laboratorialmente foi o método horizontal e foram efetuadas quatro medições por cada amostra, cada uma correspondente a 1 ml de água absorvida.



Figura 4.28 Ensaio de absorção de água a baixa pressão com tubo de Karsten numa amostra de taipa militar

Para a fixação dos tubos de Karsten às diversas amostras foi utilizada uma plasticina resistente à água, para assim promover a estanquicidade entre a amostra e o tubo.

Devido à natureza das amostras a absorção de água foi bastante rápida, não permitindo a realização do ensaio em várias amostras em simultâneo. Determinou-se a absorção de água a baixa pressão, em ml/cm^2 , através da equação 4.8.

$$W_i = \frac{Q_i}{S} \quad \text{equação 4.8}$$

Na equação $W_i [ml/cm^2]$ – absorção de água a baixa pressão no instante i ; $Q [ml]$ – quantidade de água absorvida no instante i ; $S [cm^2]$ – área da superfície de contato entre o tubo e a amostra.

A única restrição de dimensão para a realização do ensaio é de que a dimensão da amostra seja superior à dimensão da boca do tubo de Karsten.

4.3.8 Absorção de água por capilaridade

O ensaio de absorção de água por capilaridade mede a quantidade de água que é absorvida por unidade de área, em contacto com água, e com condições de temperatura e humidade controlada. Adotou-se o procedimento de ensaio referente à norma EN 15801 (CEN 2009).

Para a realização do ensaio foram utilizadas partes das amostras resultantes do corte ocorrido em ensaios anteriores; para isso teve-se apenas em atenção a utilização de uma face o mais plana possível para que a absorção de água fosse efetuada de forma uniforme em toda a face exposta à água.

Sendo as amostras irregulares, a determinação da área de contato com a água foi efetuada com a delimitação das amostras numa folha de papel que, ao ser fotografada com uma régua graduada, foi exportada para AutoCAD e determinada a área da superfície de cada amostra.

No caso da taipa, material com base em terra, é necessário ter em conta a perda de partículas que pode decorrer ao longo do ensaio. Para limitar esse problema as amostras são colocadas e ensaiadas dentro de cestos metálicos com uma folha de tule na sua base (Figura 4.29A). As amostras e os respetivos cestos são colocados dentro de uma caixa plástica onde foi criado ambiente saturado, em contacto com uma lâmina de água de 2 mm. A caixa mantém-se tapada sempre que possível para manter as condições de saturação e altura da lâmina de água foi controlada e sempre que necessário foi adicionada mais água.

Para a determinação das diferenças de massa foi utilizada uma balança de precisão de 0,001 g (Figura 4.29B). Foram efetuadas pesagens desde o instante inicial aos 1, 2, 3, 4, 5, 10, 15, 20, 30, 60, 120, 180, 360, 1440, 2880 minutos.

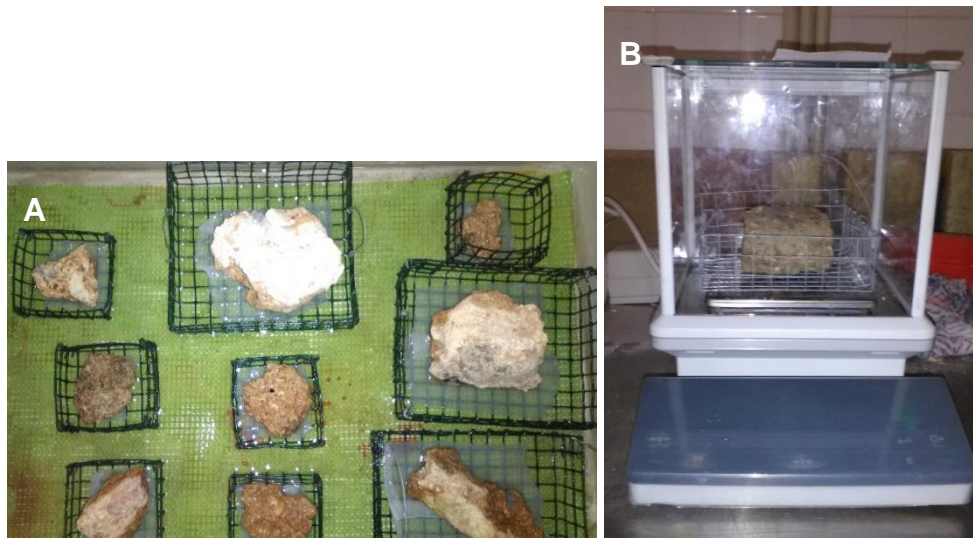


Figura 4.29 A – Amostras de taipa e de reboco da ermida em contacto com água no ensaio de capilaridade; B – Pesagem de amostra no seu cesto em balança de precisão

A quantidade de água absorvida por cada amostra, em kg/m^2 foi determinada através da equação 4.9.

$$M = \frac{m_i - m_0}{S} \quad \text{equação 4.9}$$

Na equação $M [kg/m^2]$ – massa de água absorvida por capilaridade; $m_0 [kg]$ – massa inicial da amostra; $m_i [kg]$ – massa da amostra ao instante i ; $S [m^2]$ – área da amostra em contacto com a lâmina de água.

Com a determinação da massa de água absorvida por capilaridade traçaram-se curvas de absorção capilar (Figura 4.30), em que nas abcissas se encontra o valor de M e nas ordenadas a raiz do tempo em minutos. Do traçado das curvas determinou-se igualmente o valor de coeficiente de capilaridade de cada amostra c , que corresponde ao declive do troço inicial mais representativo da curva. O valor do coeficiente de capilaridade é proporcional à absorção das amostras: quanto maior o valor de c , maior o declive e, por consequência, mais rápida decorre a absorção por capilaridade. Como nem todas as amostras têm a mesma altura, os respetivos valores assintóticos não são comparáveis.

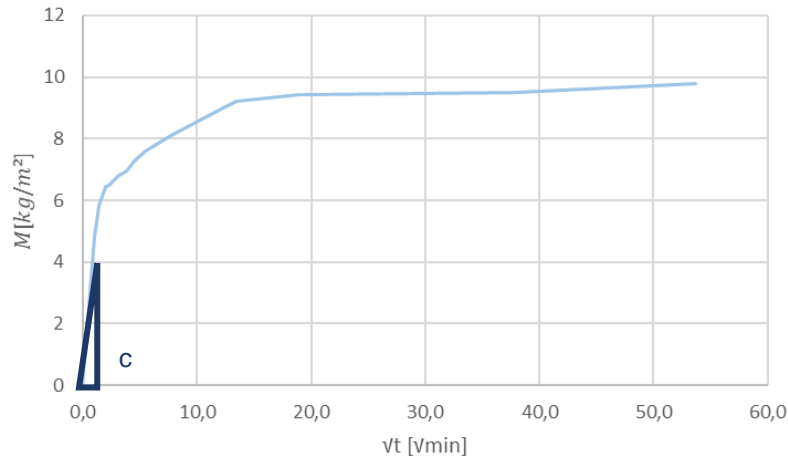


Figura 4.30 Curva de absorção de água por capilaridade e representação do coeficiente de capilaridade

4.3.9 Secagem

O ensaio de secagem mede a quantidade de água que é evaporada por unidade de área em condições de temperatura e humidade controladas. Adotou-se o procedimento de ensaio referente à norma EN 16322 (CEN 2013b).

Para a realização do ensaio foram utilizadas as amostras que foram previamente sujeitas ao ensaio de absorção capilar. Para limitar a perda de material fino, as amostras continuaram dentro dos cestos metálicos e em contacto com o tule, sendo que a primeira medição do ensaio de secagem corresponde à última medição do ensaio de capilaridade.

As amostras foram retiradas da superfície de água e mantidas com a face que esteve sujeita a absorção capilar virada para cima, ficando dispostas por cima da bancada, estanque e lisa (limitando a secagem por essa superfície). Para a determinação das diferenças de massa foi utilizada a mesma balança de precisão de 0,001 g utilizada no ensaio de absorção capilar. Foram efetuadas pesagens aos 10, 20, 30, 40, 50, 60, 120, 180, 360, 1440, 2880 minutos.

A quantidade de água seca por cada amostra, em kg/m² foi determinada através da equação 4.10.

$$m = \frac{m_0 - m_i}{S} \quad \text{equação 4.10}$$

Na equação m [kg/m²] – massa de água seca; m_0 [kg] – massa inicial da amostra; m_i [kg] – massa da amostra ao instante i ; S [m²] – área da amostra.

Com a determinação do teor de água seca traçaram-se curvas de secagem (Figura 4.31), em que nas abcissas se encontra o valor de m e nas ordenadas o tempo em horas – curva para a determinação da taxa de secagem na fase 1 (Ts1) – e com a raiz do tempo – curva para a determinação da taxa de secagem na fase 2 (Ts2).

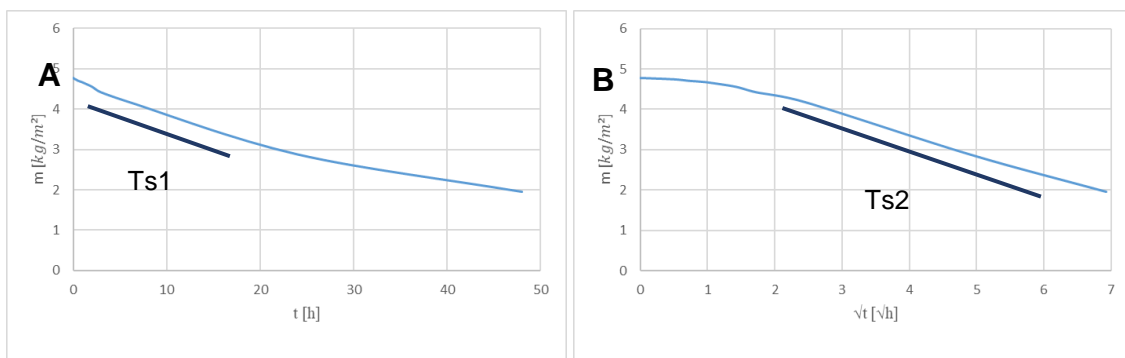


Figura 4.31 Curvas de secagem: A – curva para determinação da taxa de secagem $Ts1$; B – curva para determinação da taxa de secagem $Ts2$

A taxa de secagem $Ts1$ corresponde à deslocação da água em estado líquido desde o interior da amostra até à superfície; é determinada pelo declive negativo do troço inicial da curva de secagem respetiva. A taxa de secagem $Ts2$ corresponde ao fenómeno de difusão do vapor, em que a evaporação de água no estado líquido já não é significativa; determina-se também pelo declive negativo do segundo troço da curva respetiva.

4.4 Procedimentos adotados na campanha experimental – ensaios realizados in situ

4.4.1 Resistência superficial por esclerómetro pendular

O ensaio de avaliação da resistência superficial por esclerómetro pendular foi realizado tendo por base a ficha de ensaio FE Pa 48.1 (LNEC 2015b), utilizando-se o equipamento Schmidt PM.

O ensaio consiste na medição do valor de ressalto que um pendulo provoca no contacto com uma superfície vertical. Para a realização do ensaio o equipamento é posicionado de forma a estar o mais vertical possível. Estando o equipamento estável e firme, é libertado o pendulo que, através de uma mola, ressalta produzindo um impacto na parede. O valor do ressalto é medido através da escala presente no equipamento (Figura 4.32).

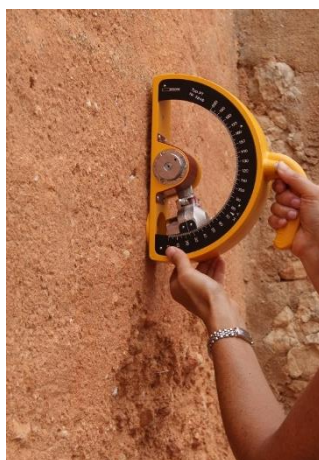


Figura 4.32 Ensaio de resistência superficial com esclerómetro pendular em bloco de taipa reconstruído em 2004

O ensaio foi realizado ao longo de toda fortificação, tendo sido dada maior importância a zonas intervencionadas recentemente, na torre, ou na muralha em 2004 em comparação com zonas em que a taipa ainda

se apresenta de forma original, pelo facto de muitas dessas zonas mais antigas não se encontrarem perfeitamente na vertical e planas.

4.4.2 Velocidade de propagação de ultrassons

O ensaio de velocidade de propagação de ultrassons foi realizado segundo a ficha de ensaio FE Pa 43 (LNEC 2016), com o equipamento Pundit Lab (Proceq). Este equipamento está munido de dois transdutores de 54 kHz que, ao transmitirem entre eles um impulso, medem o respetivo tempo de duração dessa transmissão em microssegundos. O ensaio foi realizado recorrendo ao método indireto, que consiste no posicionamento dos transdutores numa mesma superfície de ensaio (Figura 4.33). Os transdutores foram posicionados numa grelha de 8 a 12 pontos, distantes entre si de 20 cm, e em cada um dos pontos foram efetuadas três medições.

A velocidade de propagação de ultrassons, expressa em m/s, resulta do quociente entre a distância dos transdutores e o tempo que a onda longitudinal demora a percorrer essa distância. Este valor está diretamente relacionado com a compacidade e o volume de vazios ou eventual fissuras existentes: quanto menor o valor de velocidade de propagação de ultrassons, menor a sua compacidade e maior o seu volume de vazios.



Figura 4.33 Ensaio de velocidade de propagação de ultrassons em terra projetada em 2004

4.4.3 Absorção de água a baixa pressão por tubos de Karsten

O ensaio de absorção de água sob baixas pressões foi efetuado seguindo os mesmos procedimentos e normas adotadas no subcapítulo 4.3.7. Ao contrário do método de ensaio adotado laboratorialmente, o método adotado *in situ* correspondeu maioritariamente ao método vertical e, sempre que possível, foram efetuadas quatro leituras em cada tubo, cada uma correspondente a 1 ml de água absorvida (Figura 4.34). Recorreu-se à aplicação do método horizontal no provete de ensaio que se encontrava no exterior do Castelo. Assim, as medições foram efetuadas até as superfícies ensaiadas absorverem um total de 4 ml de água.



Figura 4.34 Ensaio de absorção de água por tubos de Karsten pelo método vertical em argamassa de reparação aplicada na torre

5. Resultados e discussão

No capítulo que se segue são apresentados e analisados os resultados obtidos durante a campanha experimental, bem como com resultados obtidos por outros autores.

5.1 Análise visual

Antes da realização da campanha experimental foi necessário analisar visualmente cada uma das amostras. A análise visual foi efetuada tendo por base fatores como a cor, tipo e forma dos agregados e outros aspetos particulares das amostras. Esta descrição encontra-se no Anexo B.

As amostras apresentam na sua maioria agregados calcários e siliciosos, à exceção das amostras pertencentes à muralha, em que não são visíveis agregados siliciosos. Em termos de forma e cor dos agregados, as amostras apresentam bastantes diferenças entre si. Todas as amostras possuem nódulos de cal de forma visível, à exceção da amostra CP2018A, em que não é visível nenhum nódulo.

5.2 Caracterização química e mineralógica

Os resultados obtidos na campanha experimental de caracterização química e mineralógica são apresentados em seguida, sendo sempre que possível comparados com resultados obtidos por outros autores a amostras da mesma construção ou de construções semelhantes.

5.2.1 Observação à lupa binocular

As amostras foram observadas à lupa binocular conforme descrito no subcapítulo 4.2.1, tendo sido detalhados aspetos como o número e espessura das camadas, cor das matrizes e dos agregados, granulometria do agregado, tipo de grão do agregado, adições na matriz (tijolo, carvão, entre outros), e estado de conservação (ataque biológico, falta de aderência, falta de coesão, fissuras, entre outros). Na Figura 5.1 são apresentadas as diversas amostras, sendo que os aspetos mais significativos apresentam-se descritos na Tabela 5.1, e no Anexo C são apresentadas as imagens retiradas na lupa binocular.

5.2.2 Observação ao microscópio petrográfico

A observação ao microscópio petrográfico foi efetuada consoante a descrição efetuada no subcapítulo 4.2.2 e com o apoio de um colega Geólogo do LNEC.

Nas Figura 5.2 e na Figura 5.3, respetivamente em nicóis paralelos e em nicóis cruzados, são apresentadas imagens das amostras analisadas ao microscópio petrográfico, sendo que no Anexo C são apresentadas imagens mais representativas da observação das amostras.

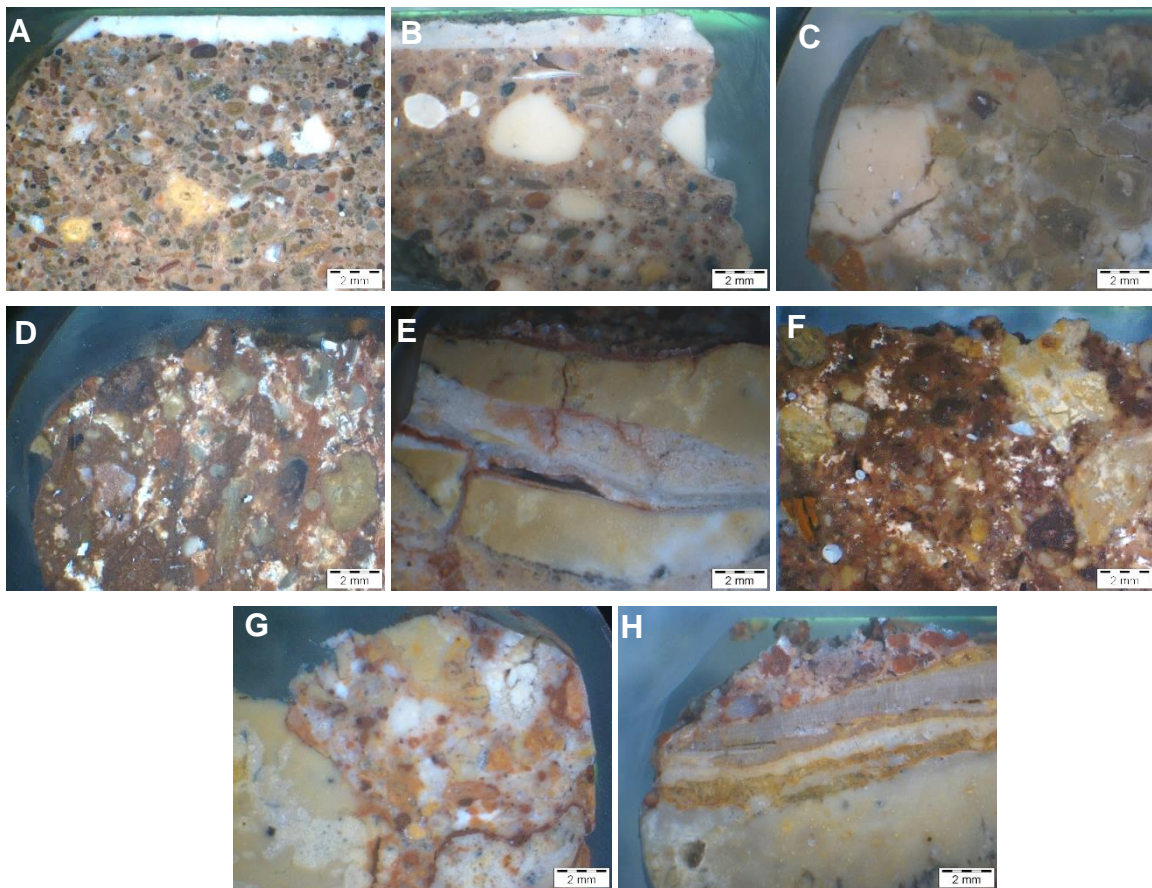


Figura 5.1 Amostras observadas à lupa binocular: A – AM1; B – AM2; C – AM10; D – AM11; E – CP2018A; F – CP2018B; G – CP2018C; H – CP2018D

Da amostra AM1 (que corresponde a uma amostra de argamassa de revestimento da ermida), foi possível verificar a presença de duas camadas distintas, uma camada de argamassa com mais de 1 cm e uma camada de barramento com cerca de 1,5 mm. O barramento apresenta uma cor esbranquiçada com agregados finos de areia calcária e com fissuração perpendicular à superfície. No que diz respeito à argamassa, esta apresenta uma cor acastanhada / avermelhada e é uma argamassa de cal e terra com presença de agregados siliciosos, com grãos monominerálicos de quartzo e grãos poliminerálicos de óxidos/hidróxidos de ferro. Apresenta ainda litoclastos de natureza calcária e vulcânica com cimento ferruginoso e minerais pesados. A dimensão dos agregados é variável dentro do intervalo dimensional dos siltes a areias grosseiras. O grau de rolamento é variável de sub-rolado a sub-anguloso e a sua seleção (agregados) é mediana. Apresenta uma relação agregado-ligante (cal+terra) de 50:50 %.

À semelhança da amostra AM1, a amostra AM2 (amostra de argamassa de revestimento da ermida) apresenta igualmente duas camadas de materiais distintos, uma de argamassa com cerca de 2 cm de espessura e uma outra de barramento com cerca de 1 mm de espessura. O barramento apresenta uma cor esbranquiçada com agregados finos de areia calcária, e tem três camadas distintas. A argamassa é de cal e terra com presença de agregados siliciosos, com grãos monominerálicos de quartzo e grãos poliminerálicos de óxidos/hidróxidos de ferro (MacKenzie & Adams 1996). Apresenta ainda litoclastos de natureza calcária com cimento ferruginoso, litoclastos vulcânica e minerais pesados. São visíveis ainda nódulos de cal, alguns com dimensão considerável. A argamassa apresenta duas camadas estratigráficas da mesma

altura temporal. A dimensão dos agregados é variável no intervalo dimensional dos siltes a areias grosseiras. O grau de rolamento dos agregados é variável de sub-rolado a sub-anguloso e homogénea em termos da distribuição de tamanho de grãos. Apresenta uma relação ligante (cal+terra)-agregado de 65:35, em volume.

Tabela 5.1 Resumo dos principais aspetos observados à lupa binocular em amostras de argamassa e de taipa militar do Castelo de Paderne

Amostra	Nº de camadas e características	Cor	Granulometria dos agregados	Estado de conservação	Outros aspetos
AM1	2 camadas: barramento com cerca de 1,5 mm e camada de argamassa com cerca de 2 cm	Barramento esbranquiçado, argamassa acastanhada	Agregados de dimensão variável, não superiores a 2 mm	Fissuração ao nível do barramento	-
AM2	5 camadas: três de barramento com um total de cerca de 1,5 mm e duas camadas de argamassa com 1,4 cm	Barramento esbranquiçado, argamassa bege	Agregados de dimensão variável, pouco homogénea	Fissuração ao nível do barramento	As camadas presentes na amostra aparentam ser contemporâneas
AM10	Amostra com uma camada	Acastanhado com presença de zonas avermelhadas e brancas	Agregados de dimensão variável, pouco homogénea, com a presença de grandes agregados calcários	Bastante fissuração, podendo os poros estarem preenchidos	-
AM11	Amostra com uma camada	Acastanhado e avermelhado	Agregados de dimensão pouco variáveis, homogénea, com a presença de zonas ricas em cal	Bastante fissurada com zonas que aparentam corresponder à retração da terra	-
CP2018A	Amostra com uma camada	Acastanhado e bege	Agregados de dimensão pouco variável, pouco homogénea, com a presença de grandes agregados calcários	Bastante fissurada com cristalização nos poros	Os agregados calcários presentes estão dispostos em camadas sobrepostas
CP2018B	Amostra com uma camada	Acastanhado e avermelhado	Agregados de dimensão pouco variáveis, homogénea, com a presença de zonas ricas em cal	Bastante fissurada com zonas que aparentam corresponder à retração da terra	-
CP2018C	Amostra com uma camada	Acastanhado e bege	Agregados de dimensão variável, pouco homogénea, com a presença de grandes agregados calcários	Fissurada com aparente cristalização nos poros	-
CP2018D	Amostra com uma camada	Bege avermelhada	Agregados de dimensão variável, pouco homogénea, com a presença de grandes agregados calcários	Fissurada com aparente cristalização dos bordos internos	Os agregados calcários presentes estão dispostos em camadas sobrepostas

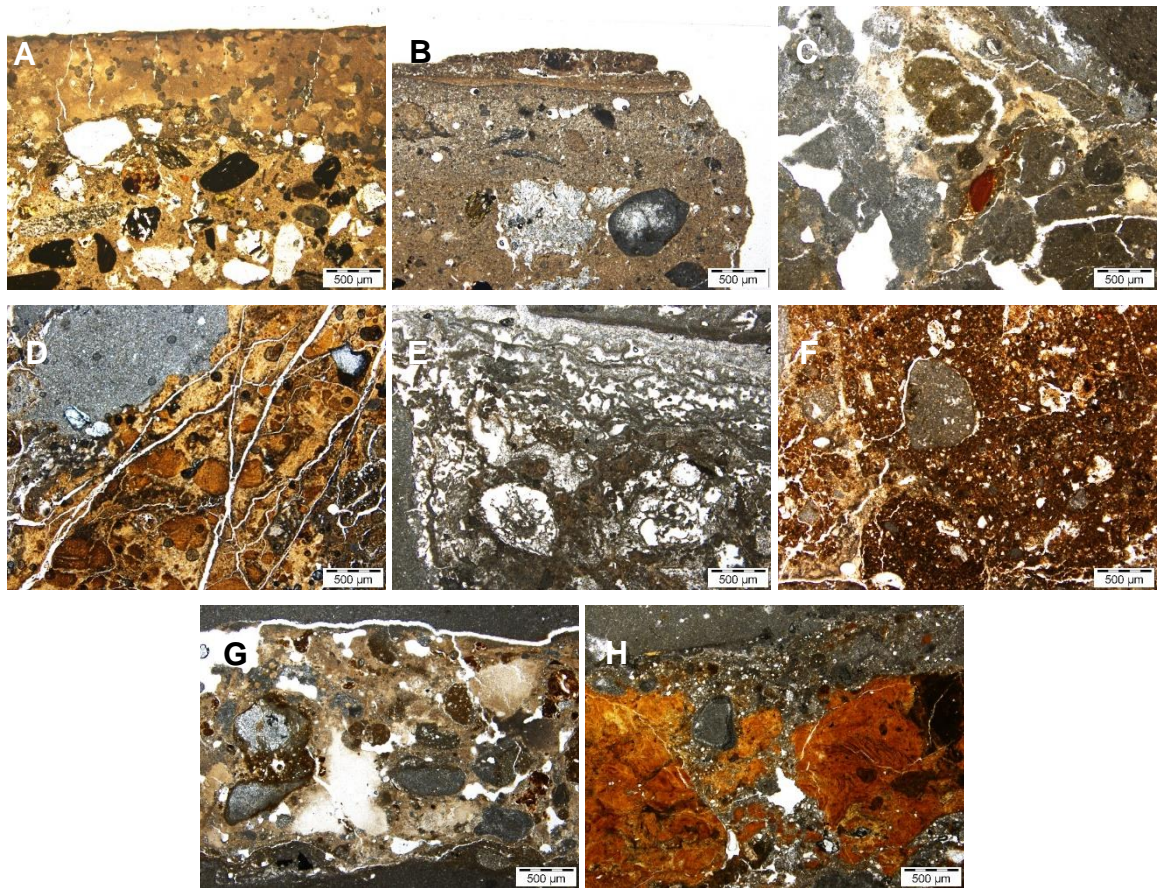


Figura 5.2 Amostras observadas ao microscópio petrográfico com nicóis paralelos: A – AM1; B – AM2; C – AM10; D – AM11; E – CP2018A; F – CP2018B; G – CP2018C; H – CP2018D

A amostra AM10 corresponde a uma amostra de taipa da muralha, com alguns centímetros de espessura, e tem cor castanho/avermelhado. Confirma-se tratar-se de uma amostra de cal e terra com presença de agregados essencialmente calcários e zonas bastante enriquecidas em cal (nódulos irregulares). Apresenta ainda uma porosidade elevada, por vezes com bordos internos com cristalização de carbonatos. A dimensão dos agregados é variável dentro do intervalo dimensional das areias grosseiras a cascalho. O grau de rolamento é maioritariamente sub-rolado e a granulometria dos agregados é heterogénea. Apresenta uma relação ligante (cal+terra)-agregado de 40:60, em volume.

A amostra AM11 corresponde a uma amostra de taipa igualmente da muralha, com alguns centímetros de espessura e tem cor avermelhada. É uma amostra de cal e terra com presença de agregados essencialmente calcários, além de zonas bastante enriquecidas em cal (nódulos irregulares). Apresenta alguma fissuração com bordos aparentemente sem recristalizações. A dimensão dos agregados é variável dentro do intervalo dimensional das areias finas a grosseiras. O grau de rolamento é variável de sub-rolado a sub-anguloso e a sua granulometria é relativamente homogénea. Apresenta uma relação ligante (cal+terra)-agregado de 40:60 (1:1,5), em volume.

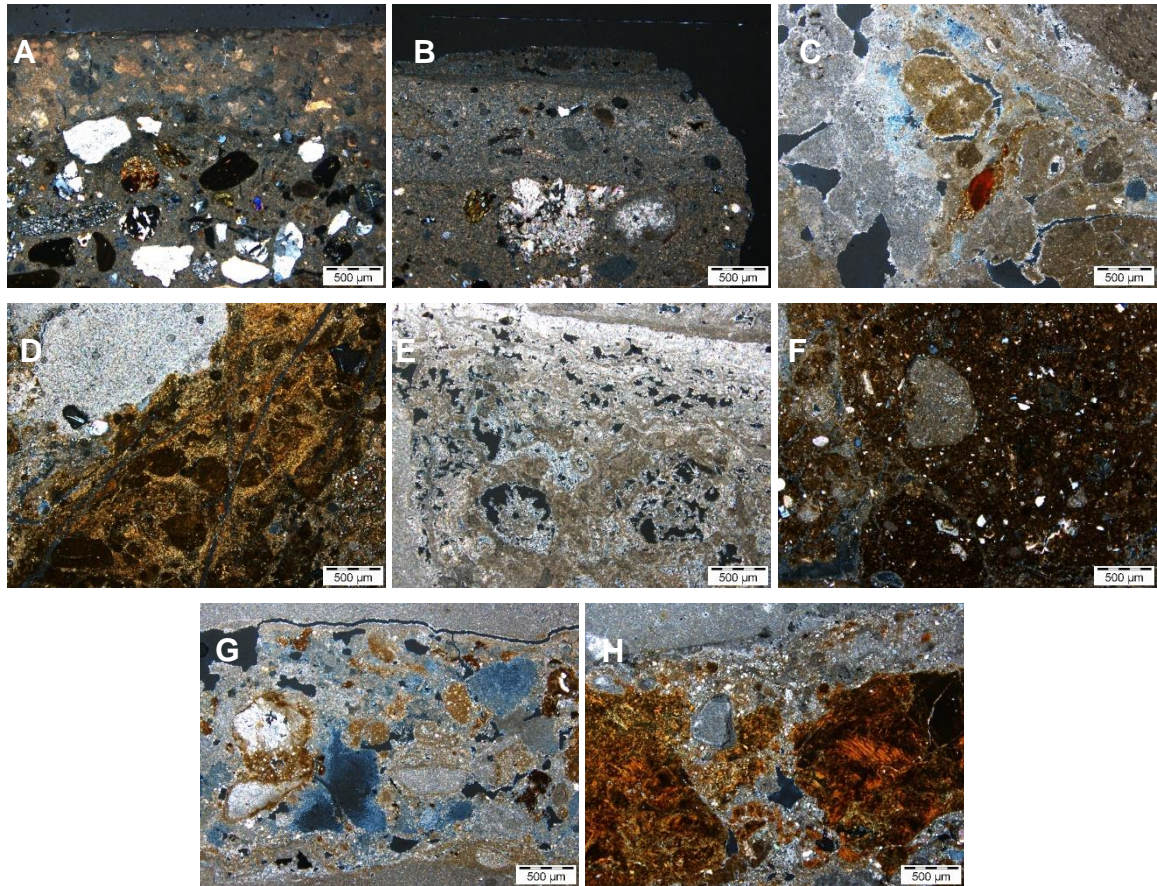


Figura 5.3 Amostras observadas ao microscópio petrográfico com nicóis cruzados: A – AM1; B – AM2; C – AM10; D – AM11; E – CP2018A; F – CP2018B; G – CP2018C; H – CP2018D

A amostra CP2018A corresponde a uma amostra de taipa da torre, com alguns centímetros de espessura e tem cor acastanhada. O ligante é constituído por uma mistura de cal e terra, e os agregados de maiores dimensões são essencialmente calcários e de têm forma irregular. Comparativamente às amostras de taipa anteriormente mencionadas, esta amostra tem menor proporção de fragmentos de terra. Já em termos da areia, a presença de quartzo é bastante residual assim como dos óxidos/hidróxidos de ferro, estes muitas vezes confundidos com o ligante. O ligante apresenta-se bem carbonatado, com zonas mais escuras, eventualmente devido à presença de minerais de argila. A porosidade da pasta/matriz é evidente e encontra-se bem disseminada por toda a pasta, sendo comum encontrar-se minerais de reprecipitação (eventualmente carbonatos) nos seus bordos internos, assim como crescimentos “rendilhados” no interior dos poros, ocupando-os parcialmente. A dimensão dos agregados é variável dentro do intervalo dimensional das areias finas a grosseiras. O grau de rolamento é variável e a sua distribuição é relativamente homogénea. Apresenta uma relação ligante (cal+terra)-agregado de 40:60 (1:1,5), em volume.

A amostra CP2018B corresponde a uma amostra de taipa da torre, com alguns centímetros de espessura e tem cor acastanhada/bege. O ligante é uma mistura de cal e terra argilosa, apresentando como agregado grosso grãos de calcário, com características semelhantes aos da amostra CP2018A. A dimensão do agregado fino é variável dentro do intervalo dimensional das areias (finas a grosseiras). O grau de rolamento é variável de sub-rolado a sub-anguloso e tem uma distribuição granulométrica heterogénea. Apresenta uma relação ligante (cal+terra)-agregado de 40:60 (1:1,5), em volume.

A amostra CP2018C corresponde a uma amostra de taipa da torre, com alguns centímetros de espessura e tem cor acastanhada/bege. O ligante é uma mistura de cal e terra argilosa, e o agregado grosso é essencialmente calcário, isto é, bastante semelhante às amostras CP2018A e CP2018B. Em termos da areia, o seu grau de rolamento é variável de sub-rolado a sub-anguloso e a sua distribuição relativamente homogênea. Apresenta uma relação ligante (cal+terra)-agregado de 40:60 (1:1,5), em volume.

A amostra CP2018D corresponde a uma amostra de taipa da torre, com alguns centímetros de espessura e tem cor acastanhada/bege. O ligante é uma mistura de cal e terra, e o agregado grosso é essencialmente calcário, portanto semelhante às amostras CP208A, CP2018B e CP2018C. Na pasta verifica-se a presença de óxidos/hidróxidos de ferro e minerais de argila, característica comum em fragmentos de terra. O grau de rolamento da areia é variável de sub-rolado a sub-anguloso, e a sua distribuição e termos de tamanho de grão é mediana. Apresenta uma relação ligante (cal+terra)-agregado de 40:60 (1:1,5), em volume.

5.2.3 Observação ao microscópio eletrónico de varrimento com microanálise de raios X (MEV/EDS)

As observações efetuadas ao MEV, foram efetuadas conforme descrição no subcapítulo 4.2.3, sendo apresentadas de seguida as imagens de MEV e espectros EDS mais representativos para cada uma das amostras analisadas. No anexo C são apresentados todos os aspetos observados ao MEV/EDS.

Confirmou-se existirem duas camadas de materiais diferentes na amostra AM1 (amostra de argamassa de revestimento da ermida), sendo a primeira um barramento, que a EDS indica ser de ligante dolomítico, enquanto a segunda camada é uma argamassa de cal cálcica e terra, com agregados de diversos tipos, como quartzo, feldspatos, piroxenas, calcários e biotite. A amostra apresenta ainda diversos nódulos de cal de reduzidas dimensões e bem dispersos (Figura 5.4).

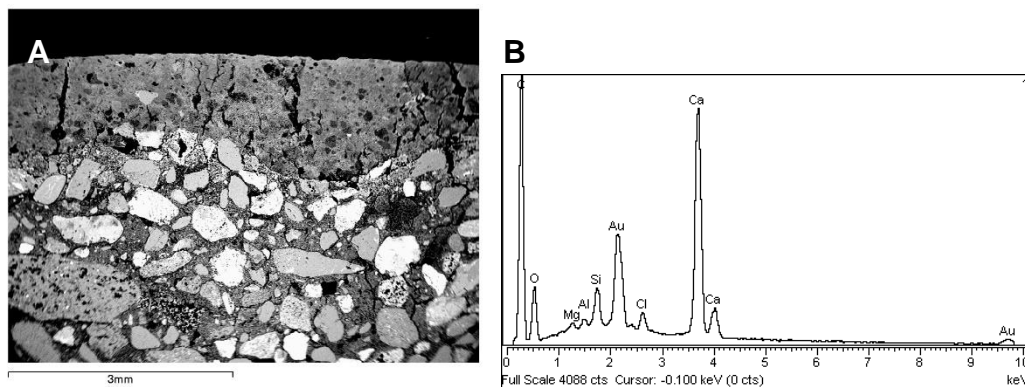


Figura 5.4 Amostra AM1: A - Imagem ao MEV; B – Espectro EDS correspondente a um nódulo de cal

A amostra AM2 (amostra de argamassa de revestimento da ermida) verificou-se ser constituída igualmente por duas camadas de materiais diferentes: a mais exterior um barramento (de igual composição) com três camadas finas e, a mais interior, uma argamassa de reboco aplicada em duas camadas. O ligante das camadas de barramento mais antigas aparenta ser de cal dolomítica, e de cal cálcica a mais recente (Figura 5.5). Em termos da argamassa de reboco, verificou-se que, quer o ligante, cal cálcica e terra, como os agregados, constituídos por grãos quartzo, calcário, piroxenas e feldspatos, são idênticos, o que faz supor que se trate de camadas contemporâneas.

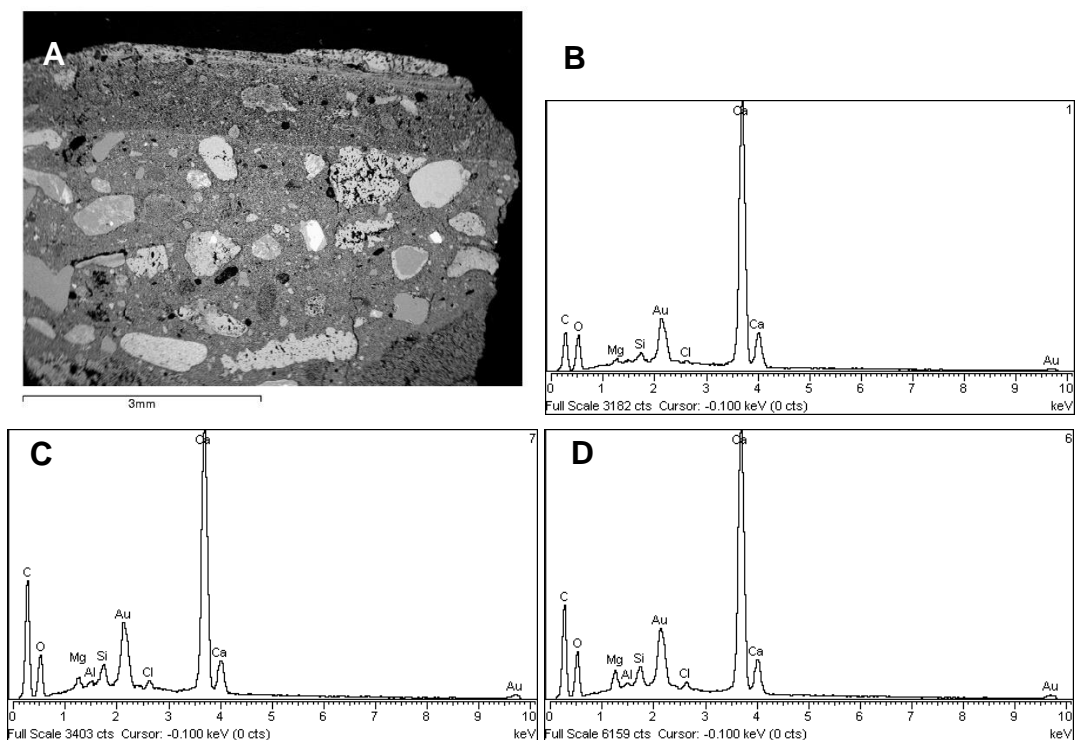


Figura 5.5 Amostra AM2: A - Imagem ao MEV; B – Espectro EDS da camada de barramento exterior (cal cálcica); C – Espectro EDS da camada intermédia do barramento; D – Espectro EDS da camada interior do barramento (cal dolomítica)

A amostra de taipa AM10 (amostra de taipa da muralha) confirmou-se ser bastante rica em cal cálcica, e apresenta como agregados grãos de quartzo, calcário, feldspatos e mica (Figura 5.6). A pasta da amostra é relativamente heterogénea em termos composicionais, resultado da maior ou menor homogeneização entre a terra e a cal (Figura 5.7).

A amostra de taipa AM11 (amostra de taipa da muralha) é menos rica em cal cálcica do que a amostra AM10, mas ainda assim é semelhante em termos do tipo de agregados (Figura 5.8) e tem igualmente na pasta do ligante alguma heterogeneidade em termos composicionais.

A amostra de taipa CP2018A (amostra de taipa da torre) (Figura 5.9A) apresenta igualmente uma pasta bastante rica em cal cálcica, sendo que os poros estão geralmente preenchidos com um composto que apresenta uma microestrutura “rendilhada”. Esse composto apresenta um EDS (Figura 5.9B) rico nos elementos cálcio (Ca), carbono (C), silício (Si) e oxigénio (O), tratando-se provavelmente de um silicato de cálcio, possivelmente resultado da intervenção realizada em 1986 em que foi usado silicato de etilo para consolidação de toda a torre.

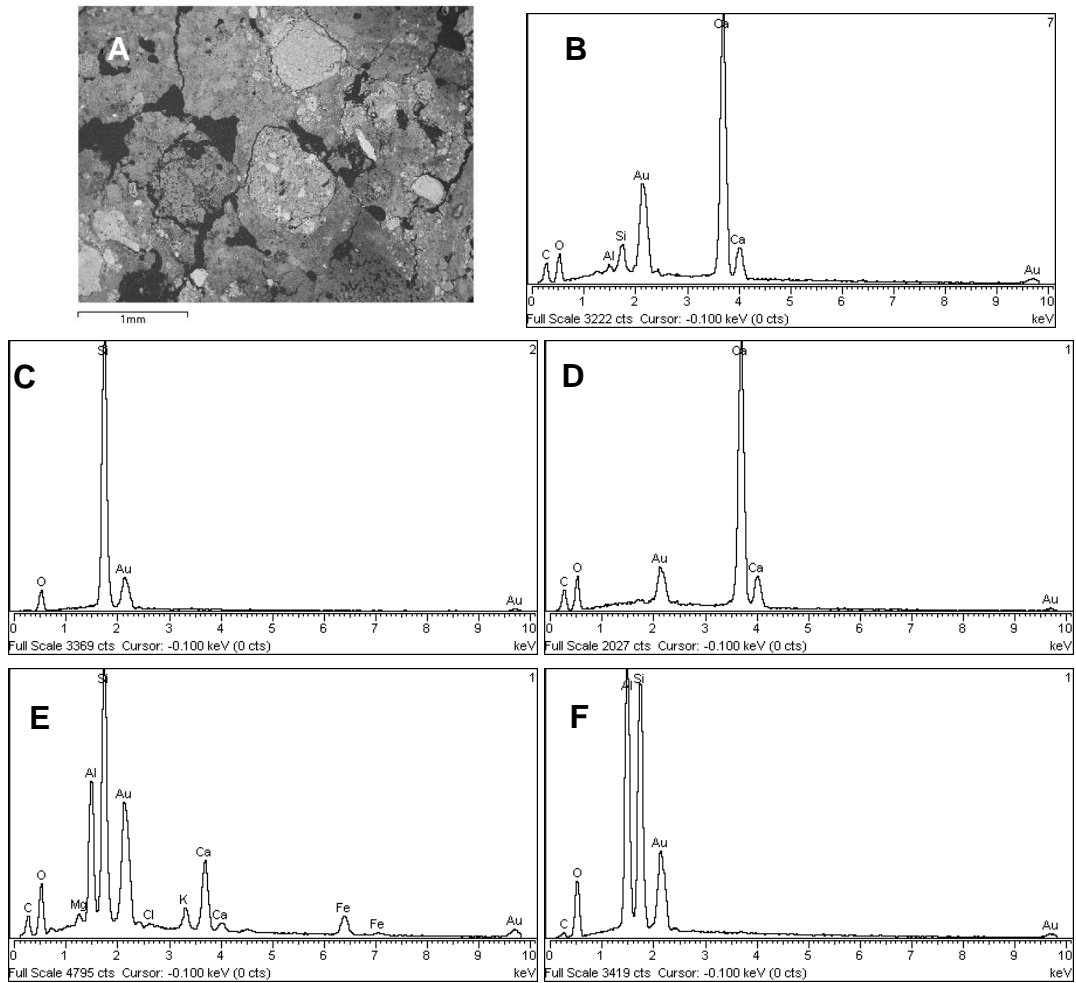


Figura 5.6 Amostra AM10: A - Imagem ao MEV; B – Espetro EDS dum nódulo de cal (cálcica); C – Espetro EDS de quartzo; D – Espetro EDS dum grão de calcário; E – Espetro EDS de feldspato; F – Espetro EDS da mica

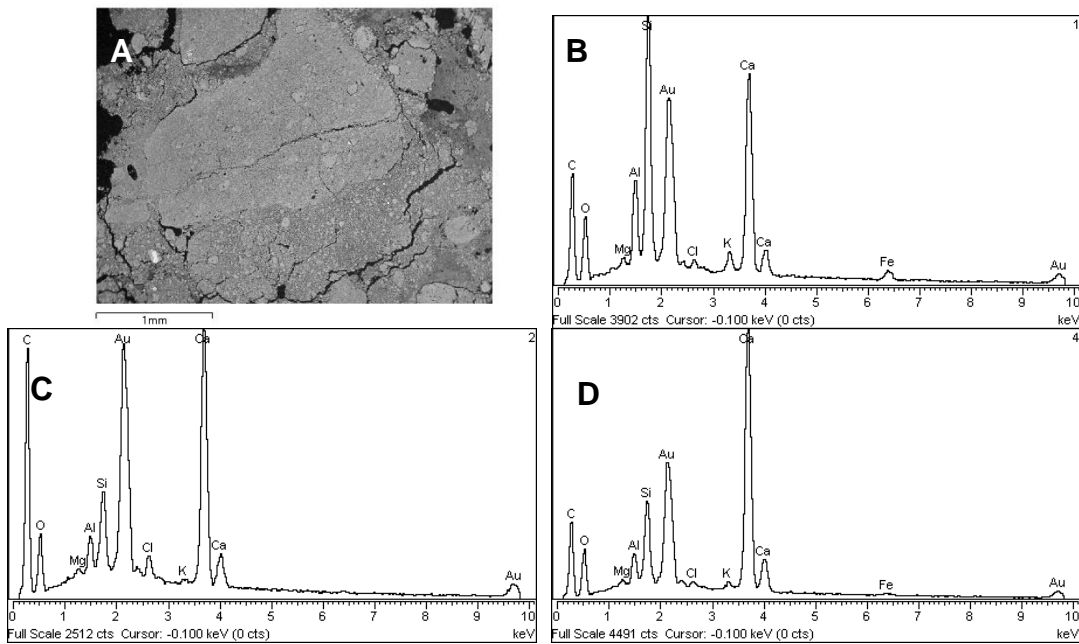


Figura 5.7 Amostra AM10: A - Imagem ao MEV; B – Espetro EDS da pasta do ligante de terra e cal, mas mais rica em terra; C – Espetro EDS da pasta do ligante de terra e cal; D – Espetro EDS da pasta do ligante de terra e cal, mas mais rica em cal

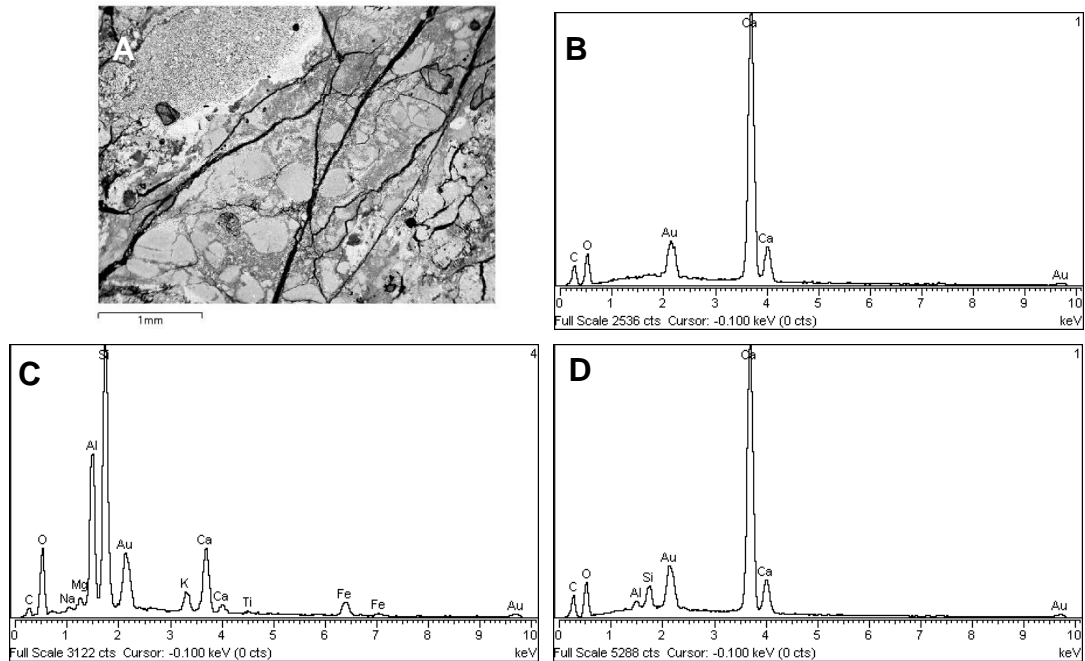


Figura 5.8 Amostra AM11: A - Imagem ao MEV; B – Espetro EDS dum grão de calcário; C – Espetro EDS dum feldspato; D – Espetro EDS dum nódulo de cal cálcica

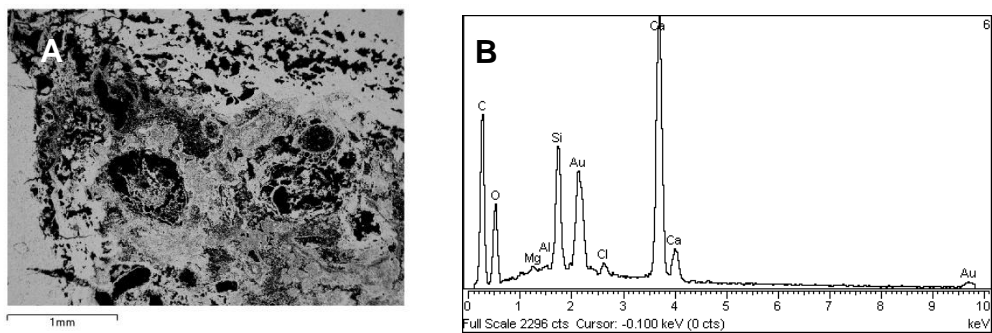


Figura 5.9 Amostra CP2018A: A - Imagem ao MEV; B – Espetro EDS de silicatos de cálcio

A amostra de taipa CP2018B (amostra de taipa da torre) (Figura 5.10) é também bastante rica em cal cálcica, sendo que também apresenta os poros da pasta preenchidos com uma estrutura “rendilhada” de composição semelhante à da amostra CP2018A.

A amostra de taipa CP2018C (amostra de taipa da torre) é igualmente rica em cal mas, ao contrário das duas amostras anteriores da torre, não apresenta os poros preenchidos pelos silicatos de cálcio. A pasta da amostra é heterogénea em termos da relação cal/terra, o que denota ter havido uma insuficiente homogeneização da cal na terra (Figura 5.11).

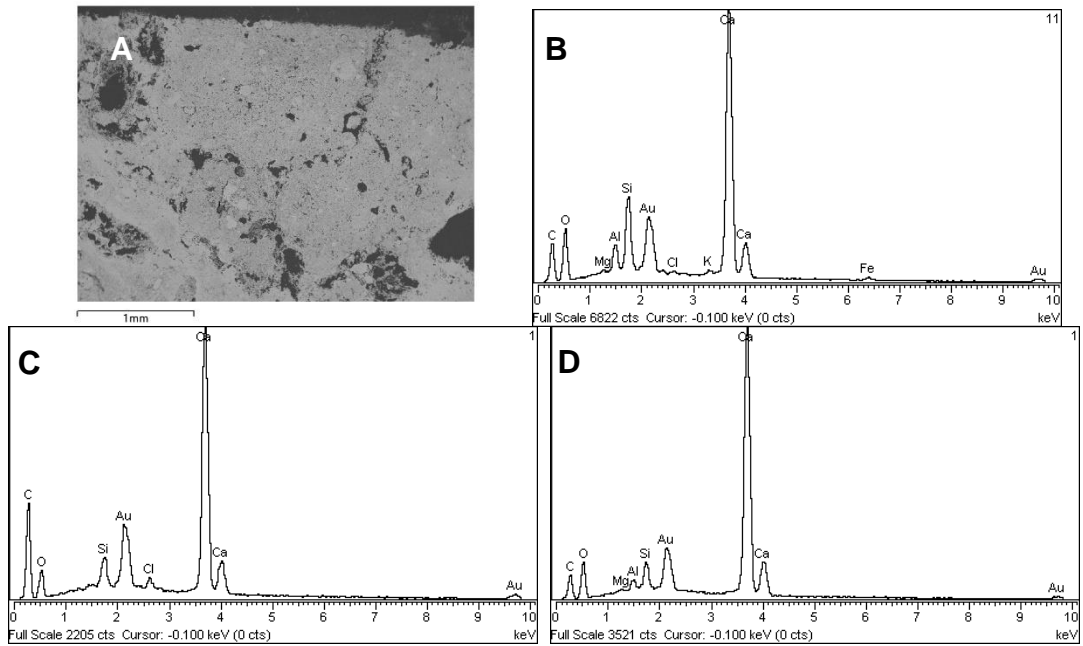


Figura 5.10 Amostra CP2018B: A - Imagem ao MEV; B – Espectro EDS numa zona de pasta rica em cal cálcica; C – Espectro EDS de silicato de cálcio; D – Espectro EDS dum nódulo de cal cálcica

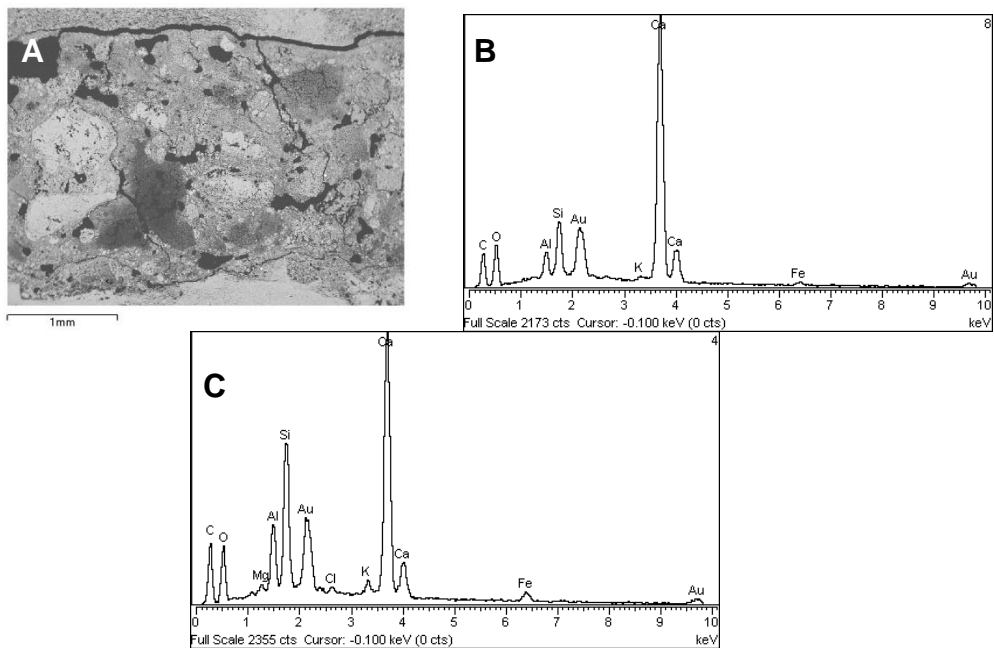


Figura 5.11 Amostra CP2018C: A - Imagem ao MEV; B – Espectro EDS numa zona da pasta do ligante rica em cal cálcica; C – Espectro EDS numa zona de pasta do ligante rica em terra

A amostra de taipa CP2018D (amostra de taipa da torre) é uma amostra com características composicionais e de microestrutura semelhantes à das amostras CP2018A e CP2018B. Para além do silicato de cálcio nos poros, detetaram-se compostos ricos em ferro, provavelmente óxidos e hidróxidos de ferro (Figura 5.12).

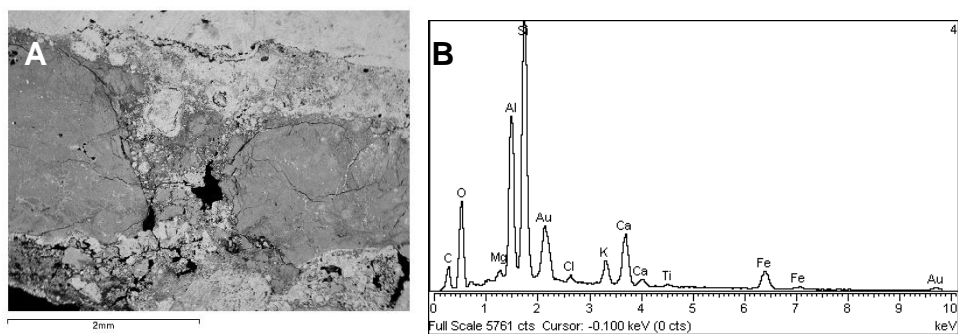
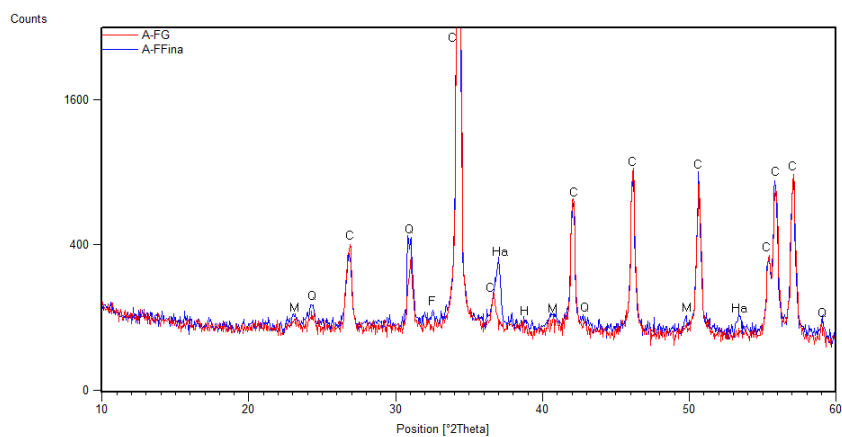


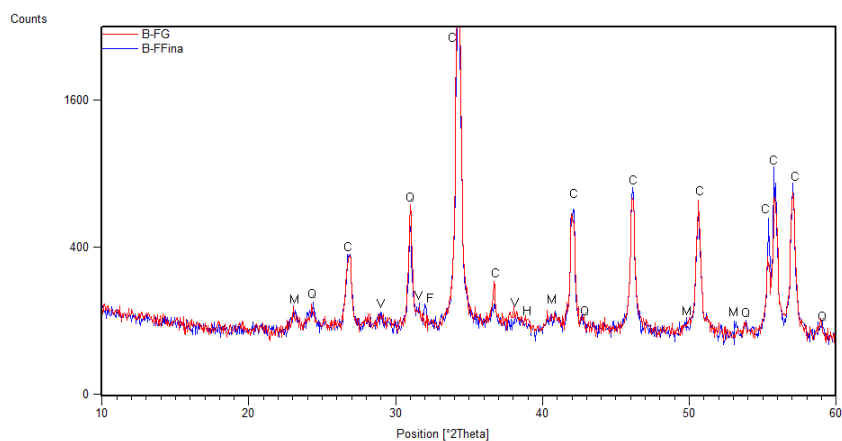
Figura 5.12 Amostra CP2018D: A - Imagem ao MEV; B – Espectro EDS de óxido/hidróxido de ferro

5.2.4 Análise mineralógica por DRX

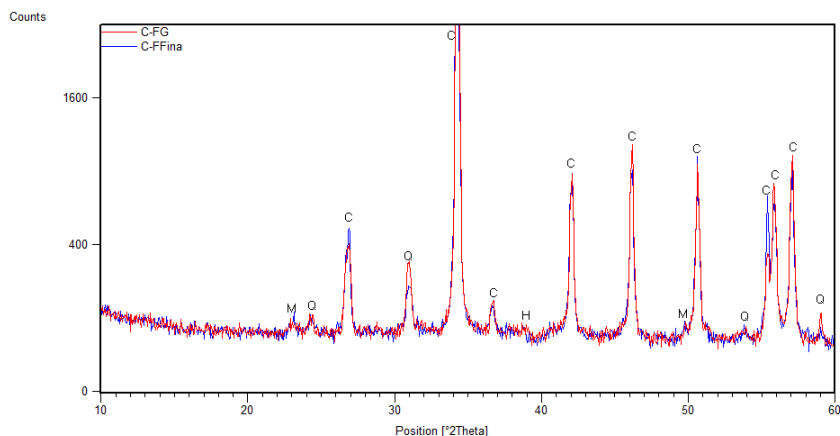
A análise mineralógica por DRX foi efetuada conforme descrito no subcapítulo 4.2.4. Os resultados do ensaio de difração de raios X referentes às várias amostras analisadas, e respectivas frações, apresentam-se na Figura 5.13 a 5.16.



Notação utilizada: M – Mica; Q – Quartzo; C – Calcite; F – Feldspato; Ha – Halite; H – Hematite.
Figura 5.13 – Difratoograma de raios X da amostra CP2018A: Global – vermelho; FFina – azul

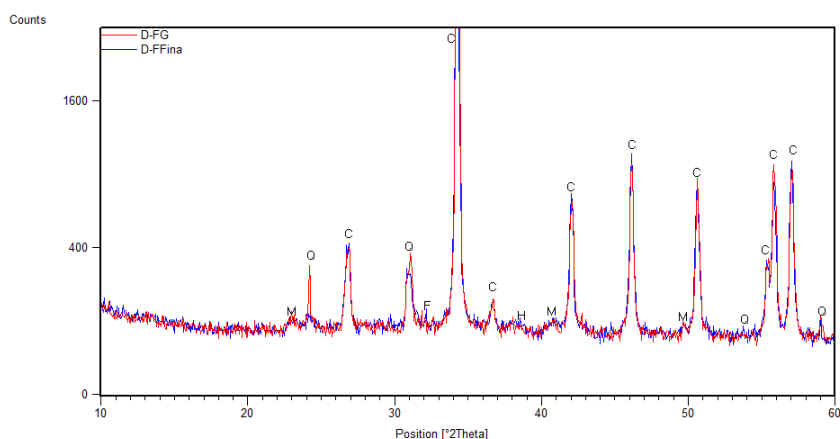


Notação utilizada: M – Mica; Q – Quartzo; C – Calcite; V – Vaterite; F – Feldspato; H – Hematite.
Figura 5.14 Difratoograma de raios X da amostra CP2018B: Global – vermelho; FFina – azul



Notação utilizada: M – Mica; Q – Quartzo; C – Calcite; H – Hematite.

Figura 5.15 Difratoograma de raios X da amostra CP2018C: Global – vermelho; FFina – azul



Notação utilizada: M – Mica; Q – Quartzo; C – Calcite; F – Feldspato; H – Hematite.

Figura 5.16 Difratoograma de raios X da amostra CP2018D: Global – vermelho; FFina – azul

Da análise dos resultados obtidos verifica-se que a composição mineralógica das frações analisadas de cada amostra (respetivamente, global e fração fina) é bastante semelhante, verificando-se o mesmo entre as diferentes amostras. Constata-se ainda que o mineral em maior proporção é a calcite, o que é indicador da presença de grãos calcários no agregado. Detetou-se também a presença de quartzo e feldspatos, minerais presentes em areias siliciosas, e ainda de mica (possivelmente ilite) e de óxidos de ferro (hematite e magnetite), compostos que são usuais em amostras de solo.

A salientar a presença de halite (NaCl) na fração fina da amostra CP2018A, e de vaterite (CaCO₃) na amostra CP2018B. A presença de halite (cloreto de sódio) traduz a presença de sais solúveis de cloretos. Sendo a amostra CP2018A da base da torre exposta a nordeste, que está perto da muralha, esta presença poderá dever-se a fenómenos de contaminação a partir dos ventos que sopram do oceano Atlântico ou por fenómenos de ascensão capilar. A presença de vaterite, um polimorfo de CaCO₃, distinto da calcite, traduz a existência de fenómenos de dissolução e recristalização de carbonatos de cálcio, devido à ação da água. Na Tabela 5.2 apresenta-se a composição mineralógica das várias amostras analisadas.

Tabela 5.2 Composição mineralógica obtida por DRX das amostras de taipa da torre

Compostos cristalinos identificados	CP2018A		CP2018B		CP2018C		CP2018D	
	FG	FF	FG	FF	FG	FF	FG	FF
Quartzo (SiO₂)	+	+ / ++	+	+	+	vtg/+	+	+
Feldspatos ((K,Na,Ca)AlSi₃O₈)	vtg	vtg/+	vtg	vtg/+	vtg	vtg	vtg	vtg
Mica (moscovite - KAl₂(SiAl)O₁₀(OH, F)₂; biotite - K(Mg, Fe)₃(SiAl)O₁₀(OH)₂)	vtg	vtg/+	vtg	vtg/+	vtg	vtg	vtg	vtg
Maghemite (Fe₂O₃) e/ou Magnetite (Fe₃O₄)	?	?	?	?	?	?	?	?
Hematite (Fe₂O₃)	vtg	vtg/+	vtg	?	vtg	vtg	?/vtg	?/vtg
Calcite (CaCO₃)	+++	++/+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++
Vaterite (CaCO₃)	-	-	vtg	vtg/+	-	-	-	-
Halite (NaCl)	-	+	-	-	-	-	-	-

Notação utilizada: +++ mineral predominante; ++ proporção média; + existe em fraca proporção; vtg vestígios; ? duvidas na presença ou na identificação; - não identificado; FF fração fina; FG fração global.

Na Tabela 5.3 apresentam-se os resultados de DRX obtidos para amostras de taipa da muralha, ensaios esses efetuados anteriormente pelo LNEC (Santos Silva 2001). Como se constata, a calcite é o mineral presente em maior proporção. No entanto, há a registrar vestígios da presença de montmorilonite, um mineral de argila do grupo das esmectites e que tem características expansivas, além dos compostos de alteração halite e weddellite (oxalato de cálcio hidratado).

Tabela 5.3 Composição mineralógica DRX das amostras de taipa da muralha (Santos Silva 2001)

Compostos cristalinos identificados	Taipa AM10		Taipa AM11	
	FG	FF	FG	FF
Quartzo (SiO₂)	vtg/+	vtg/+	vtg	vtg
Feldspatos ((K,Na,Ca)AlSi₃O₈)	vtg	?	?	?
Mica (moscovite - KAl₂(SiAl)O₁₀(OH, F)₂; biotite - K(Mg, Fe)₃(SiAl)O₁₀(OH)₂)	?	?	?	vtg
Caulinite e/ou clorite (Mg,Fe)₃(Si,Al)₄O₁₀(OH)₂·(Mg,Fe)₃(OH)₆	-	-	?	vtg
Esmectite (montmorilonite - (Na,Ca)_{0,3}(Al,Mg)₂Si₄O₁₀(OH)₂·nH₂O)	-	-	vtg	vtg/+
Hematite (Fe₂O₃)	-	-	?	vtg
Calcite (CaCO₃)	+++ +	+++ +	++ +	+++
Weddellite (CaC₂O₄·2H₂O)	-	-	-	+
Halite (NaCl)	-	-	vtg	vtg

Notação utilizada: ++++ mineral predominante; +++ proporção relativamente elevada; ++ proporção média; + existe em fraca proporção; vtg vestígios; ? duvidas na presença ou na identificação; não identificado; FF fração fina; FG fração global.

Em termos de dados de composição mineralógica de amostras de taipa militar há ainda a registrar os dados referentes à análise duma amostra do Castelo de Silves pelo LNEC (Cravo 1989). Nessa amostra o quartzo e a calcite foram os minerais identificados em maior proporção, e ainda feldspatos, mica, clorite, brucite e dolomite em proporções inferiores. Comparativamente com as amostras do Castelo de Paderne, a amostra de Silves tem uma maior predominância de quartzo, o que traduz uma diferença em termos do tipo de agregados utilizados nesta fortificação, o que está relacionado com o emprego de fragmentos de rocha de grés de Silves, de tijolo e de siltito.

5.2.5 Análises por ATG/DTG/ATD

As análises ATG/DTG/ATD foram efetuadas conforme descrito no subcapítulo 4.2.5 e os seus resultados para as quatro amostras analisadas são apresentados nos gráficos das Figura 5.17 a 5.20.

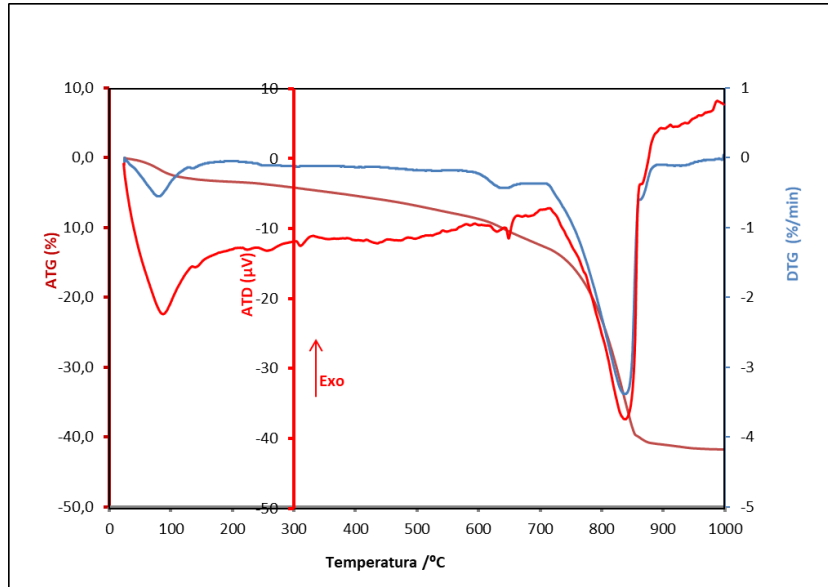


Figura 5.17 Curva ATG/DTG/ATD da amostra de taipa CP2018A

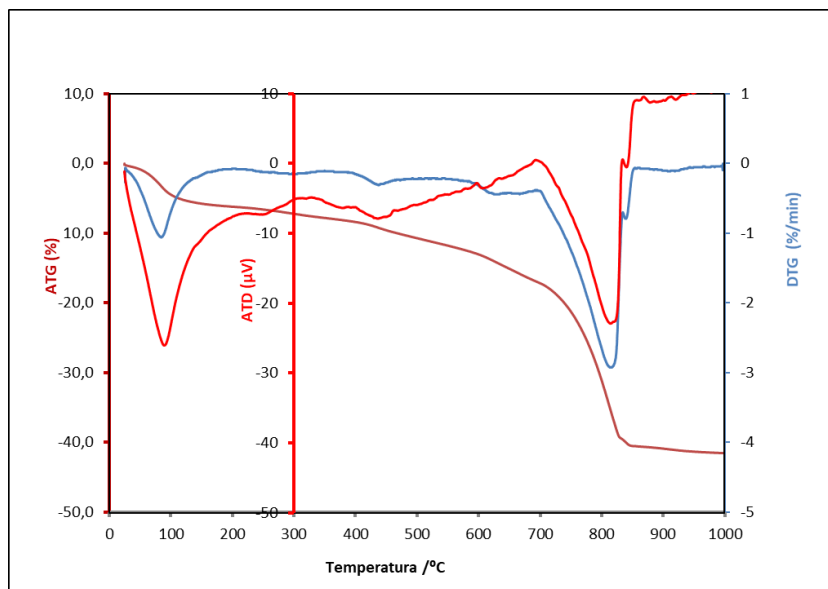


Figura 5.18 Curva ATG/DTG/ATD da amostra de taipa CP2018B

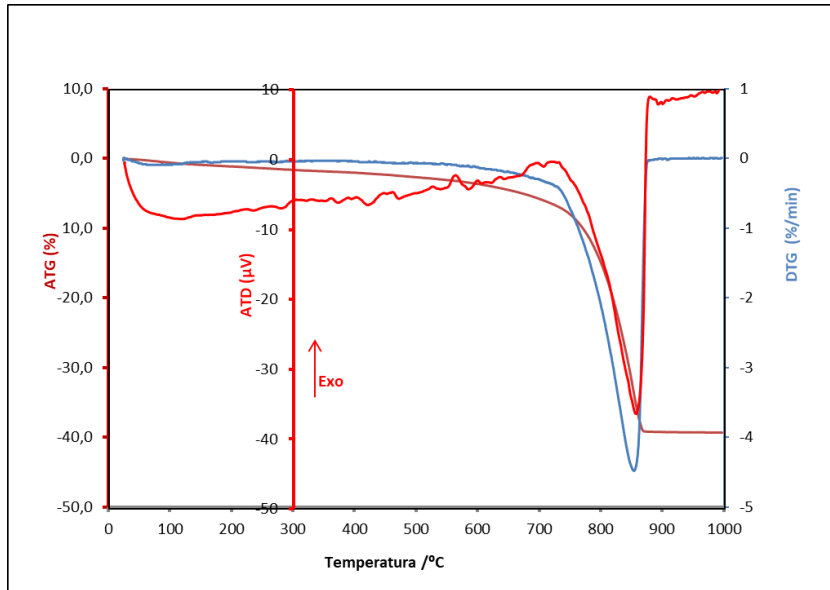


Figura 5.19 Curva ATG/DTG/ATD da amostra de taipa CP2018C

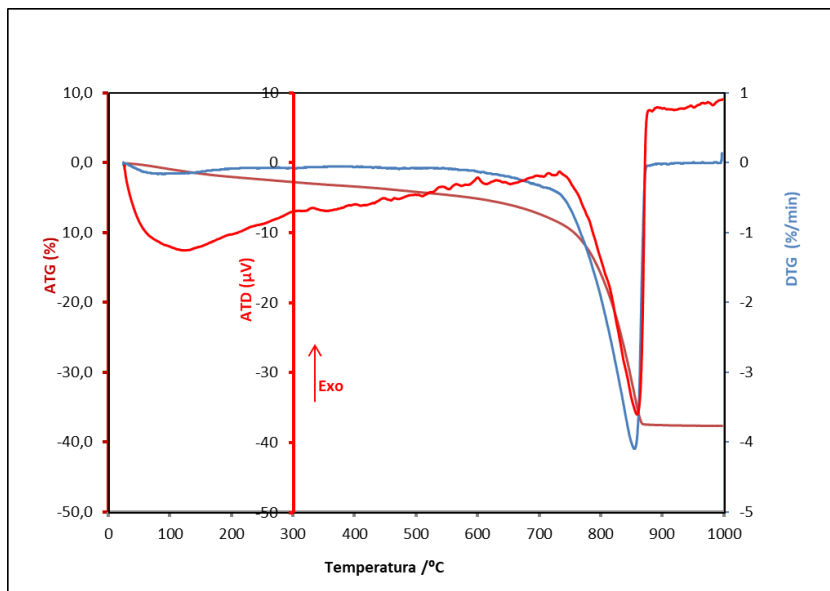


Figura 5.20 Curva ATG/DTG/ATD da amostra de taipa CP2018D

Da análise das curvas ATG/DTG/ATD verifica-se a existência de 3 gamas de temperatura onde se registam perdas de massa:

- 25 a 200 °C – zona de perda de água de humidade e da decomposição de eventuais compostos hidráulicos;
- 200 a 500 °C – zona de perda devida à perda de água da desidroxilação de minerais de argila e de compostos hidratados de ferro;
- 500 a 900 °C – zona de perda devida à descarbonatação de carbonatos.

A principal perda de massa ocorreu na gama entre os 500 e 900° C, o que indica a presença em grande abundância de carbonatos, nomeadamente de carbonato de cálcio com base na informação da DRX.

Na Tabela 5.4 apresentam-se as perdas de massa obtidas nas 3 gamas de temperatura consideradas, bem como o teor (% em massa) de calcite calculado a partir da perda de massa entre 500 e 900 °C. Nessa Tabela é apresentado ainda o valor da perda ao rubro, e que corresponde ao valor da perda de massa entre a temperatura ambiente e 1000 °C.

Tabela 5.4 Perdas de massa obtidas por ATG para as amostras de taipa da torre

Amostras	Gamas de temperatura (°C)			Perda ao rubro	Teor calculado de calcite (%)
	25-200	200-550	550-900		
CP2018A	3,43	4,35	33,33	41,81	75,8
CP2018B	6,17	5,57	29,13	41,52	66,2
CP2019C	1,12	1,94	36,19	39,35	82,3
CP2018D	2,01	2,57	33,03	37,73	75,1

Tendo em conta os resultados obtidos em anteriores campanhas experimentais (Santos Silva 2001), nomeadamente das análises da taipa das muralhas do Castelo de Paderne (Tabela 5.5), verifica-se que o teor de calcite nas amostras de taipa da torre indicia ser ligeiramente inferior ao das muralhas, sendo que as perdas ocorridas devem-se sobretudo à calcite. As perdas de massa associadas às restantes duas gamas de temperatura são, em termos médios, maiores para a taipa da torre, o que traduz a existência de compostos hidratados em maior quantidade nessas amostras do que nas da muralha do Castelo.

Na Tabela 5.5, verifica-se que o teor de calcite entre as duas amostras é semelhante, no entanto a perda de massa associada à gama de temperaturas entre os 550 e os 900 °C apresenta valores distantes entre si, devendo-se ao facto do valor de CaCO₃ da amostra AM11 estar corrigido para ter em conta os agregados calcários grossos que foram retirados da amostra.

Tabela 5.5 Perdas de massa obtidas por ATG de amostras de argamassa e de taipa da muralha (Santos Silva 2001)

Amostras	Gamas de temperatura (°C)			Teor calculado de calcite (%)
	25-200	200-550	550-900	
AM10	0,9	1,7	36,5	83
AM11	6,2	7,9	25,4	88

5.2.6 Resíduo insolúvel

A determinação do resíduo insolúvel (RI) foi efetuada na fração global de cada amostra, de acordo com o procedimento descrito no subcapítulo 4.2.6, estando os resultados obtidos apresentados na Tabela 5.6.

Ao analisar os valores obtidos para o resíduo insolúvel pode-se verificar que os valores em questão são reduzidos, característica comum noutras amostras de taipa militar (Tabela 5.7), e que se atribuiu ao emprego em grande percentagem de agregados calcários que se dissolvem em contacto com o ácido.

As amostras pertencentes à torre, analisadas em por Santos Silva (2001), apresentam um teor de calcite mais elevado, analisado no subcapítulo 5.2.4, e por consequente, o valor de resíduo insolúvel é ainda mais baixo.

Tabela 5.6 Resultados do resíduo insolúvel para as amostras de taipa da torre do Castelo de Paderne

Amostras	RI [%]	Média [%]	Desvio Padrão [%]
CP2018A	8,99	9,01	0,03
	9,03		
CP2018B	14,82	15,03	0,29
	15,23		
CP2018C	11,38	11,39	0,01
	11,40		
CP2018D	13,30	13,51	0,30
	13,72		

Tabela 5.7 Resultados do resíduo insolúvel de amostras de taipa militar

Amostras	Resíduo insolúvel %
Silves (Cravo 1989)	26
AM10 (Santos Silva 2001)	11
AM11 (Santos Silva 2001)	10

Analisando o teor de calcite e o resíduo insolúvel (Tabelas 5.4 e 5.6), verifica-se que quanto mais elevado é o teor de calcite, mais reduzido é o valor de resíduo insolúvel. Isto prende-se com o facto do resíduo solúvel corresponder em maior proporção a agregados calcários e compostos de cálcio.

5.2.7 Análise granulométrica por ataque de ácido

Tal como descrito no subcapítulo 4.2.7 a análise granulométrica do agregado fino (areia), inferior a 5 mm, foi efetuada para as amostras recolhidas na torre no presente ano. Esta determinação foi efetuada tendo em conta a presença de agregados calcários, sendo que as amostras foram atacadas por uma solução de ácido clorídrico muito diluído. Os valores obtidos estão presentes na Tabela 5.8 e Figura 5.21.

Tabela 5.8 Resultados da análise granulométrica do agregado: valores de material retido e passado para as amostras de taipa da torre

Identificação da amostra	CP2018A		CP2018B		CP2018C		CP2018D	
	% material retido	% material que passa	% material retido	% material que passa	% material retido	% material que passa	% material retido	% material que passa
5	19,88	80,12	19,27	80,73	23,76	76,24	52,81	47,19
2,5	10,64	69,47	4,26	76,47	7,68	68,56	7,73	39,45
1,25	7,43	62,04	2,08	74,39	4,16	64,39	3,78	35,67
0,63	7,12	54,92	1,69	72,70	3,49	60,90	3,78	31,89
0,315	6,94	47,98	4,83	67,86	6,72	54,19	6,35	25,55
0,16	7,60	40,38	10,30	57,57	10,24	43,95	5,17	20,38
0,075	7,12	33,26	12,20	45,36	7,89	36,06	3,31	17,07
0	33,26	0,00	45,36	0,00	36,06	0,00	17,07	0,00

Com a análise das curvas granulométrica verifica-se que a amostra CP2018D é a que mais se distingue das restantes, sendo aquela que apresenta maior percentagem de grossos (> 5 mm) e menor quantidade de material argiloso (< 0.075 mm). As restantes amostras de taipa são, também em termos da dimensão do tamanho do agregado, relativamente semelhantes.

Após a separação granulométrica, procedeu-se à observação e registo fotográfico à lupa binocular das diferentes frações, estando essa informação apresentada no Anexo C.

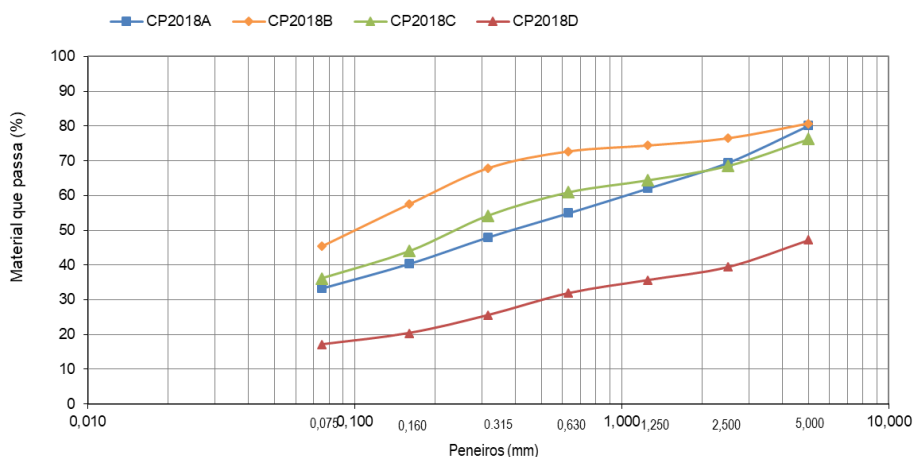


Figura 5.21 Curvas da distribuição granulométrica do agregado fino nas amostras de taipa da torre

5.2.8 Determinação do traço das amostras de argamassa e de taipa

Com a realização dos ensaios químicos foi possível determinar a composição ponderal das várias amostras analisadas (Tabela 5.9).

Tabela 5.9 Composição ponderal das amostras de taipa da torre

Amostras	Cal carbonatada (CaCO ₃) ¹	Areia sílica ²	Agregado calcário ³	Terra (argila + silte) ⁴	Traço em massa			
					Agregado calcário	Areia sílica	Silte + Argila	Cal cálcica hidratada
CP2018A	9,2	9,0	66,5	33,3	10	1	5	1
CP2018B	8,8	15,0	57,4	45,4	9	2	7	1
CP2018C	20,4	11,4	61,8	36,1	5	1	3	1
CP2018D	15,2	13,5	59,9	17,1	5	1	1,5	1

1 – Teor de carbonatos obtido por ATG e subtraído do teor de agregado calcário; 2 – Teor de resíduo insolúvel em ácido; 3 – Teor de agregado determinado por ataque ácido seletivo e subtraído do teor de areia; 4 – Teor de material que passou no peneiro de 75 µm.

Como se constata, as amostras CP2018A e CP2018B têm uma composição muito similar, o mesmo se passa entre as amostras CP2018C e CP2018D e que são mais ricas em ligante que as precedentes.

Já as amostras analisadas anteriormente no LNEC, por Santos Silva (2001), apresentam uma composição ponderal (Tabela 5.10) com maior heterogeneidade composicional.

Em relação às amostras da torre caracterizadas no presente trabalho, o teor de agregado calcário, areia siliciosa e material argiloso é superior ao teor de cal calculado. As amostras de taipa das muralhas apresentam uma menor quantidade de areia siliciosa e material argiloso e uma maior quantidade de agregado calcário, face ao teor de cal.

Tabela 5.10 Composição ponderal das amostras de taipa da muralha (Santos Silva 2001)

Amostras	Traço em massa		
	Agregado calcário	Areia siliciosa + Silte + Argila	Cal cálcica hidratada
AM10	2	0,5	1
AM11	8	1	1

O teor de ligante nas amostras da torre analisadas (Tabela 5.9) é semelhante ao teor de ligante utilizado na intervenção de 2017/18 (Tabela 3.1), o que mostra que para a formulação da taipa nova foi tida em atenção não só o aspeto visual, mas também os seus constituintes e respetivas proporções.

Em geral, as amostras do Castelo de Paderne apresentam nódulos de cal de dimensões significativas, o que indica que será provável que a taipa militar original tivesse sido produzida através da mistura de terra húmida (constituída por frações finas a grossas - de argila, silte, areia, cascalho) com óxido de cálcio resultante da cozedura de calcário, ao invés da aplicação na forma de pasta de Ca(OH)_2 . A ter sido dessa forma, a hidratação da cal ocorreu “a quente”, garantindo uma boa ligação à terra pela ação caústica da cal viva na sua hidratação. Por outro lado, o teor de cal viva introduzido na formulação terá resultado num teor mais elevado de cal hidratada, contribuindo para uma maior compacidade da taipa. É provável que os grânulos encontrados tivessem resultado de cal viva não hidratada inicialmente na mistura mas que, ao longo do tempo, acabaram por se hidratar e carbonatar.

5.3 Caracterização física e mecânica

Os resultados obtidos na campanha experimental de caracterização física e mecânica são apresentados em seguida, sendo sempre que possível comparados com resultados obtidos por outros autores a amostras da mesma construção ou de construções semelhantes.

5.3.1 Massa volúmica aparente

A massa volúmica aparente foi determinada segundo descrito no subcapítulo 4.3.1. Para a determinação da massa volúmica aparente das amostras foi necessário determinar a baridade da areia fina utilizada. Para tal foram efetuadas três medições chegando a um valor de baridade de 1385,4 kg/m³. No Anexo D são apresentados em detalhe os valores obtidos para a baridade da areia.

Os resultados obtidos na determinação da massa volúmica aparente estão apresentados na Tabela 5.11.

Verifica-se que a média da massa volúmica das amostras da torre é superior às pertencentes à muralha e ao assentamento de alvenaria da ermida (Tabela 5.11), possivelmente devido à utilização de agregados de maior dimensão na execução da torre ou a algum produto consolidante que possa ter sido aplicado – pois embora não se saiba qual nem quando, teve-se acesso oral a informação de que toda a superfície (da torre mas talvez não só) foi hidrofugada.

No que diz respeito às amostras pertencentes à muralha, a amostra AM10 apresenta um valor de massa volúmica aparente semelhante aos valores obtidos para as argamassas de assentamento. Embora sejam amostras de tecnologias construtivas distintas, esta semelhança pode estar diretamente ligada com a percentagem de calcite, sendo que os nódulos de cal apresentam uma massa volúmica mais baixa.

Tabela 5.11 Resultados da massa volúmica aparente obtida

Zona	Amostra	Massa volúmica [kg/m ³]	Média [kg/m ³]	Desvio Padrão [kg/m ³]
Argamassas de assentamento	AM4	1436,3	1453,4	24,1
	AM6	1470,4		
Muralha	AM10	1545,3	1675,3	183,9
	AM11	1805,3		
Torre	CP2018B	1958,7	1873,5	104,0
	CP2018C	1757,6		
	CP2018D	1904,2		

Comparando os resultados obtidos em construções de taipa corrente na região do Alentejo por Gomes (2013) (Tabela 5.12) e Silva (2013) (Tabela 5.13), verifica-se que os valores obtidos para as amostras do Castelo de Paderne são inferiores. Isto pode dever-se à adição de cal na sua composição, aparentemente, quanto maior o teor de cal, menor a massa volúmica das amostras.

Tabela 5.12 Massa volúmica de amostras de taipa corrente recolhidas em três construções antigas no Alentejo (adaptado de Gomes 2013)

Amostra	Massa volúmica [kg/m ³]			
	amostras entre 150 - 200 g		amostras entre 350 - 400 g	
	Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão
MAV	2222	32	2276	102
MPD	2008	47	2041	303
MVC	2089	171	1694	19

Tabela 5.13 Massa volúmica de amostras de taipa corrente recolhidas na região do Alentejo (adaptado de Silva 2013)

Amostra	Massa volúmica [kg/m ³]
S1	2060
S2	2070
S3	1840
S4	2120

Tendo em conta a Tabela 5.4, a amostra CP2018B apresenta um teor de calcite de 66% e a amostra CP2018D um teor de calcite de 75%, sendo a primeira a que apresenta uma maior massa volúmica aparente. Além da influência do teor de calcite, a diferença poderá dever-se aos agregados (seu tipo e granulometria), que podem ser distintos.

Comparando com os resultados de Faria et al. (2012), que realizaram análises em taipa com diferentes tipos de terra em que foi adicionada cal hidráulica ou foi peneirado o material para remoção de agregados

de maior dimensão (Tabela 5.14), verifica-se que os resultados obtidos são da mesma ordem de grandeza dos resultados obtidos com as amostras de taipa da torre do Castelo de Paderne.

Tabela 5.14 Massa volúmica de provetes reproduzindo taipas correntes (adaptado de Faria et al. 2012)

Amostra	Massa volúmica [kg/m ³]
A	1905
A (peneirada)	2003
B + hl	1950
C + hl	1846
D + hl	1874

Nota: hl – hydraulic lime

Comparando os valores de massa volúmica de argamassas de terra obtidos por Gomes et al. (2014a) (Tabela 5.15) e, Faria (2018) (Tabela 5.16), e por Ribeiro et al. (2016) (Tabela 5.17) para blocos de terra comprimida, verifica-se que os valores determinados para as amostras de taipa recolhidas no Castelo de Paderne são bastante similares aos valores dos blocos de terra comprimida e as amostras de argamassas de terra e ligeiramente superiores às argamassas de cal com terra.

Tabela 5.15 Massa volúmica de provetes de argamassas de terra (adaptado de Gomes et al. 2014a)

Material	Massa volúmica [kg/m ³]
Terra	1872
Terra com cal aérea	1854-1873
Terra com cal hidráulica	1878-1880

Tabela 5.16 Massa volúmica provetes de argamassas de cal com terra (adaptado de Faria 2016)

Material	Massa volúmica [kg/m ³]
CL2_5t (substituição de 5% de cal por terra)	1552
CL2_10t (substituição de 10% de cal por terra)	1560
CL2_25t (substituição de 25% de cal por terra)	1576
CL2_50t (substituição de 50% de cal por terra)	1579

Tabela 5.17 Massa volúmica de blocos de terra comprimida estabilizados com cimento (adaptado de Ribeiro et al 2016)

Amostra	Massa volúmica [kg/m ³]
BTC	1800

5.3.2 Dureza superficial

A dureza superficial foi obtida segundo descrito no subcapítulo 4.3.2 e os resultados obtidos são apresentados na Figura 5.22. É apresentada a média e respetivo desvio padrão de um total de oito medições por amostra. No Anexo D são apresentados os valores obtidos de dureza superficial de cada uma das amostras.

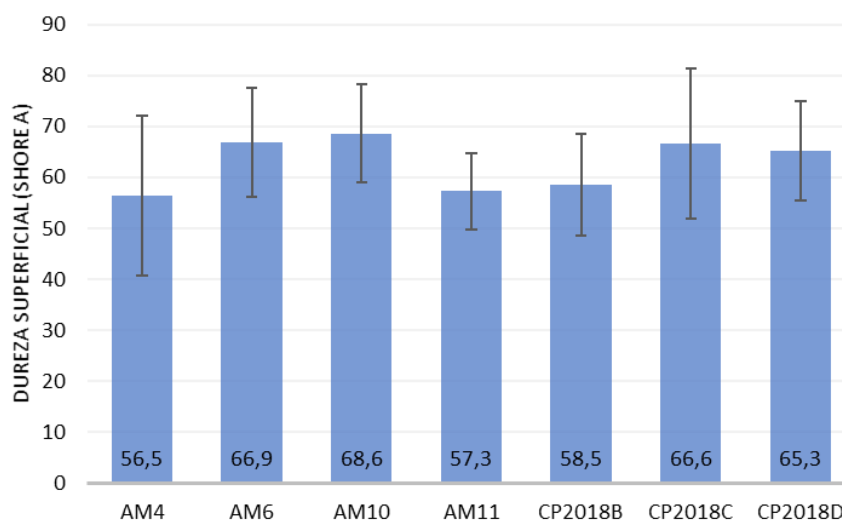


Figura 5.22 Resultados da dureza superficial Shore A de amostras de argamassa e de taipa militar

Os resultados obtidos mostram que a mesma amostra pode apresentar valores de dureza superficial bastante diversificados; isto deve-se ao facto da sua superfície e da sua composição ser irregular. Um ponto de medição poderá encontrar-se sobre um agregado enquanto outro ponto de medição poderá estar sobre um nódulo de cal, o que resulta num valor de dureza superficial mais baixo.

Os valores obtidos não apresentam uma grande discrepância no que diz respeito às amostras ensaiadas; no entanto, a gama de valores obtida para cada amostra é elevada, o que se traduz num valor de desvio padrão igualmente elevado.

Observando os valores obtidos na Figura 5.22 verifica-se que as amostras que apresentam uma dureza superficial mais baixa correspondem às amostras AM4 e AM11, e as amostras que apresentam uma dureza superficial mais elevada são as amostras AM6 e AM10. Verifica-se que a massa volúmica das amostras não influencia o valor obtido de dureza superficial.

Comparando os resultados obtidos para os valores de dureza superficial por Ferreira (2007a) em construções de taipa corrente da zona de Leiria/Pombal (Tabela 5.18), é possível verificar que os valores obtidos para o Castelo de Paderne são ligeiramente superiores. Relativamente às argamassas de reboco e de assentamento de alvenaria da ermida, os valores médios obtidos são inferiores às amostras de taipa da torre. Isto pode dever-se à taipa de torre ter agregados de maior dimensão sobre os quais alguns dos ensaios podem ter sido executados; por outro lado, pode dever-se ao facto de argamassas de terra por vezes apresentarem menor resistência mecânica quando estabilizadas com baixo teor de cal (Santos et al. 2017).

Tabela 5.18 Dureza superficial Shore A de amostras de taipa corrente (Ferreira 2017a)

Amostra	Dureza superficial [Shore A]	
	Média	Desvio Padrão
T1	56,28	14,72
T2	51,04	14,55
T3	48,52	15,59

5.3.3 Módulo de elasticidade dinâmico

O ensaio de determinação do módulo de elasticidade dinâmico foi realizado consoante descrição no subcapítulo 4.3.3 e, tal como dito anteriormente, devido à grande porosidade e grande heterogeneidade dos materiais presentes na taipa, o ensaio é pouco conclusivo.

Os resultados obtidos para cada amostra estão apresentados na Figura 5.23, sendo que se encontram em maior detalhe no Anexo D.

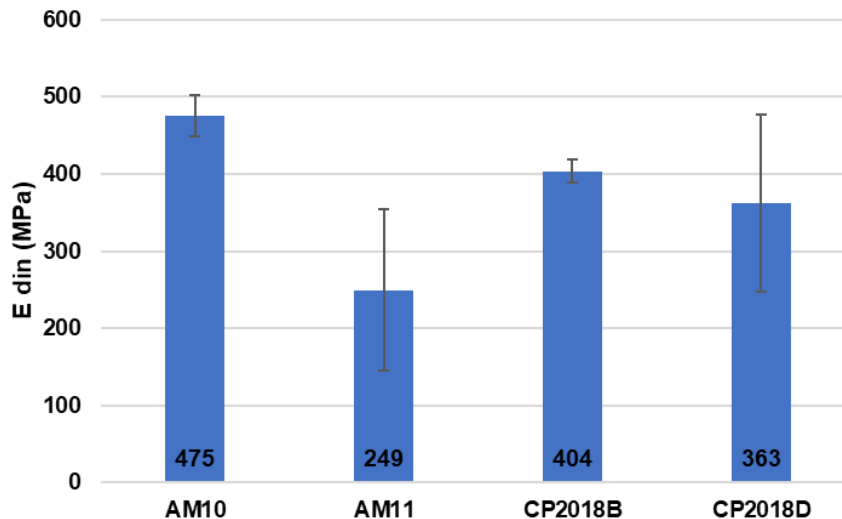


Figura 5.23 Resultados do módulo de elasticidade dinâmico de amostras de taipa militar

Analisado os resultados obtidos para o módulo de elasticidade dinâmico verifica-se que os resultados são bastante dispares, sendo que a amostra que apresenta uma maior média corresponde a uma amostra da muralha AM10 e a que apresenta uma menor média corresponde igualmente a uma amostra da muralha AM11.

O módulo de elasticidade dinâmico apresenta valores bastante dispares. Tal pode dever-se à heterogeneidade das amostras e à fissuração interna que apresentam, que se confirmou pela observação ao microscópio petrográfico e ao MEV.

Comparando com o resultado obtido em construções de taipa corrente por Braga e Estevão (2012) de 256 N/mm², verifica-se que os resultados determinados para a taipa do Castelo e as suas muralhas é bastante superior.

5.3.4 Abrasão a seco

O ensaio de abrasão a seco foi realizado tal como descrito no subcapítulo 4.3.4. Foram realizados ensaios em duas amostras pertencentes à muralha e três amostras pertencentes à torre, após a realização do ensaio foram registadas as perdas de massa, que são apresentadas na Tabela 5.19, sendo que no Anexo D estão apresentados os valores obtidos com maior detalhe.

Verifica-se que as amostras apresentam uma perda de massa na ordem dos 2%, sendo que as amostras que apresentam uma maior perda de massa correspondem a amostras da muralha, amostras estas que apresentam um maior teor de calcite em comparação com as restantes.

Tabela 5.19 Resultados de perda de massa por abrasão a seco de amostras de taipa militar

Amostra	Perda de massa [g]	perda de massa [%]
AM10	15,8	2
AM11	23,6	2
CP2018B	3,7	0
CP2018C	6,9	1
CP2018D	5,6	1

De qualquer modo, todas as amostras apresentaram boa coesão, uma vez que o ensaio não se revelou destrutivo, não sendo visíveis danos provocados pela escova no decorrer do ensaio. Estes resultados co-ordenam-se com o bom comportamento apresentado pela taipa do Castelo ao longo dos séculos face à ação do vento com partículas em suspensão e dos visitantes que se encostam a essa taipa.

5.3.5 Resistência à compressão

O ensaio de resistência à compressão foi efetuado segundo o procedimento descrito no subcapítulo 4.3.5, sendo as amostras ensaiadas pertencentes à torre e à muralha do Castelo de Paderne. Os resultados obtidos para as duas zonas estão presentes na Tabela 5.20.

Analisando os valores obtidos para a resistência à compressão da torre e da muralha é possível verificar que a muralha apresenta um valor superior de resistência (1,78 N/mm²) em comparação com a torre (1,23 N/mm²). Esta discrepância de resultados poderá dever-se ao facto que as amostras analisadas da torre apresentarem um pior estado de degradação (as amostras analisadas são anteriores à intervenção da torre no presente ano). Verifica-se que o valor obtido para a resistência à compressão aumenta com a diminuição da massa volúmica das amostras, e diminui com o aumento da dureza superficial das mesmas. Verifica-se igualmente que, quanto menor o valor obtido para o resíduo insolúvel, maior o valor de resistência à compressão.

Tabela 5.20 Resultados de resistência à compressão de amostras de taipa militar

Amostra	Rc (N/mm ²)	Média	Desvio padrão
AM10	1,69	1,78	0,22
AM11	1,62		
AM11	2,04		
CP2018D	1,18	1,23	0,18
CP2018D	1,08		
CP2018D	1,43		

Comparando os resultados obtidos para o valor de resistência à compressão para a taipa da torre e da muralha com construções de taipa correntes analisadas por outros autores (Mateus et. al 2005) (Tabela 5.21), pode-se verificar que os valores obtidos, na sua maior parte, são inferiores aos valores para a resistência à compressão no Castelo de Paderne.

Braga e Estêvão (2012) ao realizarem ensaios de compressão em muretes de taipa tradicional, registaram resistência à compressão de 0,87 N/mm², valor este inferior ao obtido para a taipa militar ensaiada.

Ribeiro et al. (2016) ao realizarem ensaios de compressão em amostras de blocos de terra comprimida, registaram resistência à compressão de 1,38 N/mm², valor este semelhante aos valores obtidos para a taipa militar ensaiada.

Tabela 5.21 Resistência à compressão de amostras de taipa corrente (Mateus et. al 2005)

Amostra	Área (mm ²)	Força (N)	Resistência à compressão (N/mm ²)		
			Rc	Média	Desvio Padrão
Sesmarias 1T	1782,0	2415	1,36	1,15	0,35
Sesmarias 2T	1820,0	2449	1,35		
Sesmarias 3T	1803,0	1336	0,74		
Arão 1T	1629,0	1957	1,20	1,25	0,16
Arão 2T	1785,0	2007	1,12		
Arão 3T	1755,0	2524	1,44		
Montes Cima 1T	1749,0	1794	1,03	0,82	0,21
Montes Cima 2T	1462,0	1200	0,82		
Montes Cima 3T	1616,0	988	0,61		
Pincho 1T	1803,0	2273	1,26	1,29	0,25
Pincho 2T	1710,0	1788	1,05		
Pincho 3T	1659,0	2577	1,55		

Faria (2018) e Gomes et al. (2018) obtiveram valores de resistência à compressão para argamassas de cal e terra e de terra e cal (Tabela 5.22 e Tabela 5.23), respetivamente. Verifica-se que os valores para a resistência à compressão são inferiores dos obtidos para o Castelo de Paderne, podendo estar associado ao processo de compactação da taipa e ao grande período de tempo que decorreu na construção, garantindo a carbonatação da cal utilizada na estabilização da taipa.

Tabela 5.22 Resistência à compressão de provetes de argamassa de cal e terra (Faria 2018)

Material	Rc (N/mm ²)
CL2_5t (substituição de 5% de cal por terra)	0,64
CL2_10t (substituição de 10% de cal por terra)	0,72
CL2_25t (substituição de 25% de cal por terra)	0,57
CL2_50t (substituição de 50% de cal por terra)	0,51

Tabela 5.23 Resistência à compressão de provetes de argamassa de terra e cal (Gomes et al. 2017)

Amostra	Rc (N/mm ²)
CL 5%	0,11
CL 10%	0,20
CL 15%	0,28

Gomes et al. (2014b) (Tabela 5.24) obtiveram valores de resistência à compressão de blocos de terra comprimida e de blocos de terra não comprimida mecanicamente superiores aos valores obtidos para o Castelo de Paderne. Esta diferença pode dever-se à dimensão dos blocos: a compactação em blocos mais pequenos pode originar uma maior resistência comparativamente a blocos de taipa de 2 metros de espessura, como é o caso em Paderne.

Tabela 5.24 Resistência à compressão de blocos de terra (adaptado de Gomes et al. 2014b)

Resistência à compressão [N/mm ²]		
Amostra	Média	Desvio Padrão
BTC 1	4,22	0,57
BTC 2	0,88	0,09
BT 1	3,15	0,28

5.3.6 Erosão por gotejamento- *Geelong test*

O ensaio de erosão por gotejamento foi realizado tal como descrito no subcapítulo 4.3.6, e os resultados obtidos estão presentes na Tabela 5.25.

Analisando os resultados verifica-se que apenas as amostras pertencentes à torre perderam alguma massa após o ensaio, sendo a amostra CP2018B a que perdeu uma maior percentagem de massa. Esta perda de massa pode estar associada ao estado de conservação dessa amostra, uma vez que, em termos visuais na sua recolha, correspondia à amostra que apresentava um pior estado de degradação superficial. Por outro lado esta mesma amostra é a que apresenta um valor mais baixo de calcite e, por consequência, um valor mais elevado de resíduo insolúvel. No entanto, em termos de massa volúmica é a amostra que apresenta o valor mais elevado. Tal pode dever-se a uma distribuição granulométrica mais forte em agregados de maiores dimensões, o que não foi possível aferir devido à limitação de amostras.

Tabela 5.25 Resultados de perda de massa por erosão por gotejamento de amostras de taipa militar

Amostra	Massa [kg]			Perda de massa [%]
	mi	m c/H ₂ O	mf	
AM4	0,1641	0,1765	0,1652	0
AM6	0,2268	0,2388	0,227	0
AM10	0,4901	0,4998	0,4914	0
AM11	1,1394	1,1466	1,1437	0
CP2018B	1,401	1,4097	1,3449	6
CP2018C	0,99	0,9962	0,9666	2
CP2018D	1,367	1,371	1,359	1

As amostras AM4, AM6, AM10 e AM11 apresentaram uma capacidade de absorção e retenção de água superior às amostras pertencentes à torre; no entanto, os ganhos de massa registados não foram significativos (Tabela 5.26).

Não tendo o ensaio sido destrutivo, visualmente as amostras não apresentam danos significativos. As dimensões das manchas são apresentadas na Tabela 5.27 e exemplificadas na Figura 5.24.

Analisando os resultados e comparando com os obtidos para a massa volúmica das amostras, é visível que para valores mais baixos de massa volúmica, como é o caso das amostras AM4 e AM6, maior a quantidade de água absorvida por gotejamento, o que está interligado com o aumento dos vazios.

Tabela 5.26 Resultados do ensaio de erosão por gotejamento em amostras de taipa militar: valores de água retida

Amostra	Água absorvida [g]
AM4	12
AM6	12
AM10	10
AM11	7,0
CP2018B	9,0
CP2018C	6,0
CP2018D	4,0

Os resultados obtidos justificam também o relativo bom comportamento que, ao longo dos séculos, a taipa tem apresentado, face a salpicos de água, nomeadamente do terreno para a base das paredes.

Tabela 5.27 Resultados do ensaio de erosão por gotejamento em amostras de taipa militar: dimensão da mancha de água

Amostra	Maior dimensão (mm)	Dimensão perpendicular (mm)	Área aproximada (cm ²)
AM4	51,95	47,09	24
AM6	59,21	45,86	27
AM10	66,80	44,83	29
AM11	66,65	34,26	23
CP2018B	74,88	30,21	23
CP2018C	47,24	36,01	17
CP2018D	69,58	27,13	19

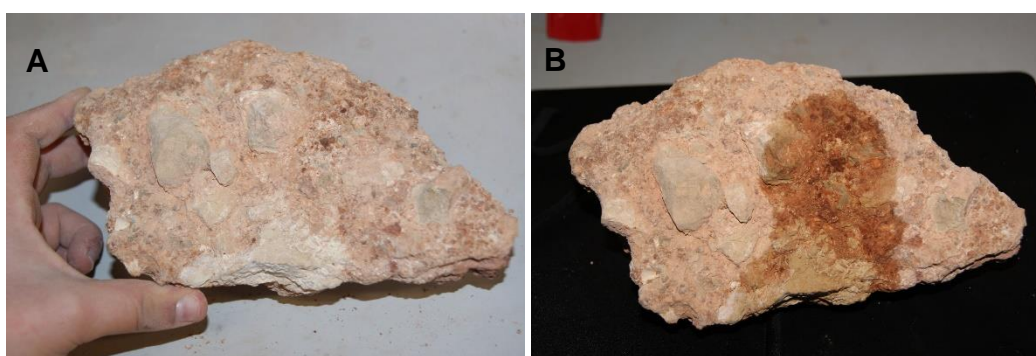


Figura 5.24 Ensaio de erosão por gotejamento: A – provete antes do ensaio; B - mancha de água após ensaio

5.3.7 Absorção de água a baixa pressão por tubos de Karsten

A absorção de água por tubos de Karsten foi determinada conforme descrição no subcapítulo 4.3.7 e as curvas obtidas estão presentes nas Figura 5.25 – 5.28, e no Anexo D. Por apresentarem comportamento muitos distintos, todas as curvas, apresentadas na Figura 5.25 são depois apresentadas separadamente por zonas da construção, em que na Figura 5.26 são apresentadas as amostras referentes às argamassas de assentamento da alvenaria, na Figura 5.27 as amostras pertencentes à muralha e na Figura 5.28 as amostras pertencentes à torre.

Analisando os resultados obtidos para a absorção de água nas amostras referentes a argamassas de assentamento verifica-se que a argamassa AM4 apresenta uma menor capacidade de absorção comparando com a argamassa AM6. Observando as amostras pertencentes à muralha, os resultados obtidos são semelhantes em ambas; no entanto, a amostra AM10 apresenta uma maior dificuldade de absorção de água. No que diz respeito às amostras pertencentes à torre verifica-se uma grande discrepância entre as amostras: na amostra CP2018B, a capacidade de absorção de água é inferior, podendo esta amostra estar com os poros preenchidos por algum material que dificulta a absorção de água. Pode tratar-se de amostra de zona que tinha sido anteriormente hidrofugada, o que se sabe que aconteceu, embora sem se saber com que produto, em que condições e quando.

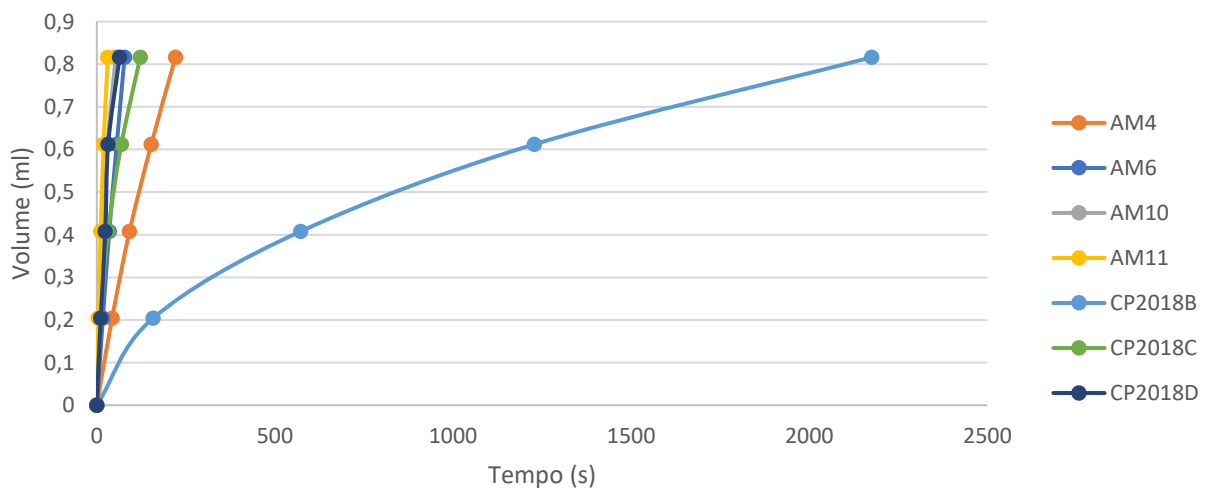


Figura 5.25 Evolução da absorção de água a baixa pressão por tubos de Karsten em amostras de argamassa e de taipa militar

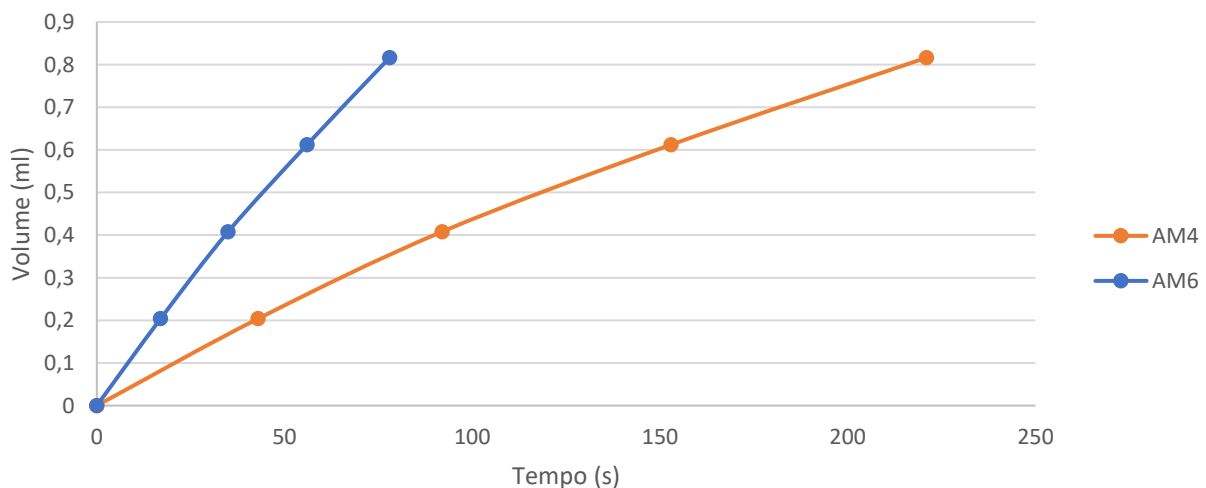


Figura 5.26 Evolução da absorção de água a baixa pressão por tubos de Karsten – amostras de argamassa de assentamento da ermida

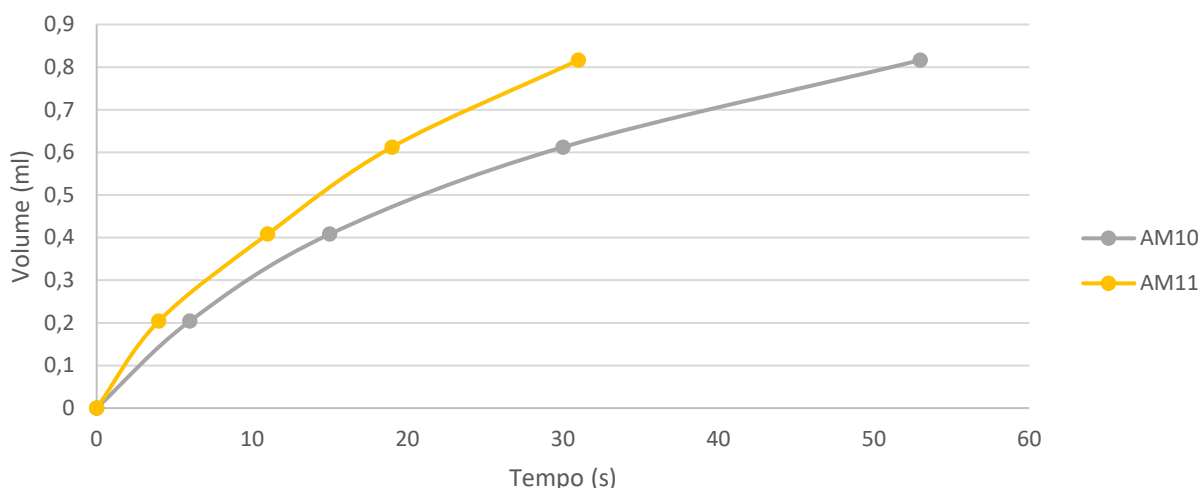


Figura 5.27 Evolução da absorção de água a baixa pressão por tubos de Karsten – amostras de taipa militar da muralha

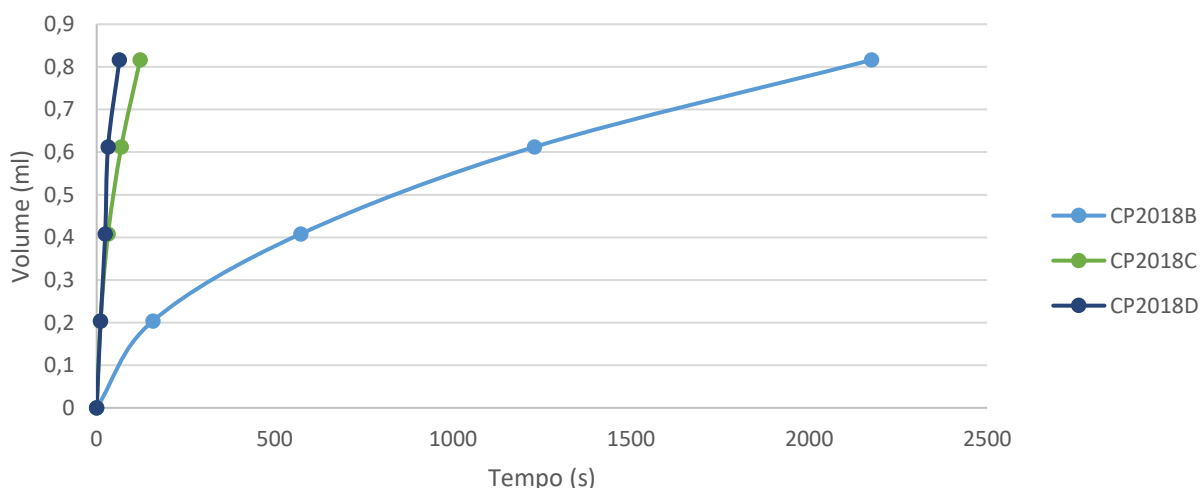


Figura 5.28 Evolução da absorção de água a baixa pressão por tubos de Karsten – amostras de taipa militar da torre

A amostra CP2018B, amostra que apresenta a menor absorção de água a baixa pressão por tubos de Karsten, é a amostra que apresenta um resíduo insolúvel mais elevado e uma massa volúmica aparente igualmente mais elevada em comparação com as restantes amostras. Tal como referido anteriormente, pode dever-se a conter agregados de maiores dimensões face a outras amostras, o que infelizmente não foi possível comprovar.

5.3.8 Absorção de água por capilaridade

O ensaio de absorção de água por capilaridade foi efetuado conforme descrição no subcapítulo 4.3.8, e as curvas obtidas para cada uma das amostras são apresentadas nas figuras seguintes (Figura 5.29 e 5.30) e em maior detalhe no Anexo D.

Tendo em conta que a altura das amostras é variável, só é possível comparar o seu valor de coeficiente de capilaridade, que corresponde ao declive do troço inicial das curvas de absorção capilar, valores estes que são apresentados na Tabela 5.28.

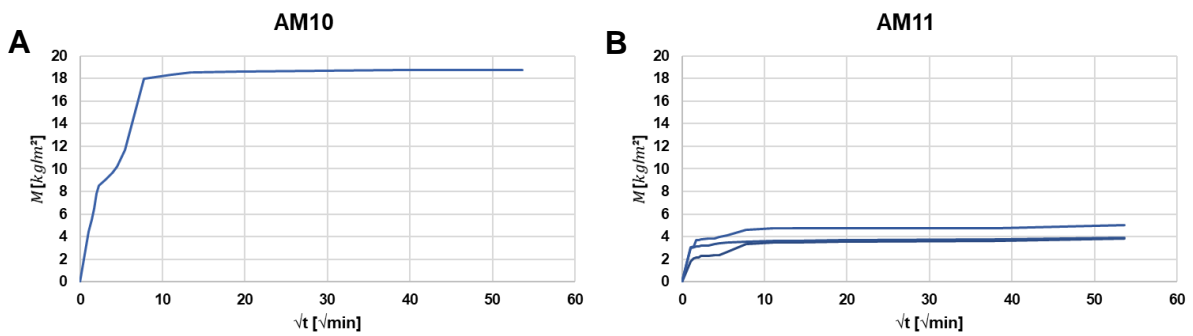


Figura 5.29 Curvas de capilaridade das amostras de taipa militar das muralhas: A - AM10; B - AM11

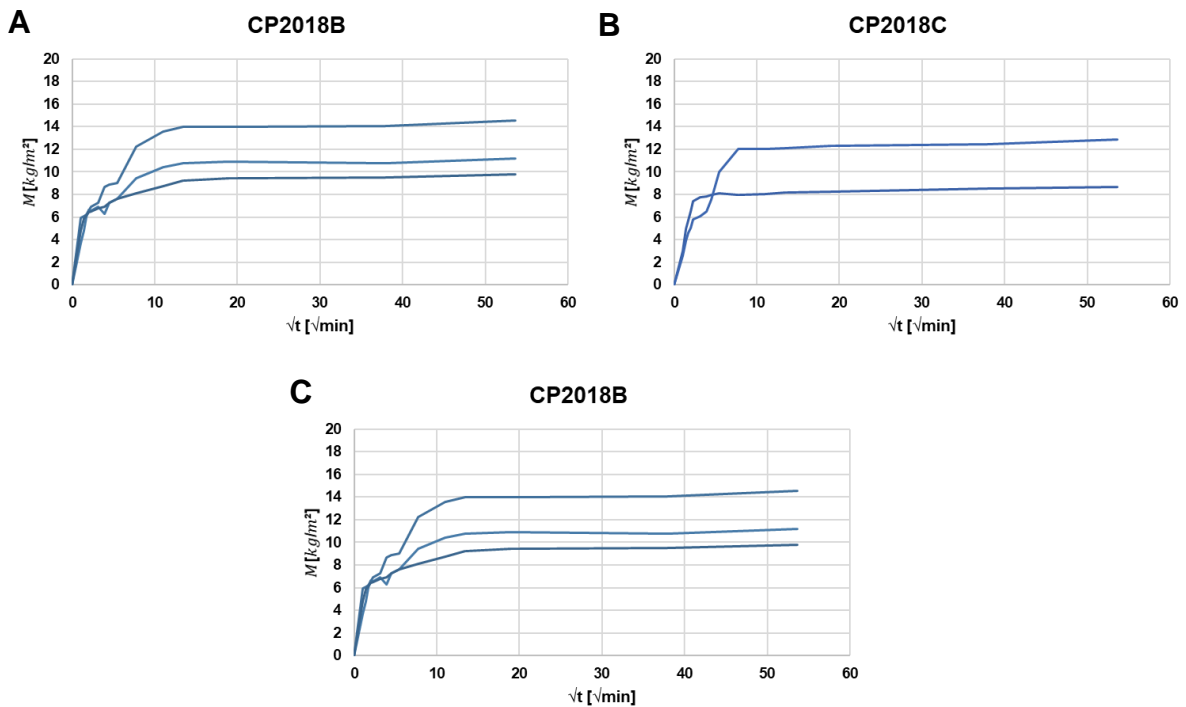


Figura 5.30 Curvas de capilaridade das amostras de taipa militar da torre: A - CP2018B, B - CP2018C e C - CP2018D

No decorrer do ensaio e com o traçado das curvas de capilaridade, verifica-se que nos troços iniciais ocorrem patamares nas medições. Estes erros justificam-se com a realização de pesagens com um intervalo entre medições curto, reduzindo o período de tempo que no qual as amostras estão em contacto com a água nessa fase inicial do ensaio. Constata-se que o ensaio deveria ter sido realizado com pesagem em contínuo (o que não foi realizado por limitações na ocupação de balança de precisão) ou com períodos entre pesagens mais alargados na fase inicial.

Tabela 5.28 Resultados do coeficiente de capilaridade de amostras de taipa militar

Amostra	Localização	Coeficiente de capilaridade [kg/(m ² .min ^{1/2})]
AM10	Muralha	1,86
AM11		2,02
CP2018B	Torre	1,49
CP2018C		2,42
CP2018D		2,56

O valor do coeficiente de capilaridade é proporcional à absorção das amostras no troço inicial da curva: quanto maior o valor do coeficiente, maior a velocidade de absorção. Comparando as amostras pertencentes às muralhas com as pertencentes à torre pode-se concluir que as amostras das muralhas apresentam um coeficiente de capilaridade mais homogéneo em comparação com as amostras da torre. Em relação às amostras da torre, a amostra CP2018B apresenta uma significativa menor absorção capilar de água, sendo essa a amostra que apresenta igualmente uma menor capacidade de absorção de água no ensaio de absorção de água a baixa pressão por tubos de Karsten e um maior valor de massa volúmica.

Tendo em conta os valores obtidos para o Castelo de Paderne e verificando os valores obtidos por Faria et al. (2014) (Tabela 5.29) em amostras de taipa com adição de cal hidráulica, constata-se que os valores de coeficiente de capilaridade em termos médios são semelhantes; verifica-se igualmente que quanto maior a massa volúmica das amostras, menor o coeficiente de capilaridade. Os provetes de taipa A, e a sua versão peneirada (produzida com eliminação de agregados grossos), realizados com a mesma terra, apresentam um coeficiente de capilaridade superior às amostras do Castelo de Paderne. Isto pode dever-se ao facto de Faria et al. (2012) ter considerado um intervalo entre pesagens superior (garantindo maior período de contacto dos provetes com a água) e à área de absorção das amostras ser muito superior às do presente trabalho.

Tabela 5.29 Massa volúmica de amostras de taipa corrente (adaptado de Faria et al. 2012)

Amostra	Coeficiente de capilaridade [kg/(m ² .min ^{1/2})]
A	6,39
A (peneirada)	2,07
B + hl	0,9
C + h	4,34
D + h	2,15

Nota: hl – hydraulic lime

Comparando os resultados da absorção de água por capilaridade com os obtidos por Gomes et al. (2016) em argamassas de cal hidratada de reparação de taipa (Tabela 5.30) e com Faria (2016) em argamassas de cal e terra (Tabela 5.31).

Tabela 5.30 Resultados do coeficiente de capilaridade de argamassas de reparação de taipa (Gomes et al. 2016)

Amostra	Coeficiente de capilaridade [kg/(m ² .min ^{1/2})]
CL 5%	1,78*
CL 10%	3,71*
CL 15%	3,95*

* – valores retirados de um gráfico.

Tabela 5.31 Resultados do coeficiente de capilaridade de argamassas de cal e terra (Faria 2016)

Amostra	Coeficiente de capilaridade [kg/(m ² .min ^{1/2})]
CL2_5t	3,53
CL2_10t	3,24
CL2_25t	3,70
CL2_50t	4,42

Podemos concluir que as amostras do Castelo de Paderne apresentam um coeficiente de absorção capilar inferior às amostras de argamassas de reparação de terra e cal e de cal e terra analisadas por outros autores. Este valor de coeficiente mais baixo poderá estar associado à presença de material argiloso em maior proporção (no caso das argamassas de cal e terra) e da consolidação da taipa com produtos hidrofugantes nas amostras do Castelo de Paderne.

5.3.9 Secagem

O ensaio de secagem foi efetuado conforme descrição no subcapítulo 4.3.9, e as curvas obtidas para cada uma das amostras são apresentadas nas Figuras 5.31 e 5.33 em função do tempo em horas e nas Figuras 5.32 e 5.34 em função da raiz do tempo. No Anexo D são apresentados os valores de cada uma das medições efetuadas.

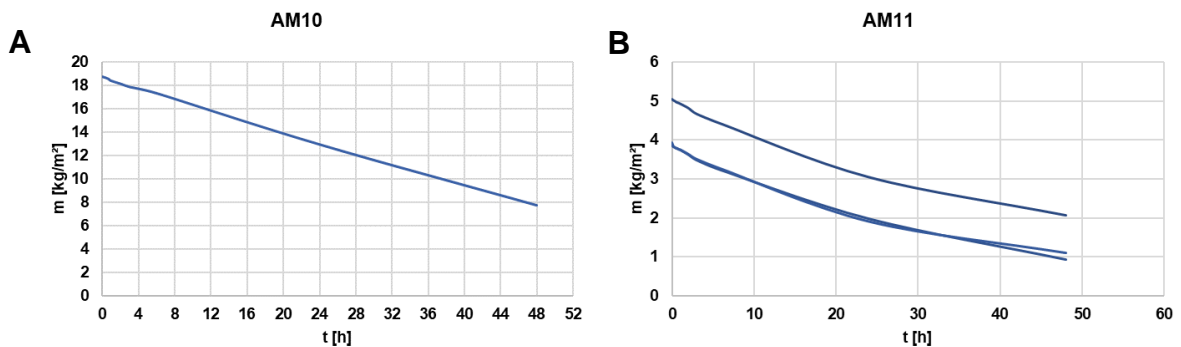


Figura 5.31 Curvas de secagem de amostras de taipa militar da muralha em função do tempo em horas:

A – AM10; B – AM11

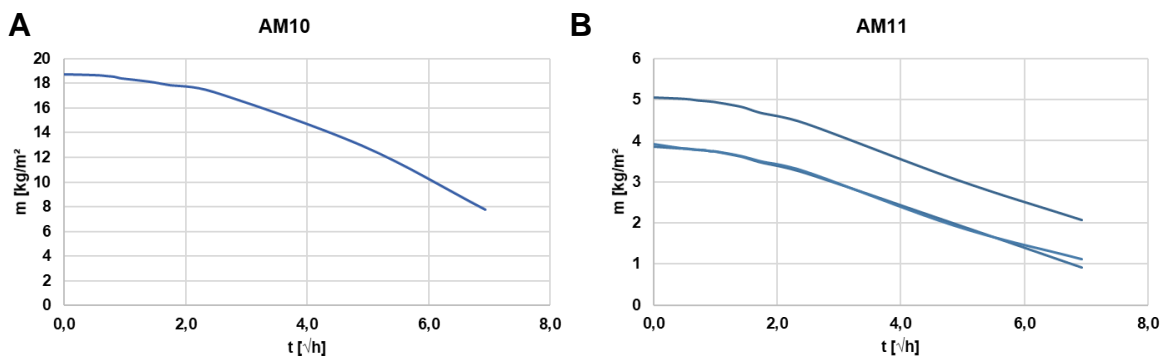


Figura 5.32 Curvas de secagem de amostras de taipa militar da muralha em função da raiz do tempo: A – AM10;

B – AM11

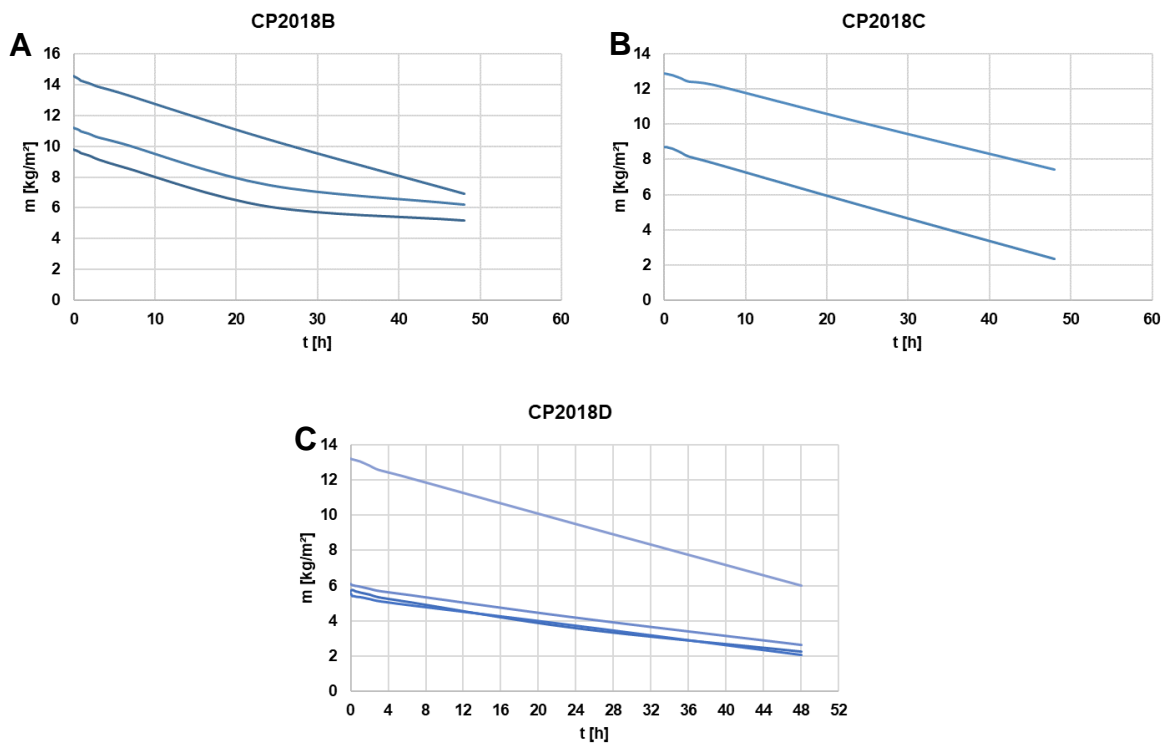


Figura 5.33 Curvas de secagem de amostras de taipa militar da torre em função do tempo em horas: A – CP2018B; B – CP2018C; C – CP2018D

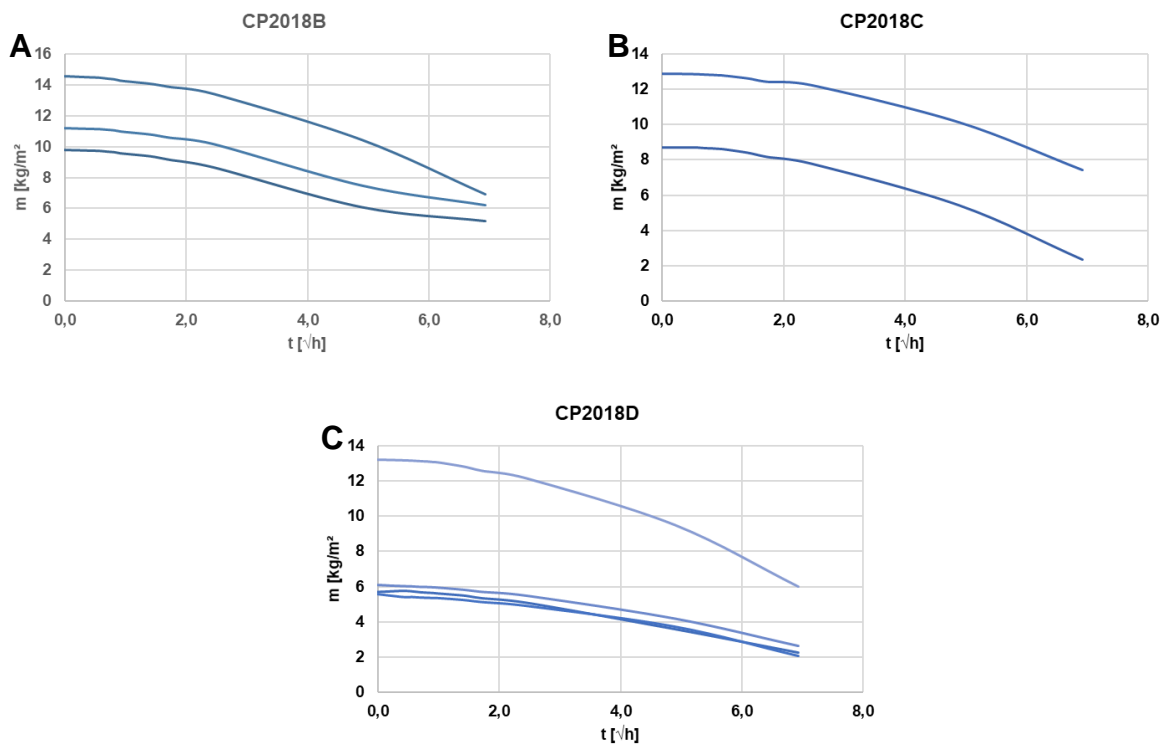


Figura 5.34 Curvas de secagem de amostras de taipa militar da torre em função da raiz do tempo: A – CP2018B; B – CP2018C; C – CP2018D

Com o traçado das curvas determinou-se a taxa de secagem de cada amostra nas fases 1, Ts1, e 2, Ts2, respetivamente (Tabela 5.32).

Tabela 5.32 Resultados da taxa de secagem de amostras de taipa militar da muralha e da torre

Amostra	TS1 [kg/m ² .h]	TS2 [kg/m ² .h]
AM10	0,35	1,96
AM11	0,13	0,50
CP2018B	0,27	1,01
CP2018C	0,10	1,04
CP2018D	0,15	0,76

A amostra AM10, apresenta uma absorção de água por capilaridade bastante superior às restantes; no entanto, também apresenta taxas de secagem nas fases 1 e 2 muito superiores. Isto ocorre devido à diferença de alturas que as amostras apresentam entre si. Uma espessura superior permite um maior volume de água absorvida por capilaridade e, por consequência, uma maior área de secagem possibilita maiores taxas de secagem. A amostra CP2018C apresenta o menor valor para a taxa de secagem na fase 1 (TS1) e a amostra CP2018D para a taxa de secagem Ts2. A taxa de secagem inicial Ts1 diminui com o aumento do ligante, sendo que a amostra CP2018C é a que apresenta a menor ponderação de ligante em relação ao agregado.

Não estando amostras do Castelo de Paderne impermeabilizadas nas suas faces laterais, a secagem dos provetes é feita em diversas direções, o que origina valores de taxa de secagem superiores a ensaios de outros autores em que as faces laterais se encontravam impermeabilizadas, como é o caso de Gomes et al. (2017) e Faria (2016).

Comparando os resultados da taxa de secagem inicial com os obtidos por Gomes et al. (2017) em argamassas de cal hidratada de reparação de taipa (Tabela 5.33) e Faria (2016) em argamassas de terra e cal (Tabela 5.34). Verifica-se que com o aumento de material argiloso o valor da taxa de secagem inicial aumenta, o que vai de encontro aos resultados obtidos para o Castelo de Paderne, em que as amostras AM10 e CP2018B são as amostras que apresentam uma maior quantidade de material argiloso, e por consequente um maior valor para a taxa de secagem inicial.

Tabela 5.33 Resultados da taxa de secagem inicial de amostras de argamassa de cal hidratada (Gomes et al. 2017)

Amostra	TS1 [kg/m ² .h]
CL 5%	0,14
CL 10%	0,14
CL 15%	0,13

Tabela 5.34 Resultados da taxa de secagem inicial de amostras de argamassa de cal e terra (Faria 2016)

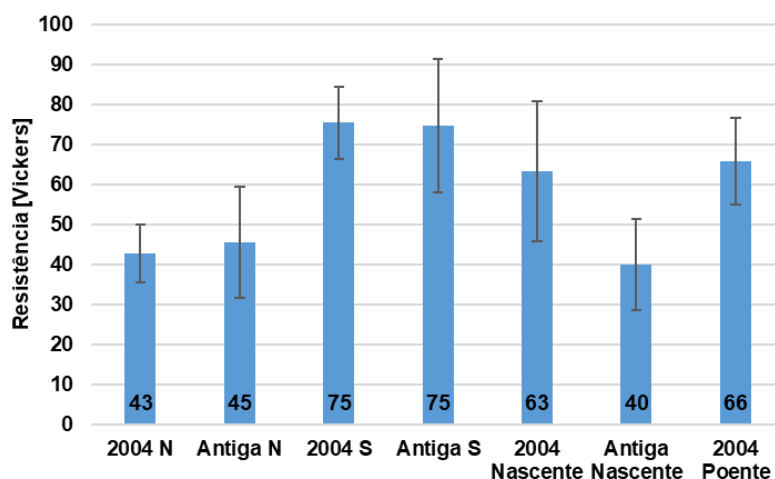
Amostra	TS1 [kg/m ² .h]
CL2_5t	0,26
CL2_10t	0,24
CL2_25t	0,23
CL2_50t	0,28

5.4 Caracterização realizada in situ

Os resultados obtidos na campanha experimental realizada in situ são apresentados em seguida e comparados sempre que possível com os resultados obtidos na campanha experimental laboratorial.

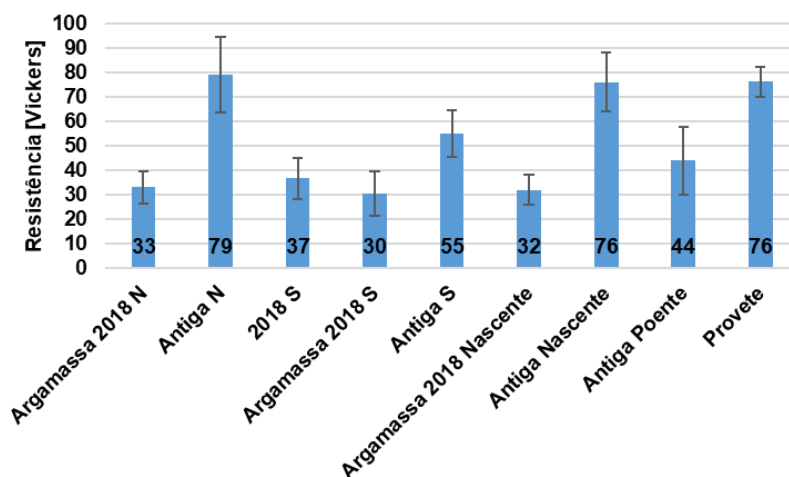
5.4.1 Resistência superficial por esclerómetro pendular

O ensaio de avaliação da resistência superficial por esclerómetro pendular foi realizado como descrito no subcapítulo 4.4.1 ao longo da superfície exterior da muralha do castelo e da torre. Os resultados obtidos estão apresentados na Figura 5.35 para a muralha e na Figura 5.36 para a torre, individualmente no Anexo E.



Nota: 2004 N – taipa nova realizada em 2004 na fachada Norte da muralha; Antiga N – taipa antiga na fachada Norte da muralha; 2004 S – taipa nova realizada em 2004 na fachada Sul da muralha; Antiga S – taipa antiga na fachada Sul da muralha; 2004 Nascente – taipa nova realizada em 2004 na fachada Nascente da muralha; Antiga Nascente – taipa antiga na fachada Nascente da muralha; 2004 Poente – taipa nova realizada em 2004 na fachada Poente da muralha.

Figura 5.35 Resultados (valor médio e de desvio-padrão) da resistência por esclerómetro pendular realizados na muralha



Nota: Argamassa 2018 N – argamassa de reparação realizada em 2018 na fachada Norte da torre; Antiga N – taipa antiga na fachada Norte da torre; 2018 S – taipa nova realizada em 2018 na fachada Sul da torre; Argamassa 2018 S – argamassa de reparação realizada em 2018 na fachada Sul da torre; Antiga S – taipa antiga na fachada Sul da torre; Argamassa 2018 Nascente – argamassa de reparação realizada em 2018 na fachada Nascente da torre; Antiga Nascente – taipa antiga na fachada Nascente da torre; Antiga Poente – taipa antiga na fachada Nascente da torre; Provete – taipa nova realizada em 2018 no provete.

Figura 5.36 Resultados (valor médio e de desvio-padrão) da resistência por esclerómetro pendular realizados na torre

Analisando os resultados obtidos verifica-se que, ao nível da muralha, os valores mais elevados de resistência correspondem aos panos orientados a Sul e a Nascente, e os menores aos panos orientados a Norte e a Poente, o que se prende com fenómenos atmosféricos como incidência dominante de ventos e chuva. No que diz respeito às intervenções realizadas na muralha não se verifica uma diferença significativa de resistência nas zonas de taipa reconstruída em 2004 para as restantes. É de notar que a zona intervencionada com recurso a terra projetada não foi analisada, pois o estado de degradação, com falta de coesão, em que se encontrava não permitiu a realização do ensaio.

O ensaio realizado na torre apresenta valores mais dispersos. O maior valor registado encontra-se no paramento Norte da torre e o mais baixo ocorre para a argamassa de preenchimento de lacunas aplicada a Sul em 2018.

No paramento Sul da torre, tal como previsto a intervenção de reconstrução de taipa apresenta um valor de resistência superior ao módulo de taipa original e à argamassa de preenchimento de lacunas aplicada. No paramento nascente os valores de resistência para a taipa original são semelhantes aos valores da taipa do provete utilizado para a intervenção da torre, sendo os valores da argamassa de preenchimento de lacunas semelhantes aos valores da mesma argamassa para o paramento Sul. No paramento Norte verifica-se que os valores da resistência da taipa anterior à intervenção são bastante elevados, semelhantes aos valores do provete. A poente o valor da resistência é semelhante ao valor apresentado a Sul.

Comparando os valores obtidos para a torre e para a muralha, de um modo geral, verifica-se que a resistência superficial da taipa da muralha é superior à da torre, tal como anteriormente verificado através dos ensaios de dureza superficial e resistência à compressão realizado laboratorialmente.

Comparando com os resultados obtidos por Faria et al. (2014) de 87 ± 6 Vicker obtidos para construções de taipa corrente, verifica-se que os resultados do Castelo de Paderne são inferiores, o que poderá ser influenciado pela presença de nódulos de cal nódulos, que apresentam uma resistência inferior, na taipa do Castelo.

5.4.2 Velocidade de propagação de ultrassons

O ensaio de velocidade de propagação de ultrassons realizou-se conforme descrito no subcapítulo 4.4.2, e os valores obtidos para cada uma das zonas analisadas encontram-se na Tabela 5.35 e individualmente no Anexo E.

Tabela 5.35 Resultados da velocidade de propagação de ultrassons

Localização	Velocidade de propagação de ultrassons [m/s]	
	Média	Desvio Padrão
Torre 2018	1405,03	363,86
Torre original	1111,43	133,62
Muralha 2004	953,31	163,33
Terra projetada 2004	641,39	391,51
Muralha original	1438,74	644,87

O valor obtido para a velocidade de propagação de ultrassons é diretamente proporcional ao estado de conservação dessa mesma zona, sendo visível, através da análise dos valores apresentados, que a terra projetada apresenta um estado de degradação bastante avançado.

Pode-se verificar que a zona correspondente à última intervenção na torre apresenta velocidades de propagação de ultrassons perto das obtidas para a taipa pertencente à muralha original. A intervenção efetuada em 2004 ao nível da muralha em termos visuais apresentava boa coesão e boa homogeneidade; no entanto apresenta valores de velocidade de propagação de ultrassons mais reduzidos, mas perto dos da taipa original o que é bastante positivo.

5.4.3 Absorção de água a baixa pressão por tubos de Karsten

O ensaio de absorção de água a baixa pressão por tubos de Karsten realizou-se conforme descrito no subcapítulo 4.4.3.

Na torre foram efetuados ensaios em 7 pontos distintos, sendo três deles na zona da argamassa de reparação utilizada na reparação de lacunas em 2018, um ponto correspondente à taipa original (fachada Norte) e, não sendo possível a realização do ensaio nos novos blocos de taipa por estes se encontrarem a cota elevada e não estar disponível andaime, efetuou-se sobre o provete de iguais dosagens da taipa utilizada e que a procurava reproduzir, dois ensaios, um através do método horizontal e outro do método vertical.

O tubo de Karsten na zona correspondente à taipa original da torre não sofreu qualquer tipo de variação de água, sendo que ao fim de 30 minutos (altura em que se parou o ensaio) ainda não tinha sido absorvida água pela superfície, o que poderá dever-se ao facto da superfície ter sido hidrofugada em intervenções anteriores. O ensaio realizado sobre a superfície horizontal do provete, tal como o ensaio realizado sobre a taipa original, não foi absorvida água nos 30 minutos do decorrer do ensaio, consequência da provável hidrofugação da superfície superior do provete.

Quanto aos tubos colocados na argamassa de reparação e na superfície vertical do provete de ensaio, as respetivas curvas são apresentadas na Figura 5.37.

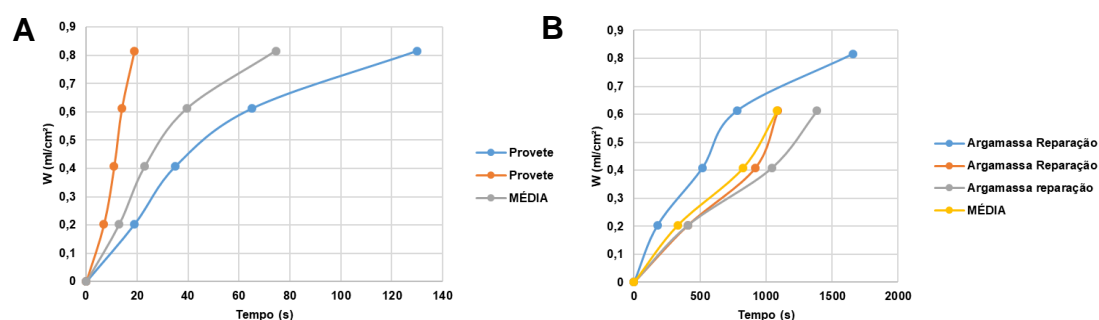


Figura 5.37 Curvas de absorção de água a baixa pressão por tubos de Karsten na torre: A – provete; B – argamassa de reparação

Analisando as curvas, verifica-se que a absorção de água na argamassa de reparação é relativamente lenta. Muito provavelmente, tal situação deve-se ao facto de a argamassa de reparação apresentar argila; sendo a argila constituída por lamelas, talvez seja criado um certo bloqueio à absorção de água.

Na muralha foram efetuados ensaios de absorção de água a baixa pressão por tubos de Karsten a 6 pontos distintos, três dos pontos correspondem a uma zona intervencionada em 2004, com a execução de novos blocos de taipa, e outros três pontos correspondem a uma zona anterior à intervenção de 2004.

Na zona anterior a 2004 foram traçadas as curvas apresentadas na Figura 5.38. Verifica-se que a absorção de água foi mais lenta em relação às curvas analisadas em 5.3.3 das duas amostras de taipa recolhidas na muralha (Figura 5.27), esta variação poderá estar associada a diversos fatores, entre eles a variação das condições de temperatura e humidade relativa no decorrer dos ensaios *in situ* e ainda a orientação das amostras face à direção de compactação da taipa, em virtude da direção preferencial na qual as lamelas de argila se devem posicionar, bloqueando, mais ou menos, a absorção de água na presença de humidade.

Nos novos blocos referentes à intervenção de 2004 a absorção de água deu-se de forma bastante lenta ou nula, sendo que o ensaio terminou ao fim de 30 minutos. A absorção registada é apresentada na Tabela 5.36. Ao analisar-se os dados da Tabela 5.34 pode-se constatar que, no decorrer da intervenção, foi aplicado qualquer tipo de produto hidrofugante, que se encontra ainda presente e dificulta a absorção de água.

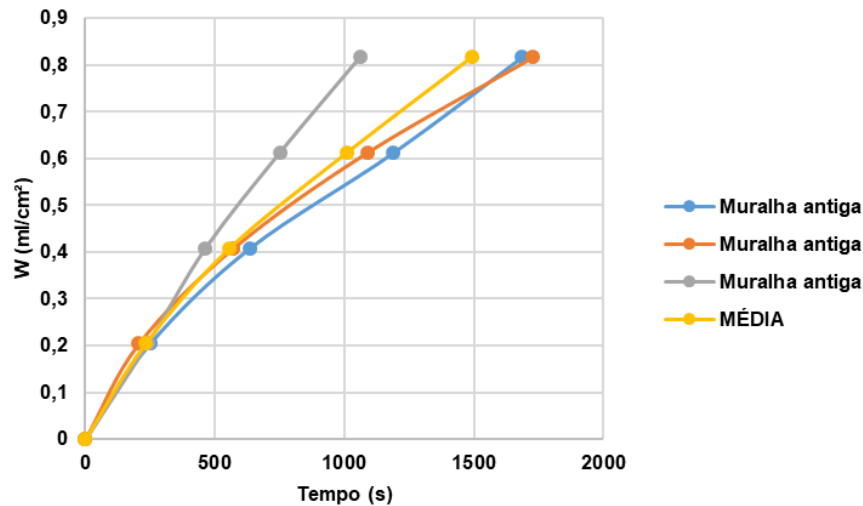


Figura 5.38 Curvas de absorção de água a baixa pressão por tubos de Karsten na muralha anterior a 2004

Tabela 5.36 Resultados de absorção de água a baixa pressão por tubos de Karsten (em bloco de taipa realizado em 2004)

Tubo	Absorção de água ao fim de 30 min (ml)
1	0,9
2	2,0
3	2,5

Tendo em conta os resultados obtidos por Faria et al. (2014), em construções de taipa corrente, de absorção de água a baixa pressão por tubos de Karsten de $14,8 \pm 0,8$ ml em 5 min, verifica-se que no Castelo de Paderne estes valores são bastante inferiores, não só pela presença de cal, mas também pela presença de hidrofugante em algumas zonas ensaiadas.

6. Conclusões

6.1 Considerações finais

Com a crescente preocupação com a preservação do património histórico construído é necessário a consciencialização para a necessidade de o intervencionar de forma ética e eficiente, por forma a manter e transmitir as suas características às gerações vindouras. Para tal é necessário o conhecimento prévio das técnicas e metodologias de construção e aceder ao registo de intervenções realizadas.

As construções em terra estiveram ao longo dos tempos expostas à ação da água, do vento e humanas (inicialmente de uso, posteriormente de intervenções e, por vezes, de vandalismo) e, tal como quaisquer outras, sofrem uma enorme degradação, não sendo exceção o caso de estudo da presente dissertação, o Castelo de Paderne. Cabe aos profissionais responsáveis procurar as melhores práticas para que esta degradação seja mitigada, para que se possa passar este legado para as gerações futuras.

A observação *in situ* mostra que nem todas as intervenções ocorridas no Castelo de Paderne terão sido as mais indicadas, sendo que algumas podem ter contribuído para acelerar o processo de degradação, enquanto outras vezes ao se terem degradado não colocaram em risco a construção. Com este trabalho pretendeu-se então documentar os materiais e técnicas utilizadas na construção do Castelo, através de uma análise documental, bem como de todas as intervenções realizadas a que se conseguiu ter acesso e também à caracterização material que, só muito esporadicamente, foi realizada. Pretende-se, para além de contribuir para o registo das intervenções e observações, dar contributos para que as novas intervenções possam decorrer de forma mais fundamentada, com uma maior compatibilidade com o existente e com as intervenções anteriormente realizadas. Pretende-se ainda inserir os dados recolhidos neste caso de estudo na base de dados de materiais de construções históricas DB-HERITAGE.

Para a caracterização de materiais das muralhas, ermida e torre foram realizados diversos ensaios laboratoriais de caracterização química e mineralógica, física e mecânica através de amostras recolhidas (essencialmente de zonas mais degradadas e que, por isso, foram disponibilizadas) e que foram complementados com a realização de ensaios *in situ* em vários locais da muralha e torre.

Foram analisadas em laboratório no total dez amostras, provenientes de zonas distintas da fortificação. Dessas, quatro pertenciam à torre, e que foram recolhidas anteriormente à intervenção de conservação realizada em 2018. Outras duas são pertencentes à muralha e foram recolhidas no ano de 2000. As restantes quatro amostras correspondem a amostras de alvenaria da ermida, recolhidas igualmente no ano de 2000. Os ensaios não destrutivos realizados *in situ* visaram essencialmente a comparação de resultados entre zonas originais e zonas onde foram realizadas intervenções nos últimos anos. Assim, foram analisadas zonas de taipa original, zonas intervencionadas em 2004 (terra projetada e blocos de taipa reconstruídos) e zonas intervencionadas em 2018 (blocos de taipa e argamassas de reparação).

Para a caracterização química e mineralógica efetuaram-se ensaios de difração por raios X, análise termogravimétrica e térmica diferencial, determinação do resíduo insolúvel em ácido a que se associou análise granulométrica, análise petrográfica e ao microscópio eletrónico de varrimento com microanálise de raios X, visando determinar o tipo de constituintes e o traço das amostras de argamassa e de taipa. Com a

caracterização física e mecânica procurou-se determinar características como massa volúmica aparente, módulo de elasticidade dinâmico, dureza superficial, resistência à abrasão superficial, resistência à compressão e comportamento face à presença de água. Com os ensaios realizados *in situ* avaliou-se a velocidade de propagação de ultrassons, a dureza superficial e o comportamento face à presença de água.

No que diz respeito à caracterização química e mineralógica, a campanha experimental revelou a presença de calcite, quartzo, feldspatos e óxidos e hidróxidos. Os teores de calcite detetados são elevados e os nódulos de cal bastante visíveis, o que permite admitir que durante o processo construtivo a cal utilizada foi aplicada em forma de óxido de cálcio que hidratou por mistura com a terra húmida, aumentando de volume e contribuindo para uma maior compacidade da taipa. Com a campanha experimental realizada conclui-se que o Castelo de Paderne apresenta bons resultados para os ensaios que simulam os agentes atmosféricos a que se encontra sujeito, como a presença de água ou a abrasão superficial. No que diz respeito aos ensaios de resistência à compressão e de dureza superficial, os valores obtidos foram igualmente satisfatórios, estando acima dos valores obtidos por outros autores para construções de taipa corrente ou argamassas de reparação de taipa.

Conclui-se que a intervenção realizada na muralha com a utilização de terra projetada revelou-se ineficiente a longo prazo, devido à falta de coesão e homogeneidade que apresenta o material ao fim de cerca de 14 anos. Verificou-se também a presença de consolidantes/hidrofugantes, quer na muralha, quer na torre, o que por um lado pode ser eficiente para garantir uma maior durabilidade da superfície, mas por outro, pode ser contraproducente pois a água do terreno onde está fundado o castelo pode ascender de forma capilar e terá mais dificuldade em evaporar através da superfície exterior. No entanto, parece que grande parte do terreno de fundação do castelo é rochoso, o que pode minorar este aspeto.

Considera-se que os objetivos definidos para a presente dissertação foram atingidos. Documentou-se o mais exaustivamente que foi possível as intervenções efetuadas nesta fortificação, bem como o seu estado de degradação e de utilização nos dias de hoje. Foi possível caracterizar o caso de estudo, em particular, no que diz respeito às técnicas e materiais utilizados, que podem servir de base para futuras intervenções a realizar na fortificação.

6.2 Desenvolvimentos futuros

Por forma a dar continuidade ao trabalho realizado nesta dissertação é apresentada de seguida uma lista de sugestões de possíveis desenvolvimentos futuros, nomeadamente:

- Reproduzir o trabalho realizado para o Castelo de Paderne em fortificações do mesmo período, para que se consiga um maior número de casos de comparação, permitindo conservar da melhor forma o património histórico construído.
- Realizar uma monitorização de forma regular a todas as zonas intervencionadas, tendo como termo de comparação os resultados recolhidos na altura da sua realização.

Para além da já aprovada disseminação de dados iniciais da dissertação, pretende-se de igual forma realizar um artigo em revista internacional para publicação dos resultados obtidos com a caracterização dos materiais do castelo e utilizados nas diversas intervenções realizadas.

Referências Bibliográficas

- ASTM (2010). D2240 Standard test method for rubber property—durometer hardness.
- Braga, A; Estêvão, J. (2012). Dificuldades associadas à reabilitação do património construído em taipa no Algarve. *Construção 2012*, Coimbra, Portugal, p. 1–11.
- Branco Correia, F. (2017). Southern Portugal- An Architectural Heritage With Strong Islamic Influence. *International Journal of Heritage Architecture*, p. 640-653.
- Bruno, P. (2005). Taipa Militar - Fortificações do período de domínio muçulmano. *Arquitectura de Terra em Portugal*, Lisboa: Argumentum, p. 39-44.
- Bruno, P. (2000). A Fortaleza de Juromenha: Contributo para o estudo e a conservação da muralha islâmica de taipa militar. *Dissertação de Mestrado*, Universidade de Évora.
- Bruno, P., Faria, P., Candeias, A., Mirão, J. (2010). Earth mortars use on pre-historic habitat structures in Southern Portugal. *Case studies. Journal of Iberian Archaeology*, 13, p. 51-67.
- Canivell, J.; Graciani, A. (2014). Muralla de Niebla, Huelva (1984-2008). In *La Restauración de la Tapia en la Península Ibérica: Criterios, Técnicas, Resultados y Perspectivas*, Argumentum y TC Editores, p. 212-217.
- Catarino, H.; Inácio, I. (2006). Vestígios do urbanismo islâmico no Castelo de Paderne: uma primeira abordagem. *XELB: Revista de Arqueologia, Arte, Etnologia e História*, 6, p. 281-298.
- CEN (1999). EN 1015-11 Methods of test for mortar for masonry - Part 11: Determination of flexural and compressive strength, Brussels.
- CEN (2009). EN 15801 Conservation of cultural property. Test, methods. Determination of water absorption by capillarity, Brussels.
- CEN (2013). EN 16302 Conservation of Cultural Heritage – Test Methods: Measurement of Water Absorption by Pipe Method, Brussels.
- CEN (2013). EN 16322 Conservation of Cultural Heritage - Test methods – Determination of drying properties, Brussels.
- Cóias e Silva, V.; Costa, J.P. (2004). Terra Projectada. Um novo método de reabilitação de construções em taipa. *Pedra & Cal*, 24, p.18-21.
- Cotrim, M.; Faria, P.; Santos Silva, A. (2018). Conservação das muralhas de taipa militar do Castelo de Paderne – Uma história de intervenções. *Construção 2018*, FEUP, Porto (artigo aceite).
- Cravo, M. (1989). Composição de uma amostra de taipa do Castelo de Silves. Lisboa: LNEC. Nota Técnica 024/3/303 - DMC.
- DIN 18497 (2013). Earth plasters - Terms and definitions, requirements, test methods. Berlin.
- Faria, P. (2005). Revestimentos de paredes em terra. *Arquitectura de Terra em Portugal*. Lisboa: Argumentum, p. 68-73.

- Faria, P. (2006). Earth construction conservation: pathologies due to water, Houses and cities built with earth: conservation, significance and urban quality. Lisboa: Argumentum, p. 46-48.
- Faria, P. (2018). Argamassas de cal e terra: características e possibilidades de aplicação. Ambiente Construído 18, 49-62.
- Faria, P., Lima, J. (2018). Rebocos de terra. Cadernos de Construção com Terra 3, Lisboa, Argumentum.
- Faria, P., Silva, V., Jamú, N., Dias, I., Gomes, M. I. (2014). Evaluation of air lime and clayish earth mortars for earthen wall renders. Vernacular Heritage and Earthen Architecture: Contributions for Sustainable Development, p. 407-413.
- Faria, P., Silva, V., Pereira, C., Rocha, M. (2012). The monitoring of rammed earth experimental walls and characterization of rammed earth samples. Rammed Earth Conservation, p. 91-97.
- Ferreira, M. (2017a). Caracterização da construção com terra da região de Leiria. Contributo para a sua conservação. Dissertação de Mestrado, FCT NOVA.
- Ferreira, M. (2017b). Argamassas de terra para rebocos interiores. Caracterização face à presença de água. Dissertação de Mestrado, FCT NOVA.
- Font, J. (2005). Construções de terra em Espanha e Portugal- diferenças e semelhanças. Arquitectura de Terra em Portugal. Lisboa: Argumentum, p. 119-124.
- Freire, M. T. (2016). Restoration of ancient Portuguese interior plaster coatings: Characterization and development of compatible gypsum-based products. Dissertação de Doutoramento, IST.
- Gomes, M. I., Faria, P.; Gonçalves, T. D. (2018). Earth-based mortars for repair and protection of rammed earth walls. Stabilization with mineral binders and fibers. Journal of Cleaner Production, 172, p. 2401-2414.
- Gomes, M.I. (2013). Conservação de paredes de taipa: argamassas de reparação. Dissertação de Doutoramento, FCT NOVA.
- Gomes, M.I., Gonçalves, T. D.; Faria, P. (2012). Análise experimental de argamassas de terra com cais e fibras naturais. 4º Congresso de Argamassas e ETICS, APFAC, ITeCons, p. (CD).
- Gomes, M.I., Gonçalves, T.D.; Faria, P. (2016). Hydric behavior of earth materials and the effects of their stabilization with cement or lime: study on repair mortars for historical rammed earth structures. Journal of Materials in Civil Engineering, 28.
- Gomes, M.I., Gonçalves, T.D.; Faria, P. (2014a). Unstabilized rammed earth: characterization of material collected from old constructions in south Portugal and comparison to normative requirements, International Journal of Architectural Heritage, 8, p.185-21.
- Gomes, N. D., Faria, P., Silva, V. (2014b). Caracterização de argamassas de assentamento e de alvenarias de blocos de terra. Argamassas 2014 - I Simpósio de Argamassas e Soluções Térmicas de Revestimento (CD-rom).
- Gonçalves, T. D.; Gomes, M. I. (2012). Construção de terra crua: potencialidades e questões em aberto. Jornadas LNEC, Lisboa, 18.

Instituto Geográfico do Exército (1993a). Silves / Instituto Geográfico do Exército 595. Lisboa: IGE.

Instituto Geográfico do Exército (1993b). Alcácer do Sal / Instituto Geográfico do Exército 476. Lisboa: IGE.

Instituto Geográfico do Exército, (1993c). Juromenha: Alandroal / Instituto Geográfico do Exército 441. Lisboa: IGE.

Instituto Geográfico do Exército, (1993d). Moura / Instituto Geográfico do Exército 501. Lisboa: IGE.

Instituto Geográfico do Exército, (1993e). Algoz: Silves / Instituto Geográfico do Exército 596. Lisboa: IGE.

IPQ (2002). NP EN 1097-3: Ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados. Parte 3: Determinação da baridade e do volume de vazios. Almada.

IPQ (2006). NP EN 14146 Métodos de ensaio para pedra natural. Determinação do módulo de elasticidade dinâmico (através da medição da frequência de ressonância fundamental). Almada.

LNEC (2015a). FE Pa 42 (2015). Métodos de ensaio de revestimentos de paredes existentes. Lisboa.

LNEC (2015b). FE Pa 48.1: Ficha de ensaio para revestimentos de paredes - Ensaio de avaliação da resistência mecânica do reboco com esclerómetro de pendulo. Lisboa.

LNEC (2016). FE Pa 49.1: Ficha de ensaio para revestimentos de paredes - Ensaio de avaliação da dureza superficial do reboco com durómetro. Lisboa.

Macias, S. (1992). Moura: um Projecto de Investigação em Arqueologia Medieval e Moderna. *Penélope: Revista de História e Ciências Sociais*, 7, p.127-134.

MacKenzie, W. S.; Adams, A. E. (1996). *Atlas d'initiation à la pétrographie*. Editions Masson.

Margalha, M. G.; Beirão, T.; Bastos, A.; Santos Silva, A. (2002) – Castelo de Paderne: consolidação e recuperação, *Revestimentos de paredes em edifícios antigos*. Lisboa: LNEC, CAD 2, p. 191-207.

Mateus, L., Viegas, M.; Brito, J. (2005). Caracterização dos revestimentos tradicionais de construções em taipa no barlavento algarvio. *Terra em Seminário 2005*, Lisboa: Argumentum

Navarro Palazón, J.; Jiménez Castillo, P. (1995). *El Castillejo de Monteagudo: Qaṣr Ibn Sa'd. Legado Andalusi. Casas y palacios de al-Andalus. Siglos XII-XIII*, Barcelona, p.63-103.

NZS 4298 (1998) *New Zealand Standards, Material and Workmanship for earth buildings*. New Zealand Standards.

Palazón, J. N.; Castillo, P. J. (2011). *Materiales y técnicas constructivas en la Murcia andalusí (siglos X-XIII)*. *Arqueología de la Arquitectura*, p.85-120.

Pifano, A. (2005). *Castelo de Paderne – Restauro das muralhas em taipa militar*. Documentação não publicada.

Proença, M. C. (2015). *Uma história concisa de Portugal*. Círculo de leitores.

Quitério, P (2010). *Castelo de Paderne, Portugal. Intervenção na sua muralha de almôada*. *Arquitectura construída en tierra, Tradición e Innovación*. Cátedra Juan de Villanueva. Universidad de Valladolid, p.67-74.

- Ramalho, M. (2014). Arqueologia da Arquitetura na Ermida de Nossa Senhora da Assunção de Paderne pelo olhar da Arqueologia da Arquitetura. Promotoria Revista do Departamento de História, Arqueologia e Património da Universidade do Algarve, Loulé: DHAPUA (No prelo).
- Ribeiro, D.; Silva, V.; Faria, P. (2016). Caracterização de blocos de terra comprimida. TEST&E 2016–1º Congresso de Ensaio e Experimentação em Engenharia Civil–Ensaio para Reabilitar (CD-rom).
- Rocha, M. (2003). Obras de Consolidación en la Alcazaba de Reina - Informe Tapia, Antaño Restauración S.L., Navalmoral de la Mata, España.
- Rocha, M. (2005). Consolidação das muralhas de taipa no Castelo de Reina. Terra em Seminário 2005, Lisboa: Argumentum, p. 117-120.
- Rocha, M. (2015), Técnicas de construção com terra. Cadernos de Construção com Terra 1, Lisboa: Argumentum.
- Santos Silva, A. (2001). Caracterização de argamassas do Castelo de Paderne. Lisboa: LNEC. Nota Técnica 41/2001 - DMC.
- Santos Silva, A.; Salta, M.; Braga Reias, M. (1994). – A Microscopia Electrónica de Varrimento e Microanálise de Raios X por Dispersão de Energia. Informação Científica e Técnica de Materiais de Construção - ITCM 22, Lisboa: LNEC.
- Santos, R. (2017). Caracterização de revestimentos de tectos antigos com base em gesso. Contributo para a sua conservação. Dissertação de Mestrado, FCT NOVA.
- Santos, T.; Nunes, L.; Faria, P. (2017). Production of eco-efficient earth-based plasters: influence of composition on physical performance and bio-susceptibility. Journal of Cleaner Production, 167, p. 55-67
- Silva, R. A. M. (2013). Repair of Earth Constructions by Means of Grout Injection. Dissertação de Doutoramento, Universidade do Minho.
- Trindade Chagas, A. (2005). Castelo de Alcácer do Sal - Salvaguarda e autenticidade. Arquitectura de Terra em Portugal (Ed. Correia, M., Fernandes, M., Jorge, F.). Lisboa: Argumentum, p. 220-225.
- Zamorano, M. A. D. (2007). El recinto amurallado de Niebla y la restauración arquitectónica de posguerra: las propuestas de Félix Hernández Giménez. Congreso Internacional Ciudades Amuralladas: Pamplona, Institución Príncipe de Viana, p.18.

Sites:

- [W1] http://www.monumentos.gov.pt/Site/APP_PagesUser/SIPASearch.aspx?id=0c69a68c-2a18-4788-9300-11ff2619a4d2 (Acesso 23/08/2018)
- [W2] <http://www.patrimoniocultural.gov.pt/pt/patrimonio/patrimonio-imovel/> (Acesso 16/02/2018)
- [W3] https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Vista_da_Fortaleza_de_Juromanha.jpg (Acesso 23/08/2018)
- [W4] https://www.eldiario.es/murcia/sociedad/impactante-video-castillo-Monteagudo-Huemur_0_748925486.html (Acesso 23/08/2018)

Anexo A – Curva granulométrica escarpão

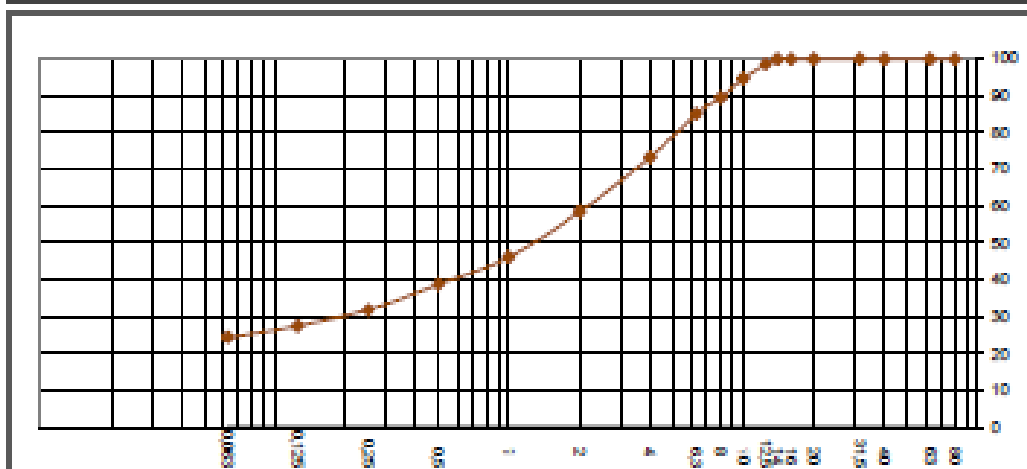


Amostra: 1721140
 Data ensaio: 07-12-2017
 Ensaio: Amc
 Validou:





RELATÓRIO DE ENSAIO ANÁLISE GRANULOMÉTRICA (AGREGADOS) / EN 933-1





CLIENTE: Secilbritas
 PROCESSO:
 DESIGNAÇÃO: Debritos
 DATA RECEÇÃO: 05-12-2017
 RELATÓRIO Nº: 1721140,01
 PROVENIÊNCIA: Escarpão



m_1	Massa seca total		g	1677
m_2	Massa seca após lavagem		g	1270
$m_1 - m_2$	Massa seca dos finos removidos por lavagem		g	407
Dimensão das aberturas dos peneiros	Material Retido (R_i)		Porcentagem acumulada do material que passa	Procedimento usado:
	g	%		
mm			0,1%	Lavagem e peneiração
80		0	100	Obs: -Redução de amostra de acordo com a NP EN 933-2 -Este relatório só pode ser reproduzido na íntegra -O resultado dos ensaios referem-se exclusivamente aos itens ensaiados. - Série base + série 2
63		0	100	
40		0	100	
31,5		0	100	
20		0	100	
16		0	100	
14		0	100	
12,5	25	1	99	
10	66	4	95	
8	86	5	89	
6,3	75	4	85	
4	196	12	73	
3	249	15	58	
1	206	13	46	
0,500	125	7	39	
0,250	115	7	32	
0,125	74	4	27	
0,063	52	3	24,3	
Perdas na lavagem	407	24	0,1	Validação Resultado:
Retido no fundo P=	1	0	0,0	< 1% 0,1%
Total	1677	100		Porcentagem de Finos:
Modulo de Finura			3,566	24,3%



Anexo B – Resultados da análise visual

Amostra	Consistên- cia	Tipo Agregados				Forma Agregados			Cor	Aspetos Particulares		
		Silici- osos	Calcá- rios	Fragmentos Cerâmicos	Ou- tros	Angu- loso	Sub-ro- lado	Ro- lado		Nódulos de Cal	Colonização Biológica	Outros
 AM1	Alguma con- sistência	X	X	-	-	-	X	X	Creme com barramento de cor branca acinzentada	X	X	-
 AM2	Consistente	X	X	-	-	-	-X	X	Creme com barramento de cor branca acinzentada	X	-	Separação entre ca- madas visível
 AM4	Pouco con- sistente	X	X	-	-	-	X	X	Acinzentado	X	-	Presença de fósseis
 AM6	Pouco con- sistente	X	X	-	-	-	-	X	Creme acastanhado	X	-	-

Amostra	Consistência	Tipo Agregados				Forma Agregados			Cor	Aspetos Particulares		
		Silicio- sos	Calcá- rios	Fragmentos Ce- râmicos	Ou- tros	Angu- loso	Sub-ro- lado	Ro- lado		Nódulos de Cal	Colonização Bi- ológica	Outros
 <p>AM10</p>	Alguma consis- tência	-	X	-	-	-	X	X	Avermelhado	X	-	-
 <p>AM11</p>	Alguma consis- tência	-	X	-	-	X	-	X	Vermelho ro- sado	X	-	-
 <p>CP2018A</p>	Pouco consis- tente	X	X	-	-	-	X	X	Rosado	-	-	-
 <p>CP2018B</p>	Alguma consis- tência	X	X	-	-	X	X	X	Avermelhado	X	-	Presença de bo- lores

Amostra	Consistência	Tipo Agregados				Forma Agregados			Cor	Aspetos Particulares		
		Silicio- sos	Calcá- rios	Fragmentos Ce- râmicos	Outros	Angu- loso	Sub-ro- lado	Ro- lado		Nódulos de Cal	Colonização Bi- ológica	Outros
 <p>CP2018C</p>	Alguma consis- tência	X	X	-	Marga	X	X	X	Averme- lhado	X	X	-
 <p>CP2018D</p>	Consistente	X	X	-	Presença de carvão	X	X	X	Rosado	X	X	-

Anexo C – Resultados da caracterização química, mineralógica e granulométrica

1 – Observação à lupa binocular

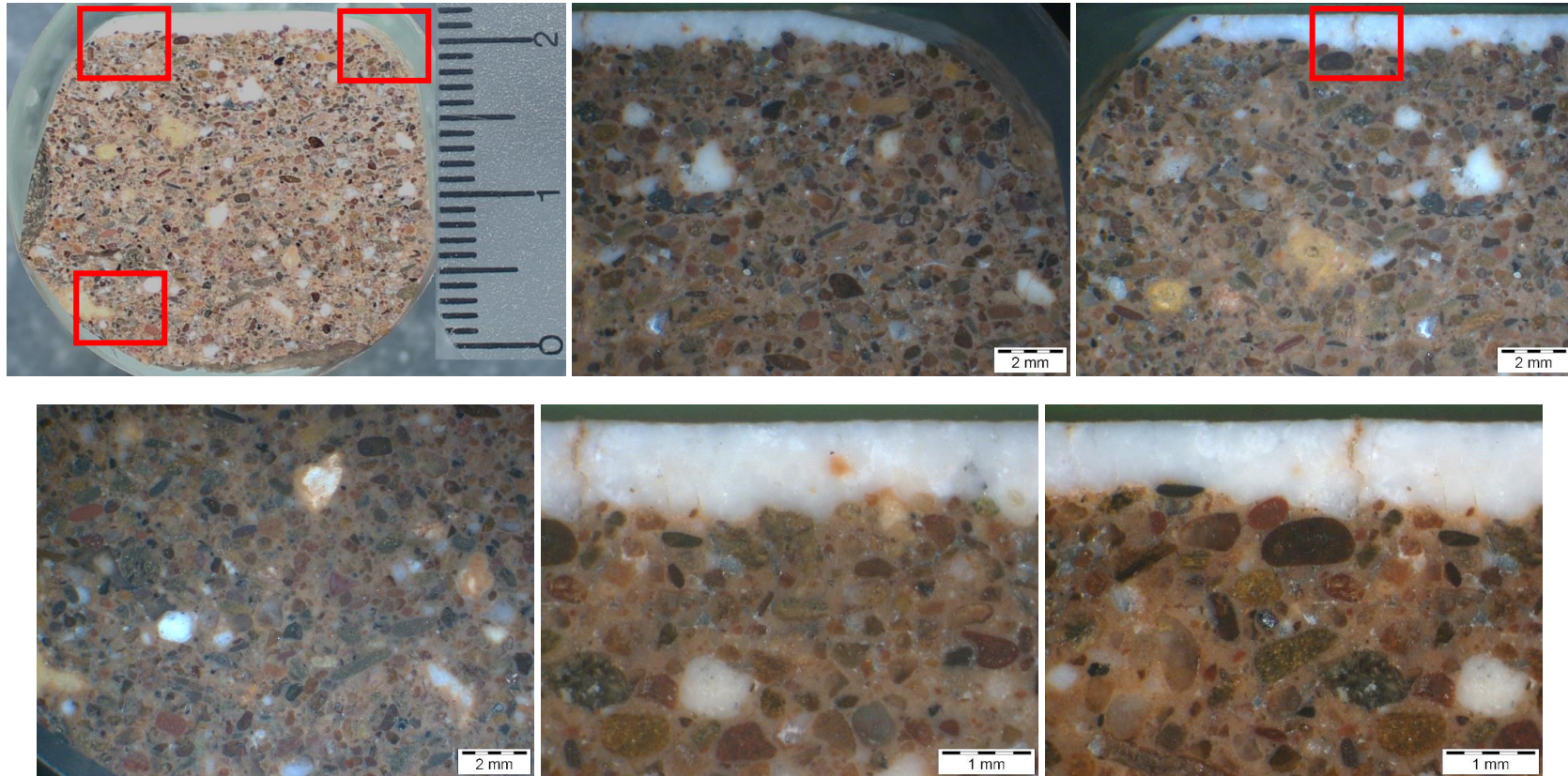


Figura C.1 – Amostra AM1 observada à lupa binocular: amostra constituída por barramento e argamassa

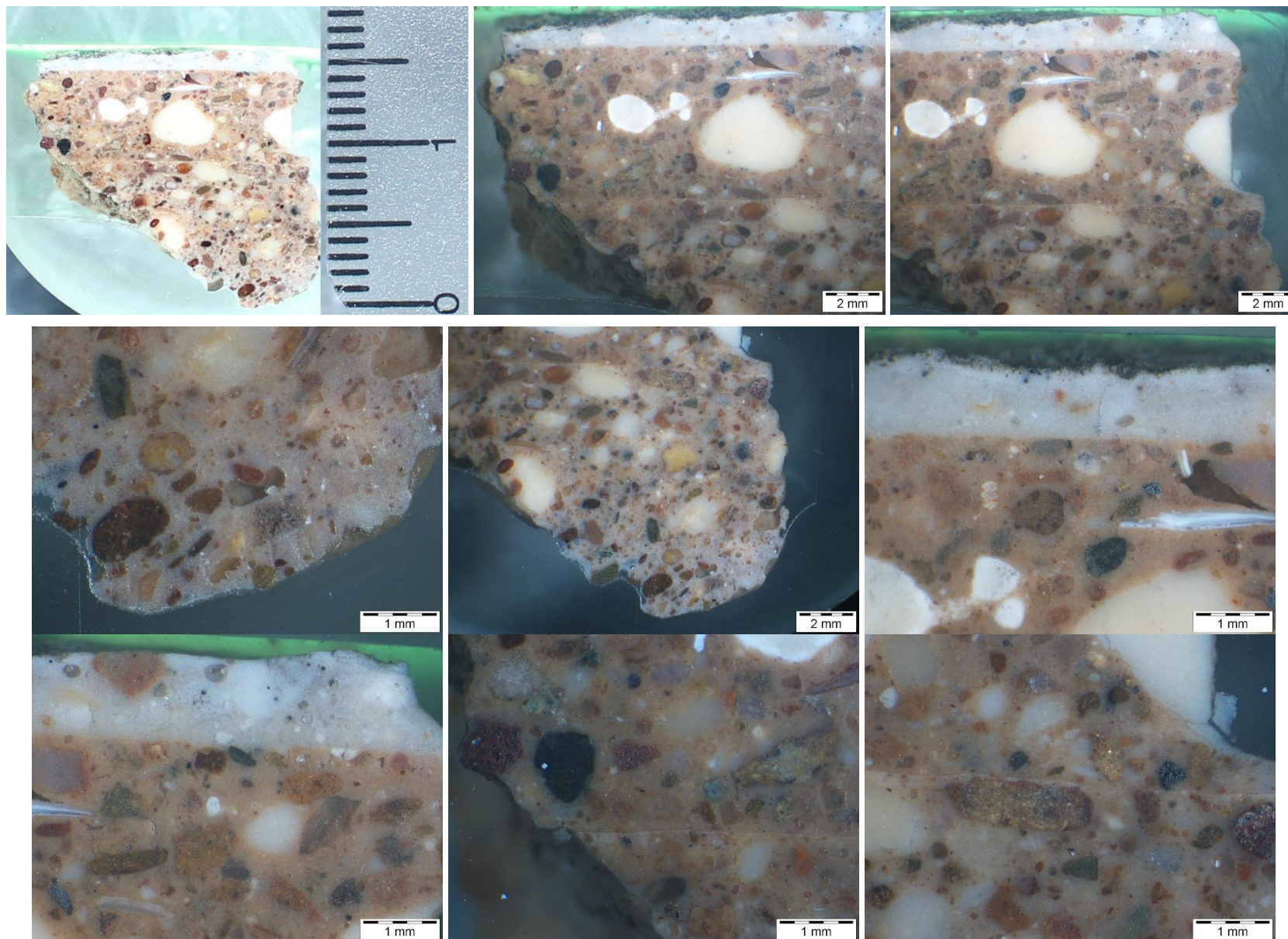


Figura C.2 – Amostra AM2 observada à lupa binocular: amostra constituída por barramento e argamassa

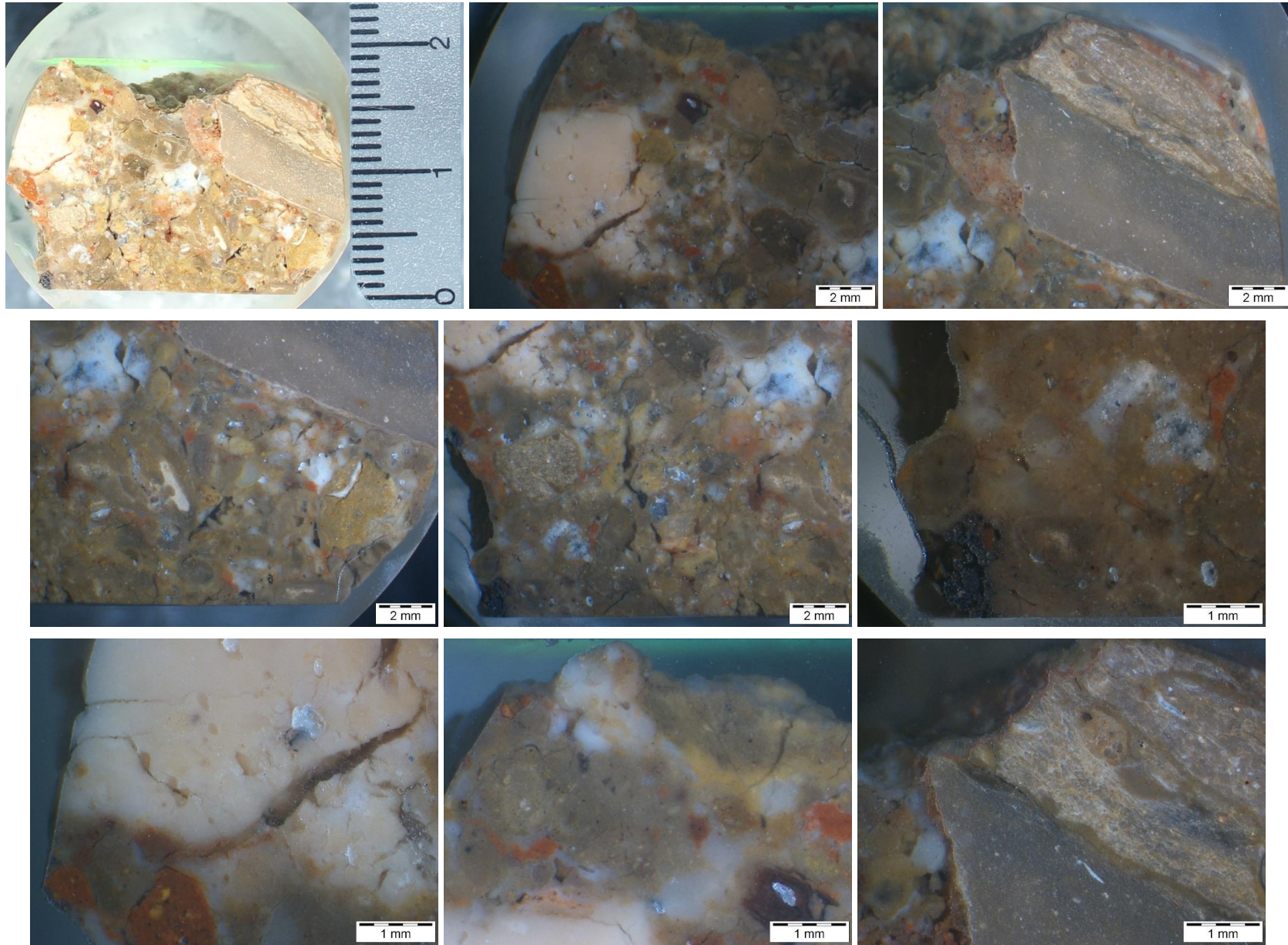


Figura C.3 – Amostra AM10 observada à lupa binocular: amostra de taipa

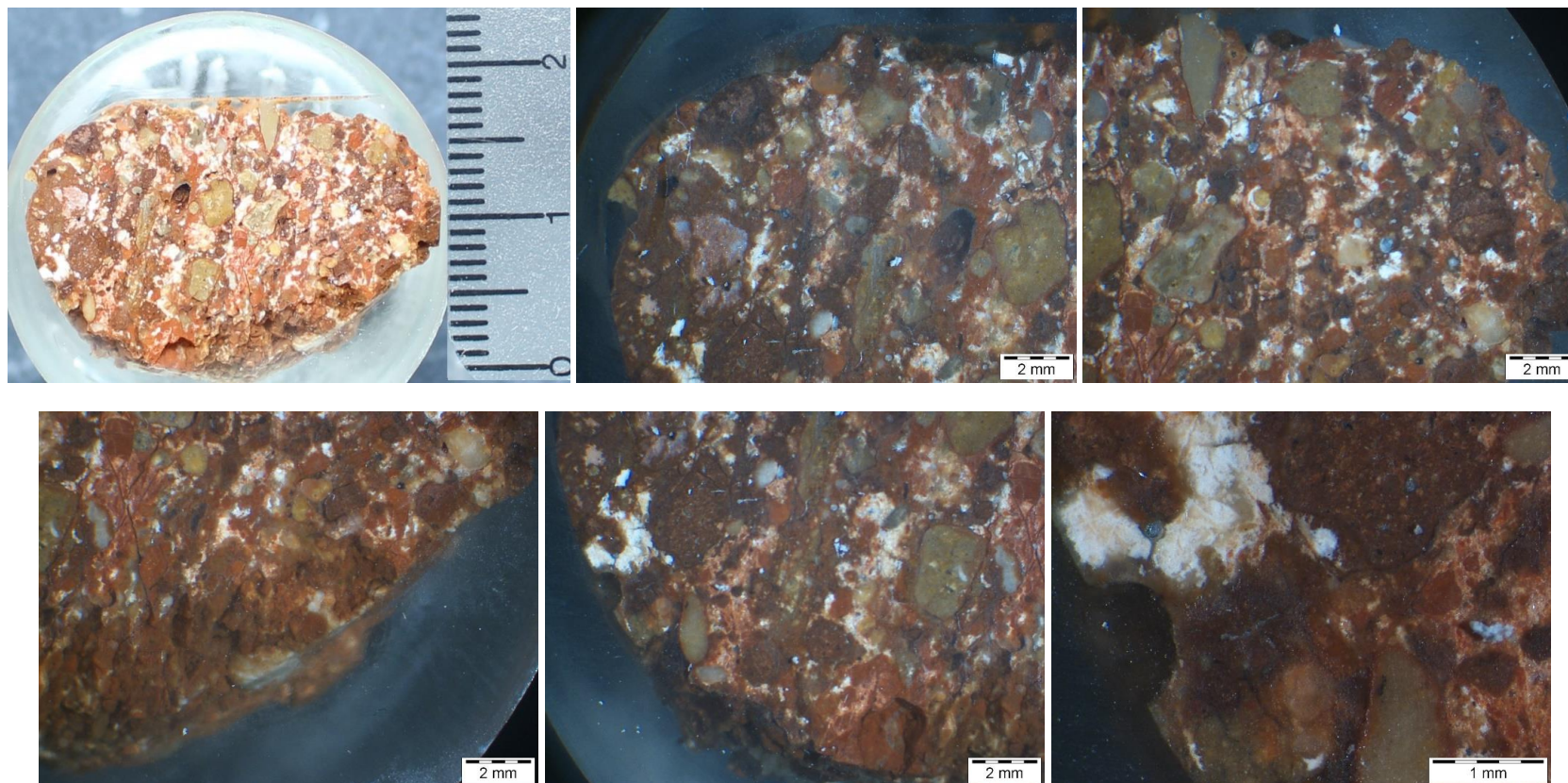


Figura C.4 – Amostra AM11 observada à lupa binocular: amostra de taipa

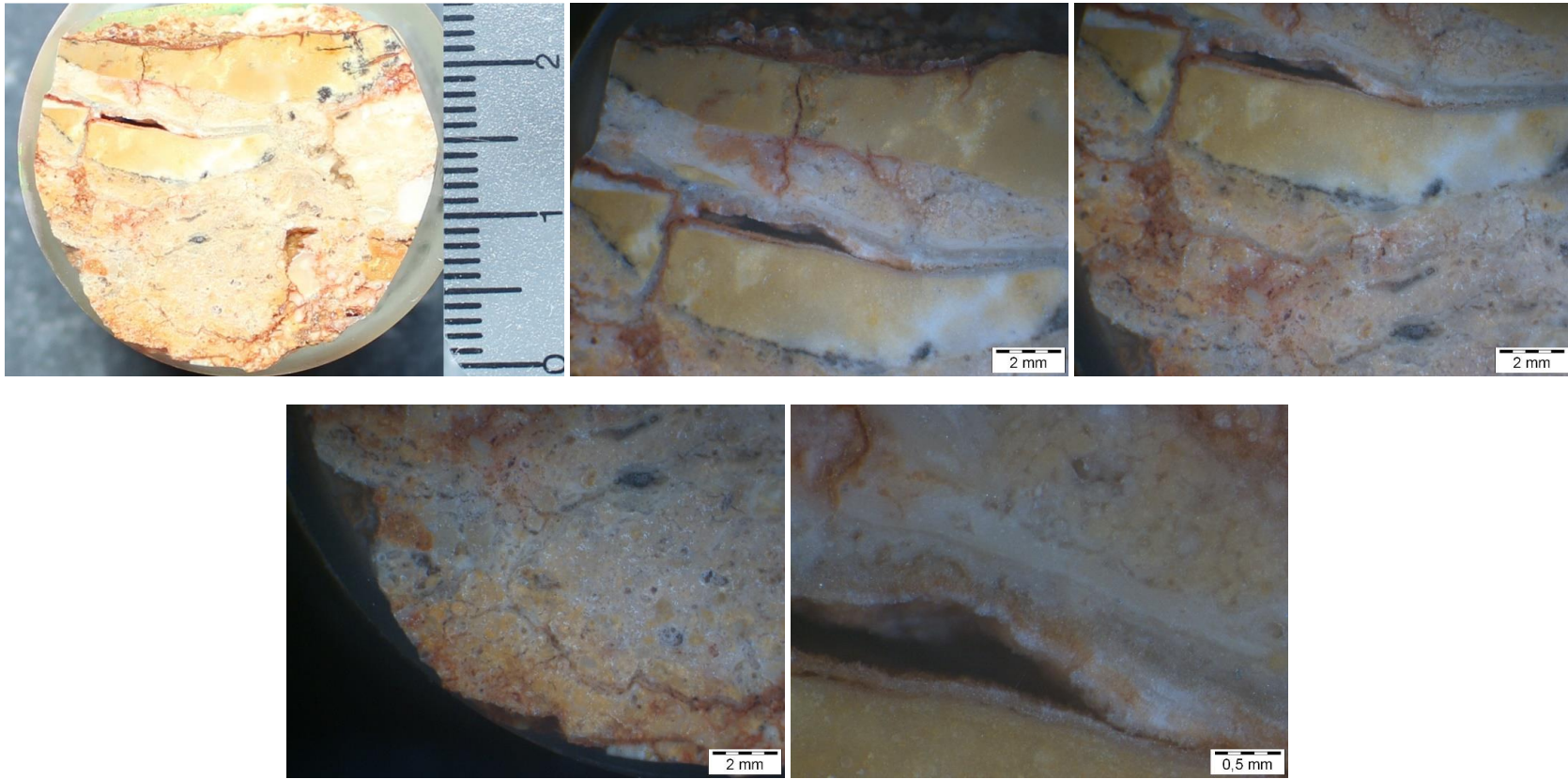


Figura C.5 – Amostra CP2018A observada à lupa binocular: amostra de taipa

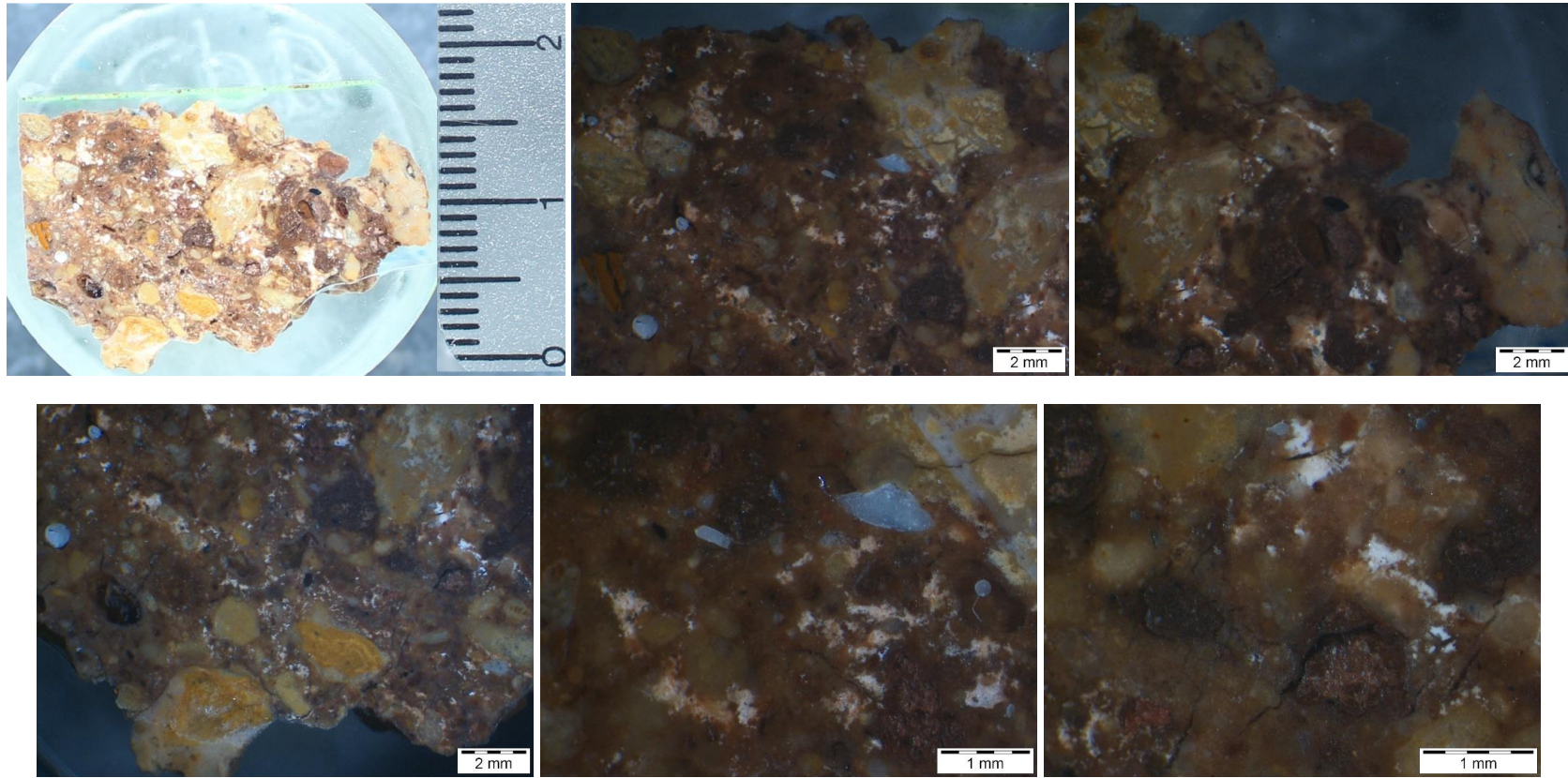


Figura C.6 – Amostra CP2018B observada à lupa binocular: amostra de taipa

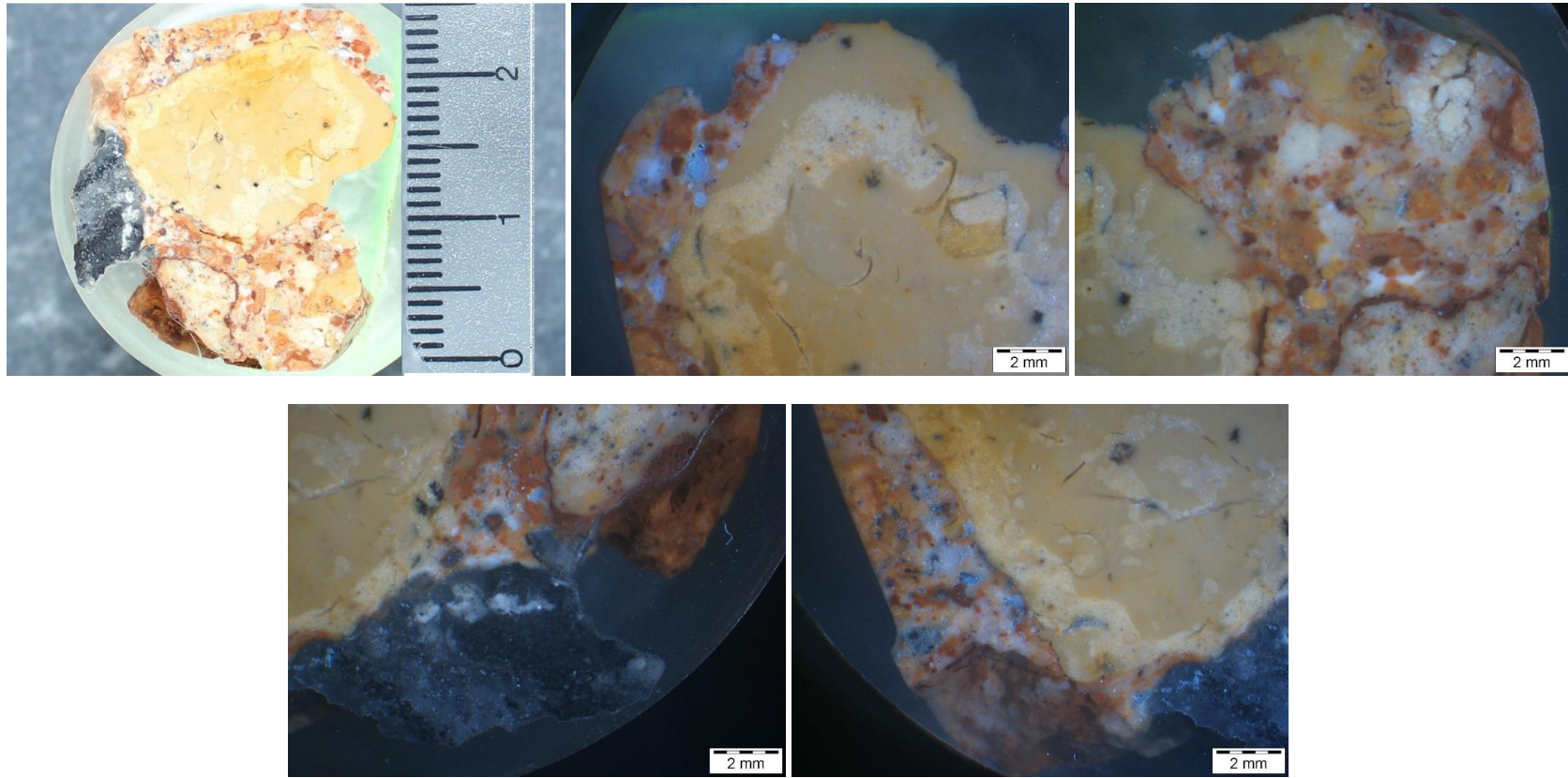


Figura C.7 – Amostra CP2018C observada à lupa binocular: amostra de taipa

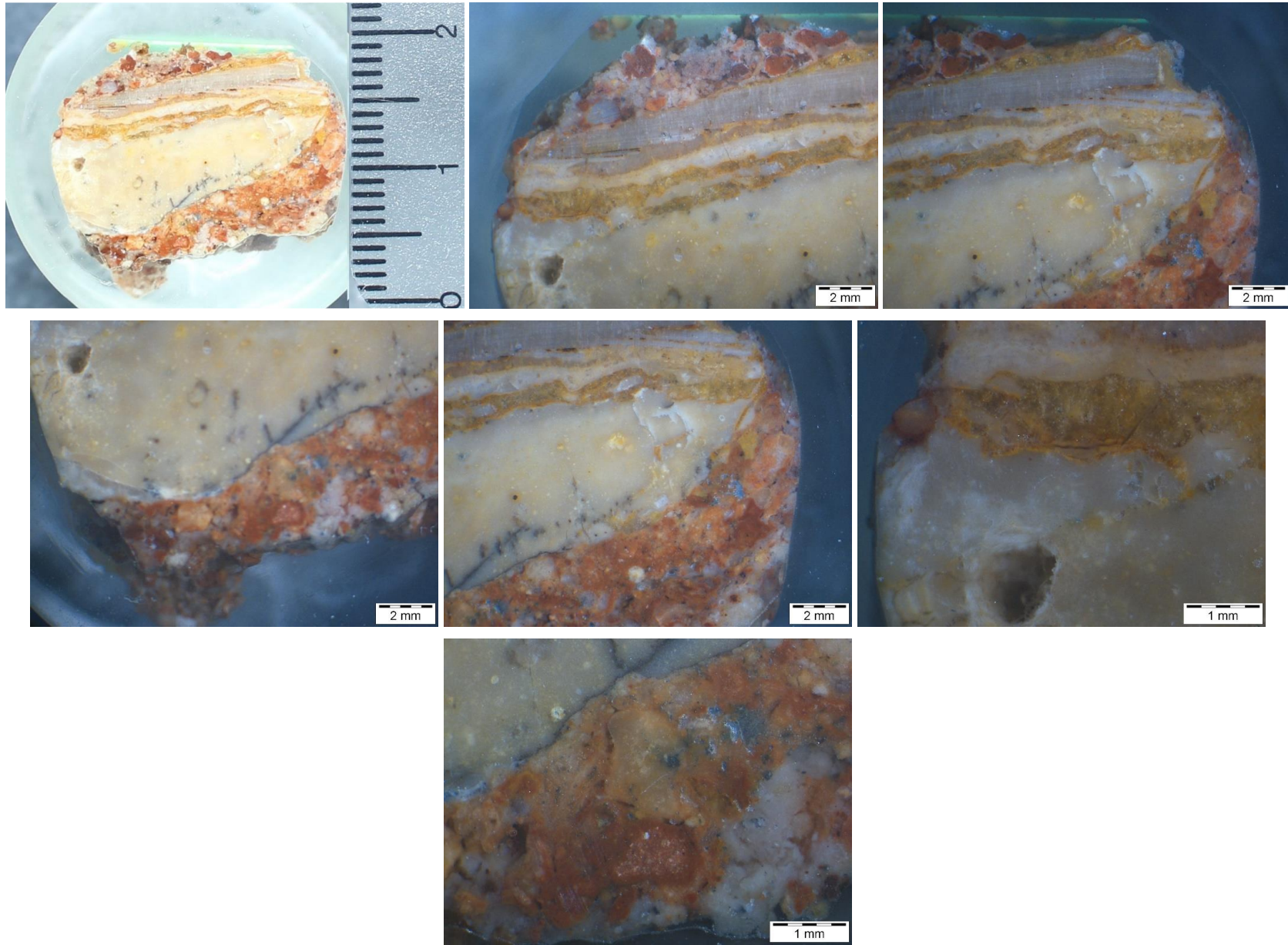


Figura C.8 – Amostra CP2018D observada à lupa binocular: amostra de taipa.

2 – Observação ao microscópio petrográfico

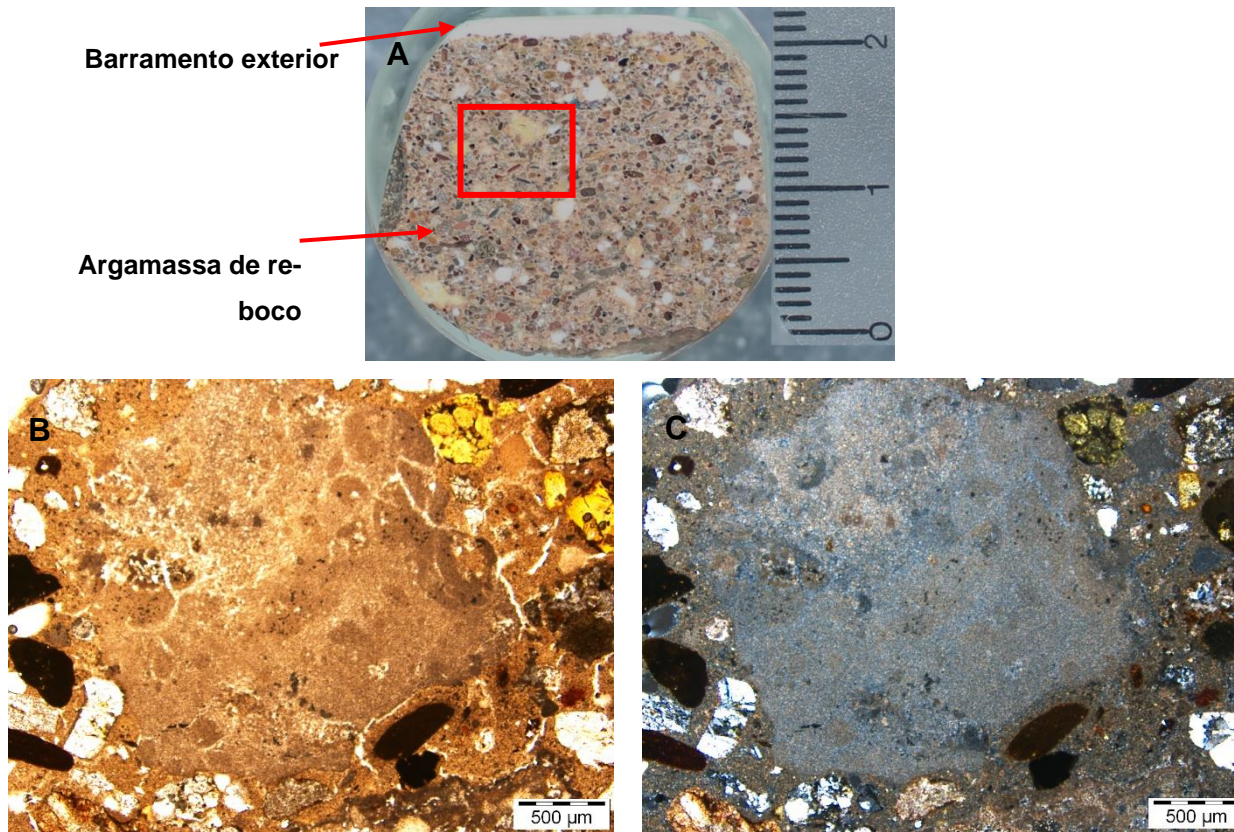


Figura C.9 – Amostra AM1: A - Imagem à lupa binocular da estratigrafia da amostra e onde é visível a presença de duas camadas distintas – barramento branco e argamassa de reboco; B e C - Imagens ao microscópio petrográfico da área assinalada a vermelho em A e correspondentes a um nódulo de cal na pasta da argamassa; à esquerda imagem obtida com nicóis paralelos (N//) e à direita com nicóis cruzados (NX).

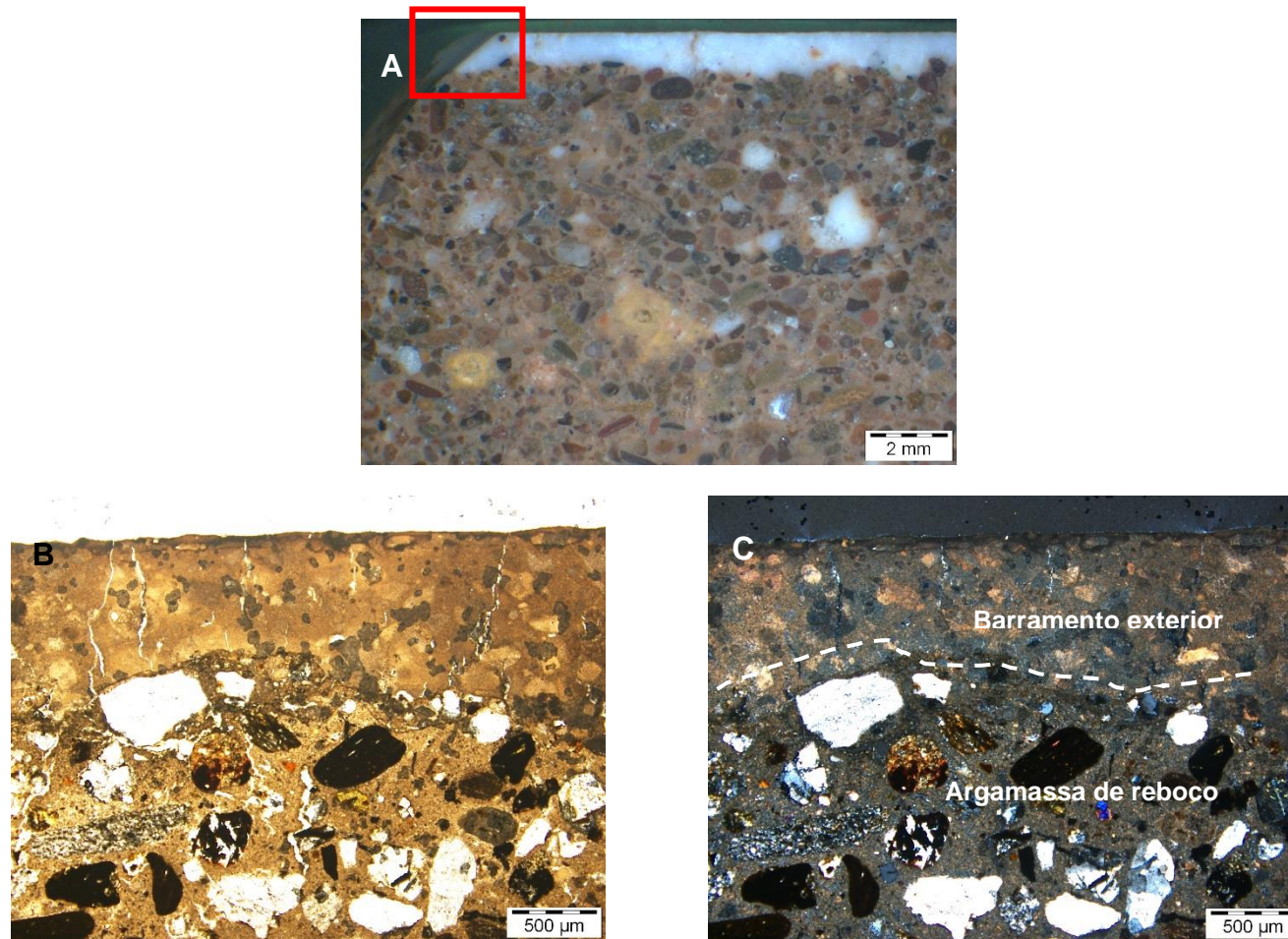


Figura C.10 – Amostra AM1: A - Imagem à lupa binocular da estratigrafia da amostra e onde é visível a presença de duas camadas distintas – barramento branco e argamassa de reboco; B e C - Imagens ao microscópio petrográfico da área assinalada a vermelho em A e correspondentes à interface barramento/argamassa; no barramento são visíveis microfissuras perpendiculares à superfície exterior; à esquerda imagem obtida com N// e à direita com NX.

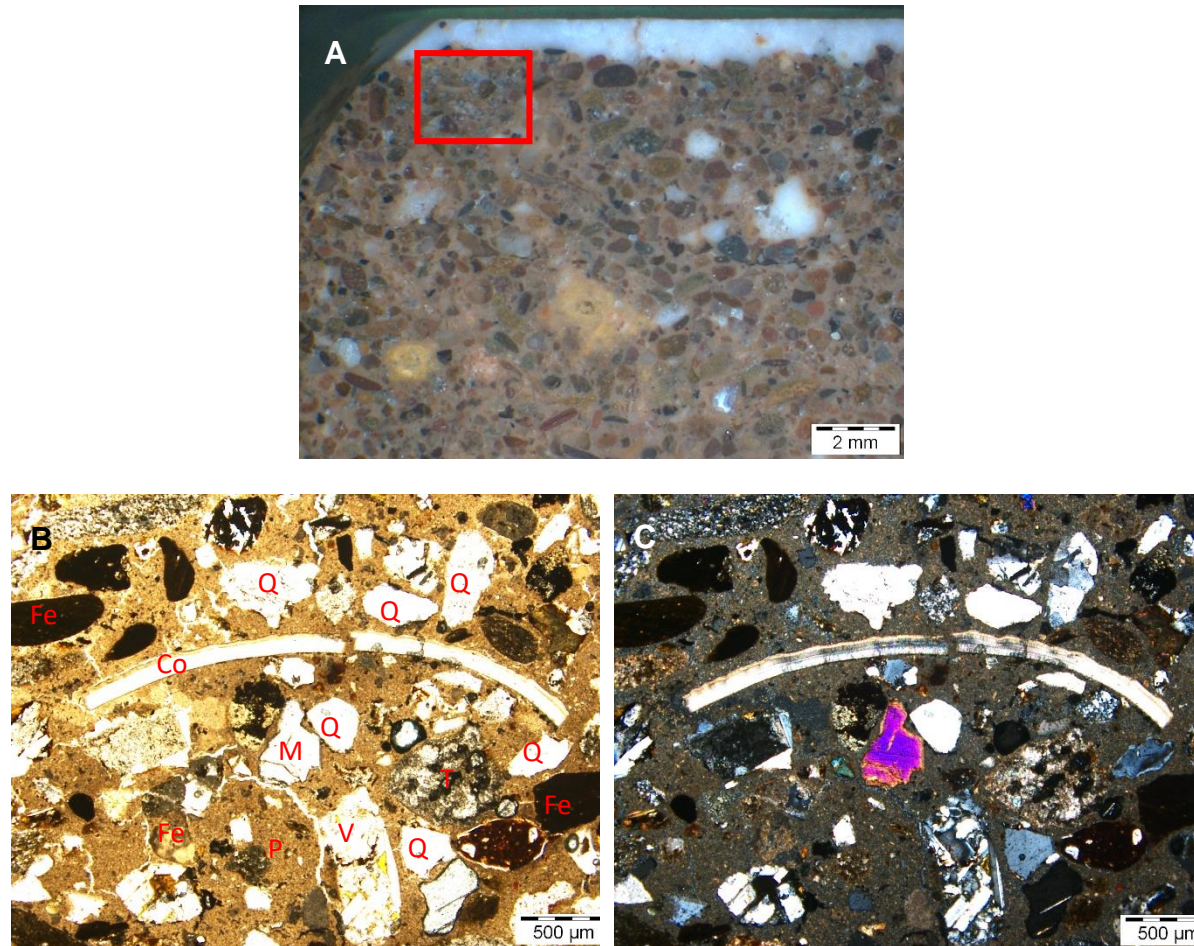


Figura C.11 – Amostra AM1: A - Imagem à lupa binocular da estratigrafia da amostra e onde é visível a presença de duas camadas distintas – barramento branco e argamassa de reboco; B e C - Imagens ao microscópio petrográfico que evidenciam a variedade de agregados existentes. São ainda visíveis microfissuras de retração na pasta. Notação: quartzo (“Q”), cocha ou fragmento de concha (“Co”); litoclastos vulcânicos (“V”); óxidos/hidróxidos de ferro (“Fe”); mica (“M”); pasta (“P”); terra (“T”). Imagens à esquerda obtidas com nicóis paralelos e à direita com nicóis cruzados da área assinalada a vermelho em A e correspondentes à interface barramento/argamassa; à esquerda imagem obtida com N// e à direita com NX.

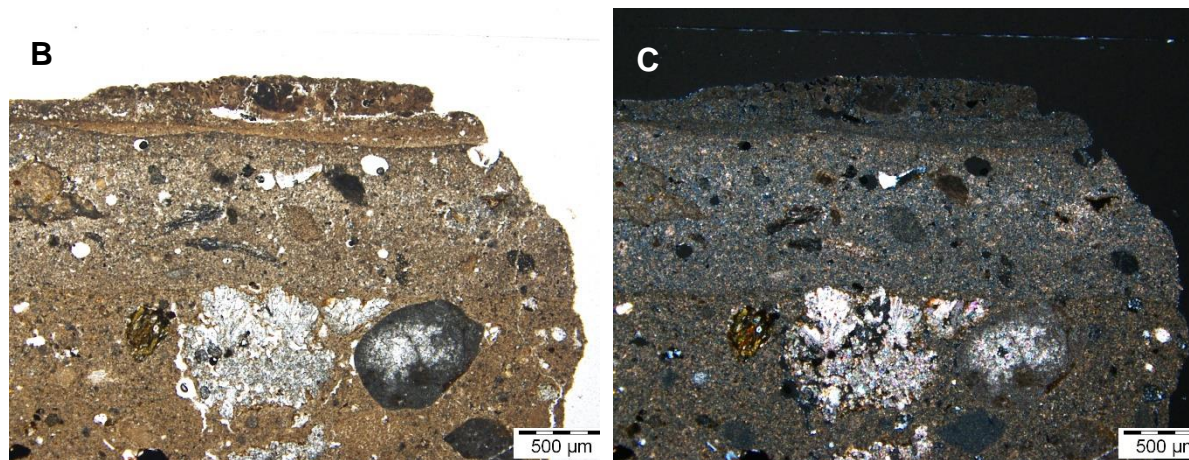
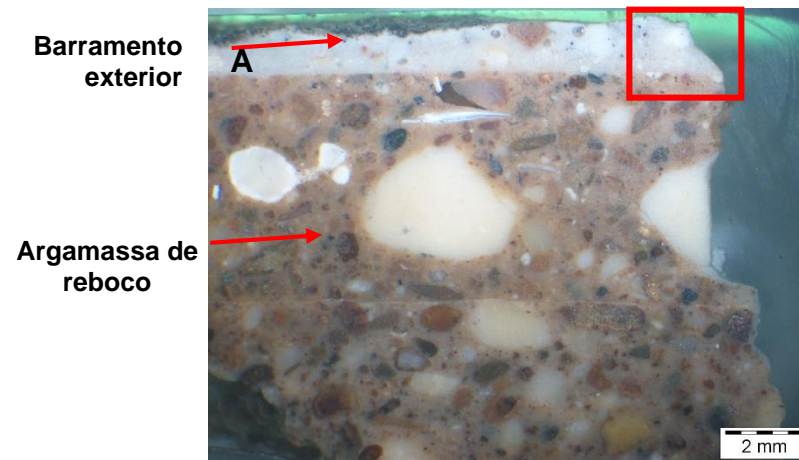


Figura C.12 – Amostra AM2: A - Imagem à lupa binocular da estratigrafia da amostra e onde é visível a presença de duas camadas distintas – barramento branco e argamassa de reboco B e C - Imagens ao microscópio petrográfico da área assinalada a vermelho em A e correspondentes ao barramento que é constituído por três camadas distintas; à esquerda imagem obtida com N// e à direita com nicóis cruzados NX.

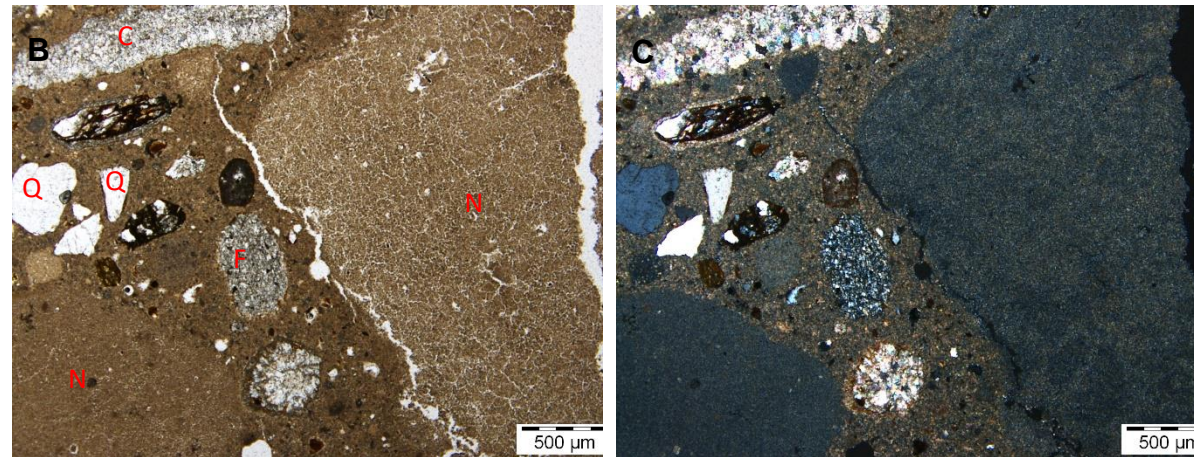
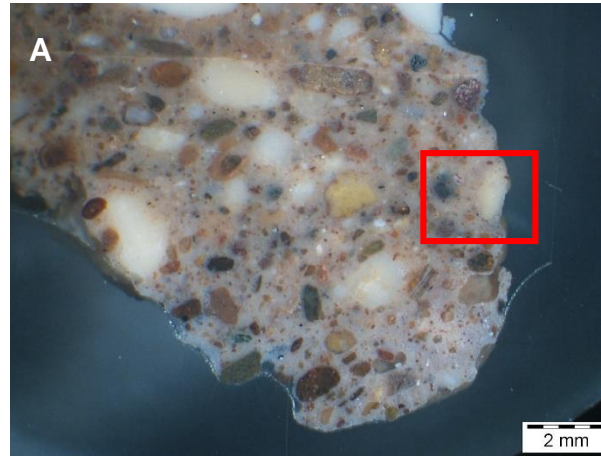


Figura C.13 – Amostra AM2: A - Imagem à lupa binocular da amostra de uma argamassa de reboco; B e C - Imagens ao microscópio petrográfico da área assinalada a vermelho em A e correspondentes a dois nódulos de cal na pasta da argamassa e a diversos agregados. Notação: nódulo de cal (“N”); quartzo (“Q”), calcário (“C”); feldspatos (“F”); à esquerda imagem obtida com N// e à direita com NX.

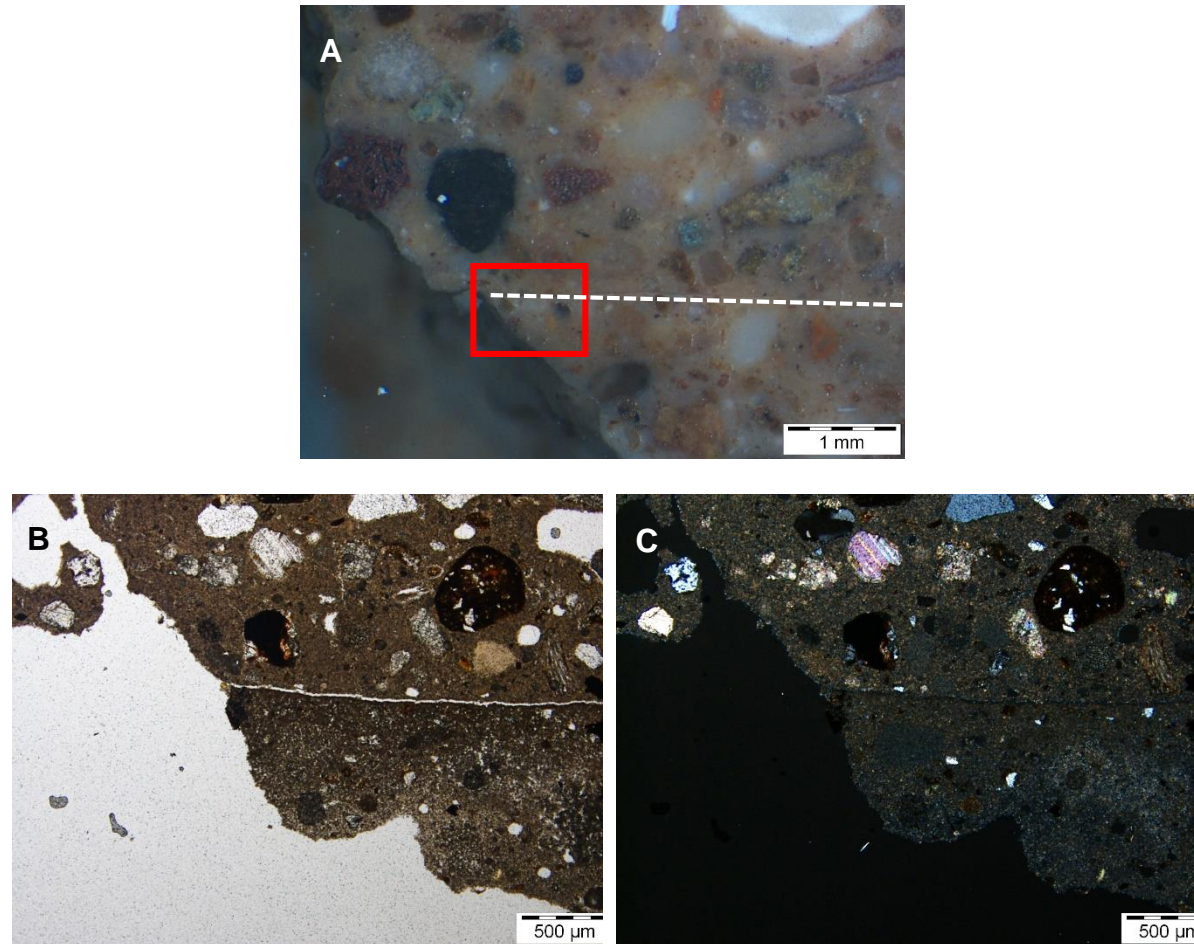


Figura C.14 – Amostra AM2: A - Imagem à lupa binocular da estratigrafia da amostra e onde é visível a presença de duas camadas distintas na argamassa; B e C - Imagens ao microscópio petrográfico da área assinalada a vermelho em A e correspondentes à interface entre as duas argamassas; à esquerda imagem obtida com N// e à direita com NX.

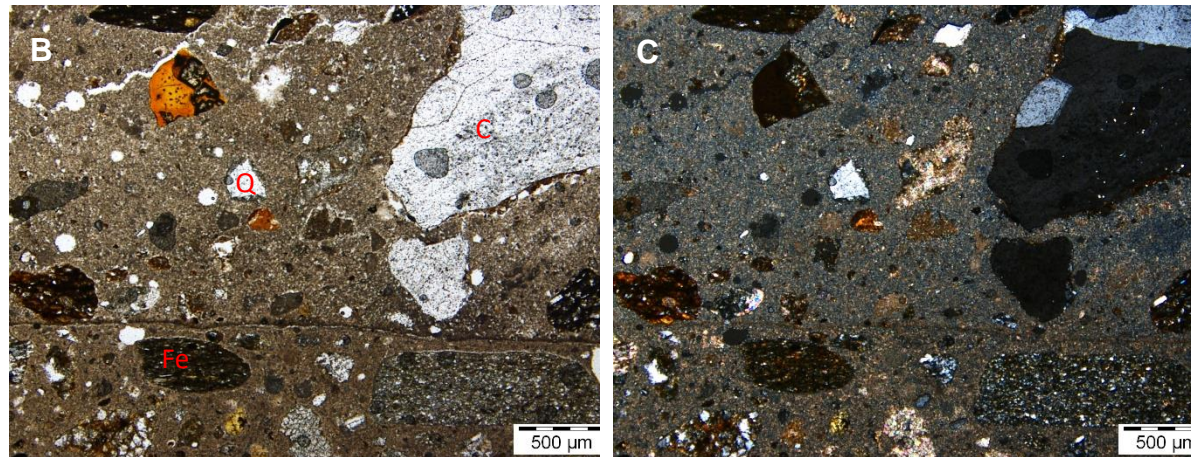
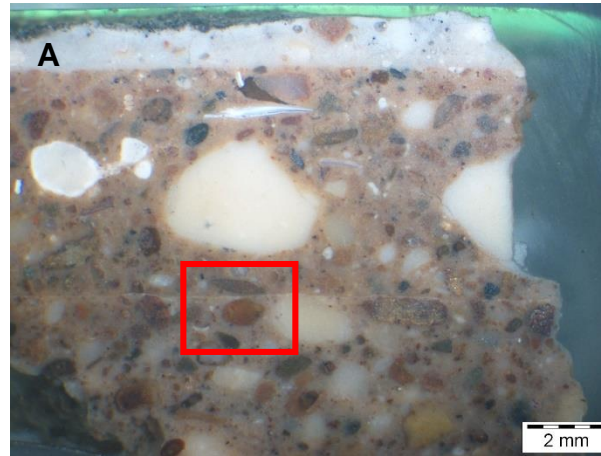


Figura C.15 – Amostra AM2: A - Imagem à lupa binocular da amostra; B e C - Imagens ao microscópio petrográfico da área assinalada a vermelho em A e correspondentes à interface entre as duas argamassas, é visível microfissuração de retração na pasta e a diversificação de agregados. Notação: nódulo de cal (“N”); quartzo (“Q”), calcário (“C”); óxidos/hidróxidos de ferro (“Fe”), à esquerda imagem obtida com N// e à direita com NX.

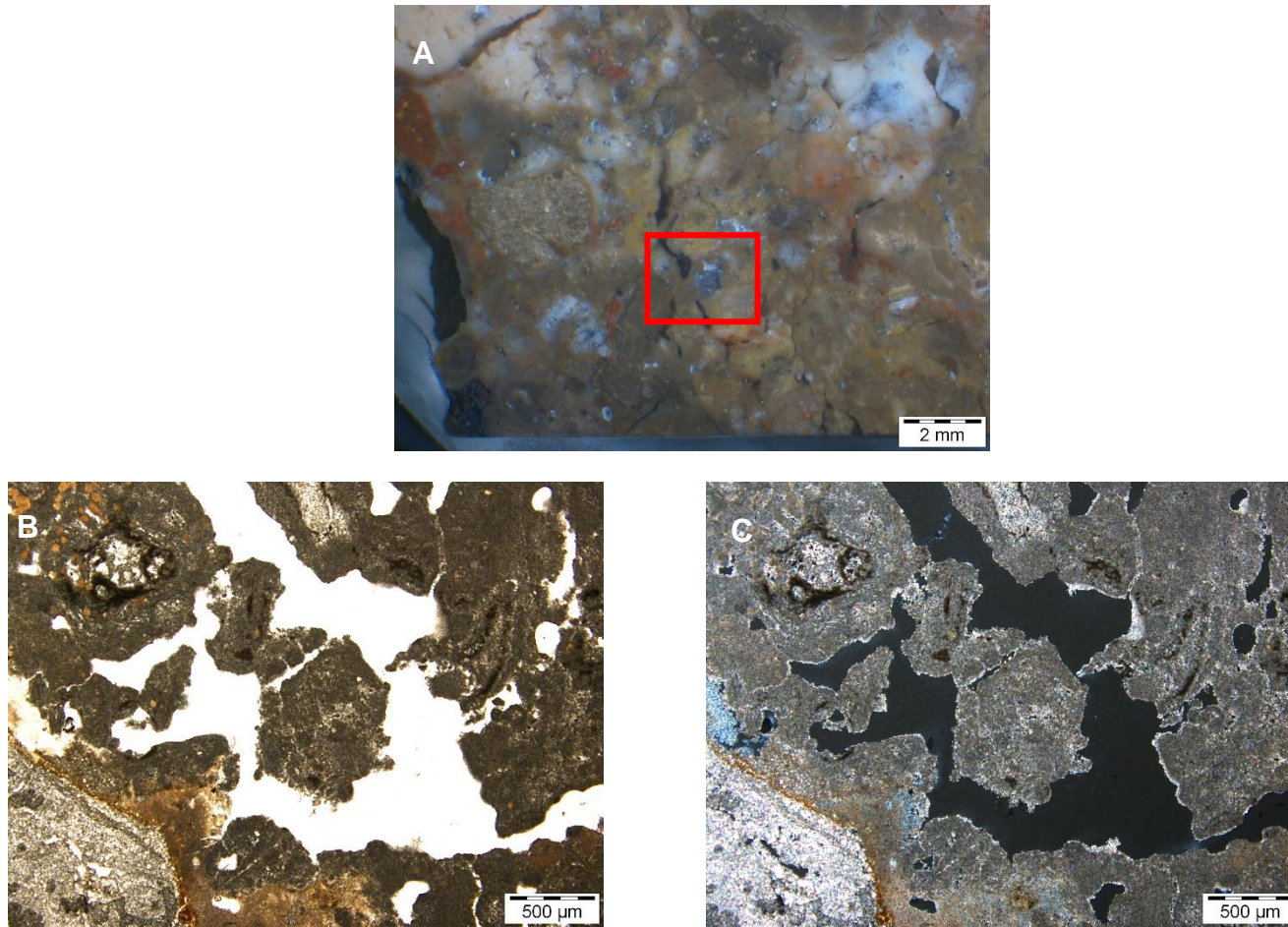


Figura C.16 – Amostra AM10: A - Imagem à lupa binocular da amostra de taipa onde é visível a presença de fissuração B e C - Imagens ao microscópio petrográfico da área assinalada a vermelho em A e correspondentes a zona de pasta bastante rica em cal; à esquerda imagem obtida com N// e à direita com NX.

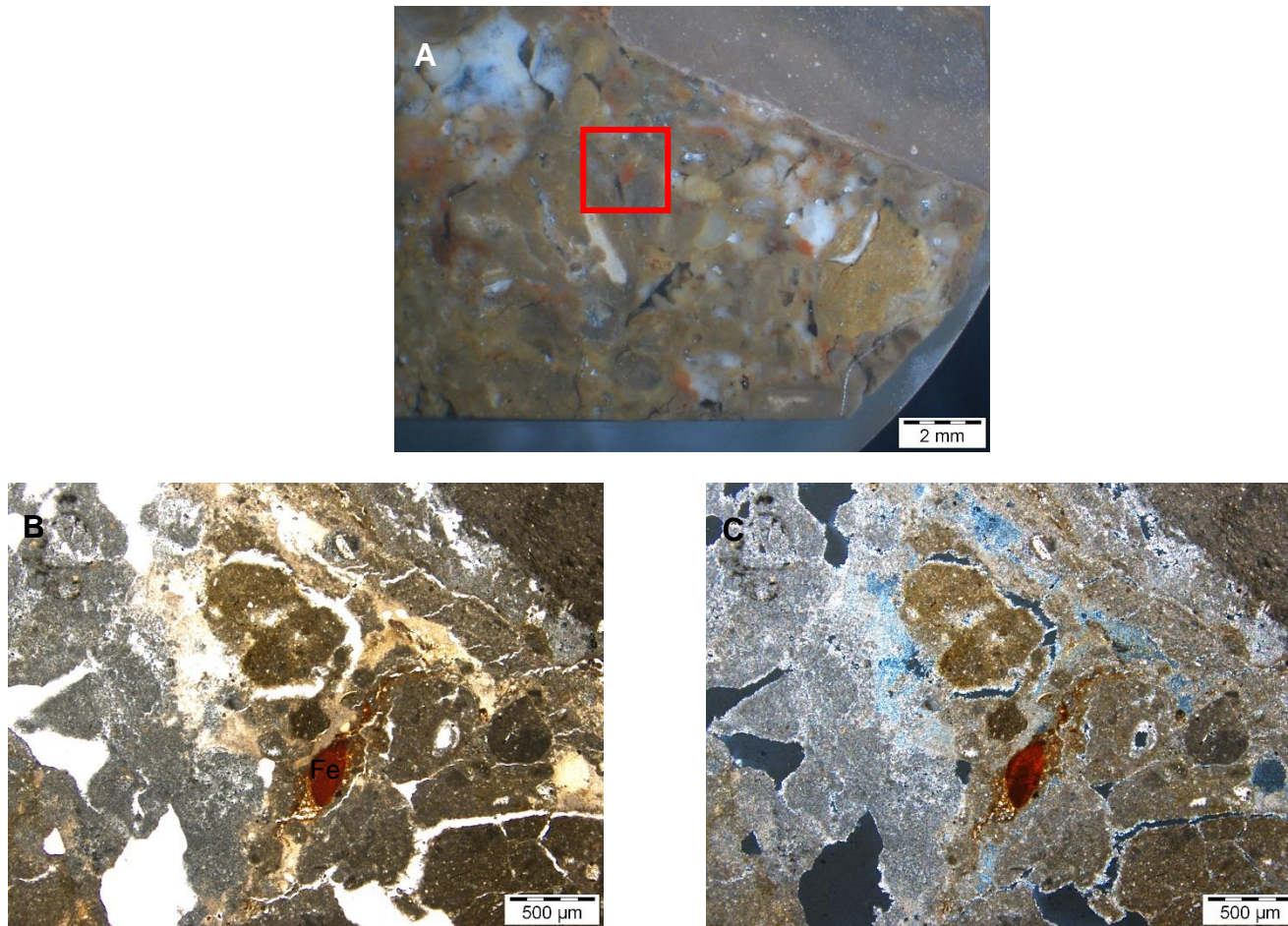


Figura C.17 – Amostra AM10: A - Imagem à lupa binocular da amostra de taipa onde é visível a presença de fissuração B e C - Imagens ao microscópio petrográfico da área assinalada a vermelho em A e correspondentes a zona de pasta bastante rica em cal com a presença de um óxido/ hidróxido de ferre (“Fe”); à esquerda imagem obtida com N// e à direita com NX.

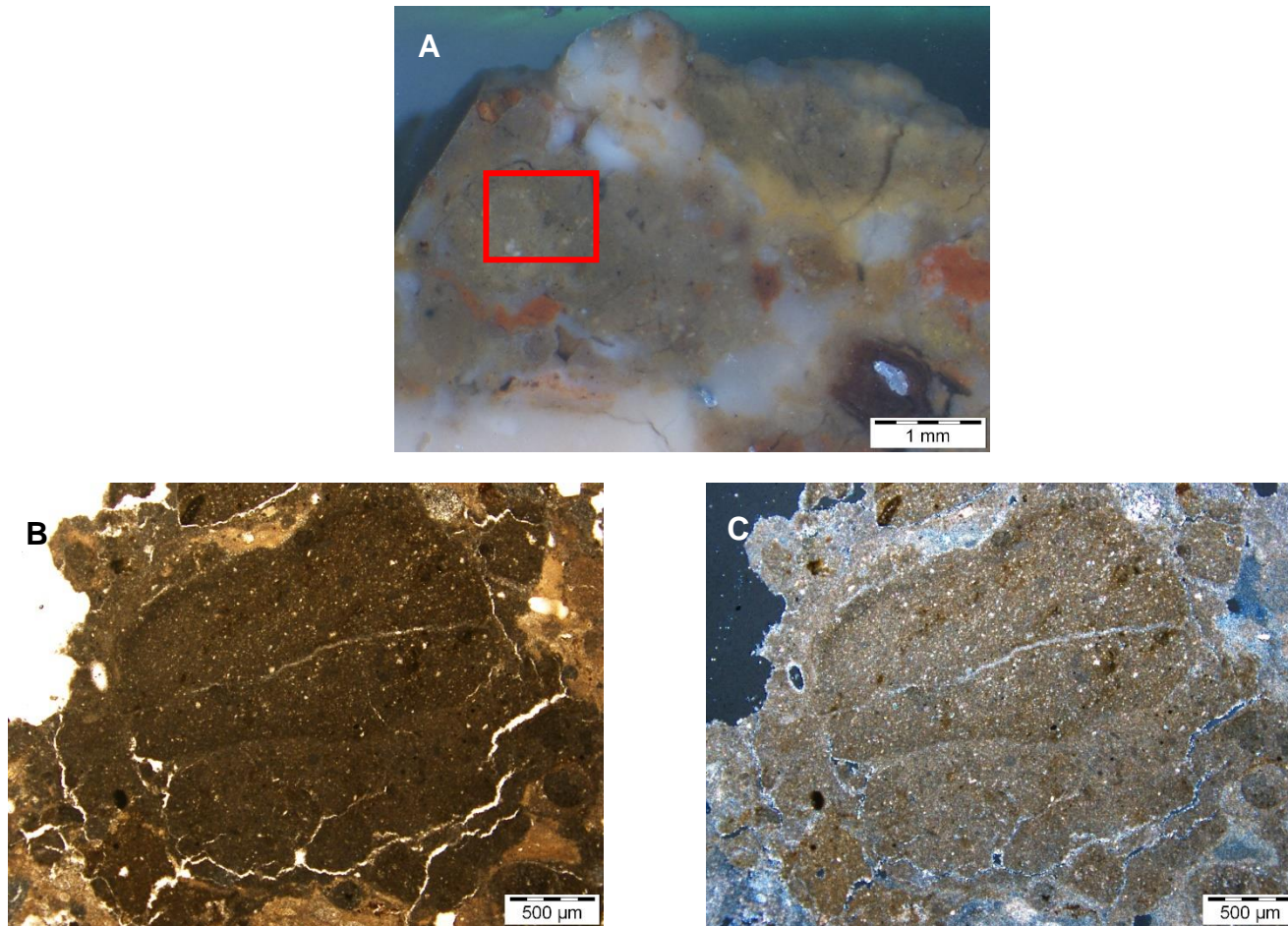


Figura C.18 - Amostra AM10: A - Imagem à lupa binocular da amostra de taipa; B e C - Imagens ao microscópio petrográfico da área assinalada a vermelho em A e correspondentes a um nódulo de cal na pasta de terra; à esquerda imagem obtida com N// e à direita com NX.

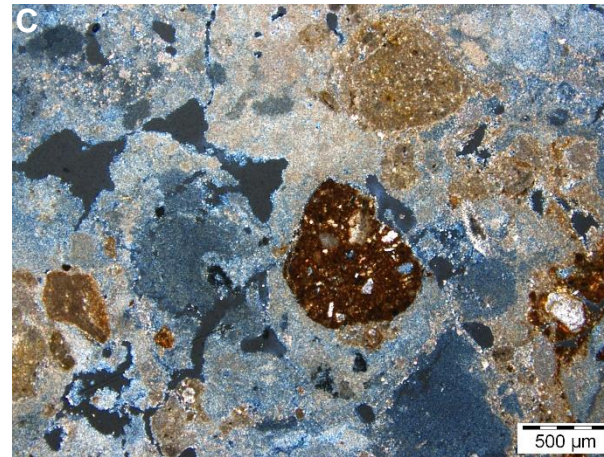
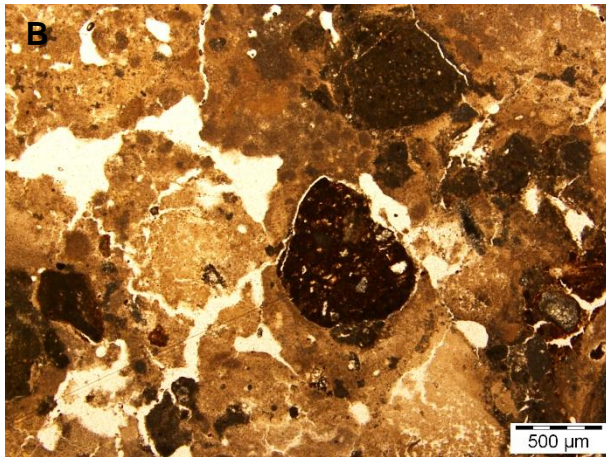


Figura C.19 - Amostra AM10: A - Imagem à lupa binocular da amostra de taipa; B e C - Imagens ao microscópio petrográfico da área assinalada a vermelho em A e correspondentes uma zona bastante rica em cal com a presença de um fragmento de terra que envolve pequenos grãos de quartzo e calcário; à esquerda imagem obtida com N// e à direita com NX.

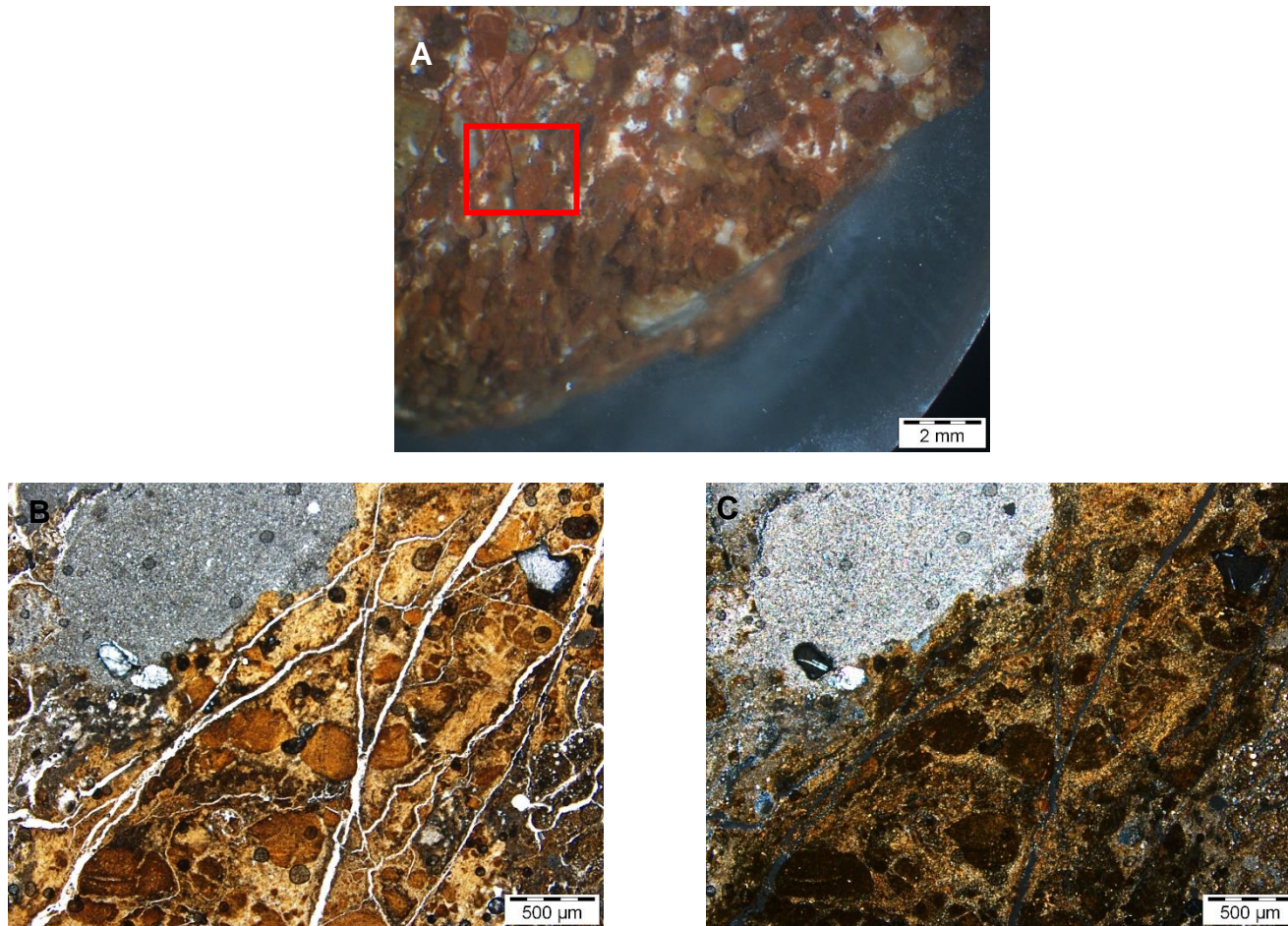


Figura C.20 - Amostra AM11: A - Imagem à lupa binocular da amostra de taipa; B e C - Imagens ao microscópio petrográfico da área assinalada a vermelho em A e correspondentes uma zona de pasta com presença de microfissuração devido à retração da terra; à esquerda imagem obtida com N// e à direita com NX.

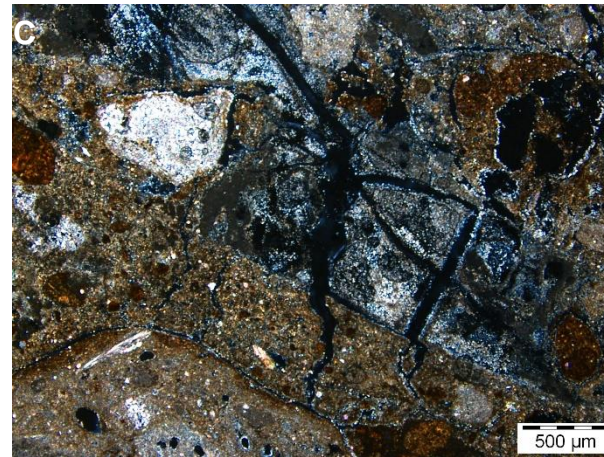
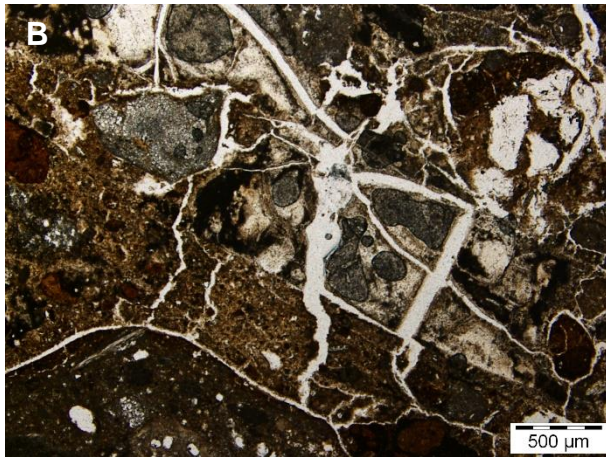


Figura C.21 - Amostra AM11: A - Imagem à lupa binocular da amostra de taipa; B e C - Imagens ao microscópio petrográfico da área assinalada a vermelho em A e correspondentes uma zona de pasta, mais rica em cal, com presença de microfissuração devido à retração da terra; à esquerda imagem obtida com N// e à direita com NX.

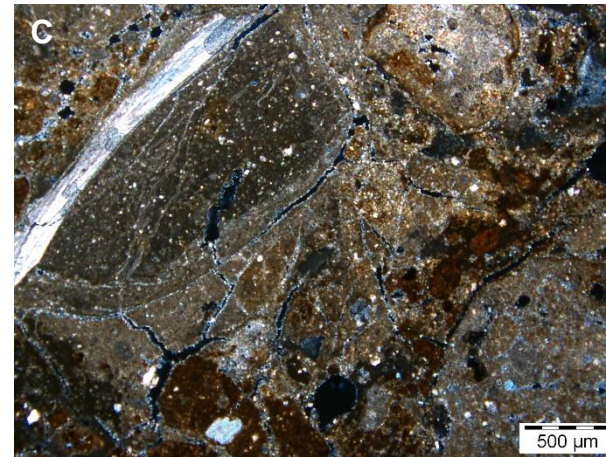
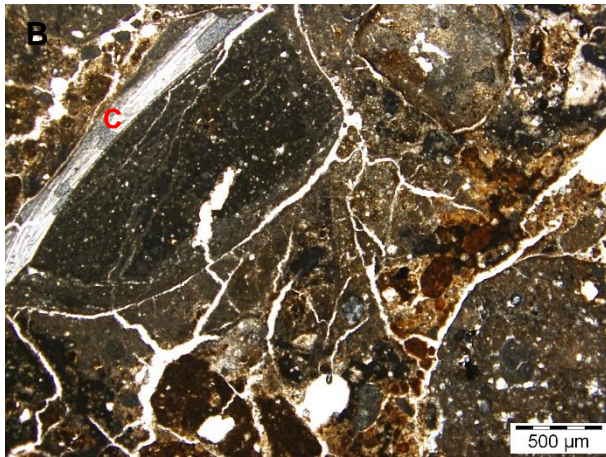


Figura C.22 - Amostra AM11: A - Imagem à lupa binocular da amostra de taipa; B e C - Imagens ao microscópio petrográfico da área assinalada a vermelho em A e correspondentes uma zona de pasta, mais rica em cal, com presença de microfissuração devido à retração da terra, é visível um fragmento de concha ("C"); à esquerda imagem obtida com N// e à direita com NX.

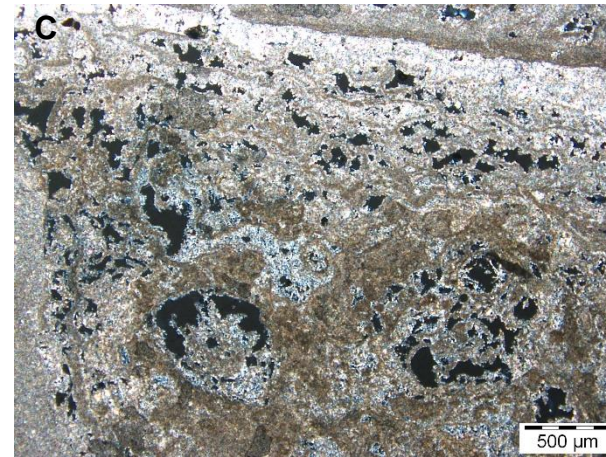
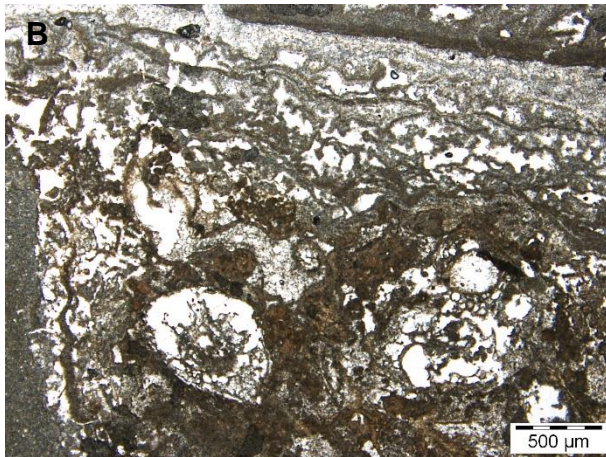
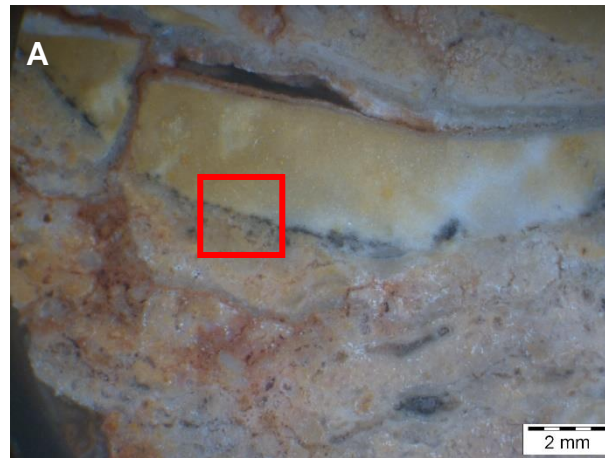


Figura C.23 - Amostra CP2018A: A - Imagem à lupa binocular da amostra de taipa com a presença de calcário bandado; B e C - Imagens ao microscópio petrográfico da área assinalada a vermelho em A e correspondentes uma zona de pasta rica em cal, com presença de poros preenchidos com estrutura rendilhada; à esquerda imagem obtida com N// e à direita com NX.

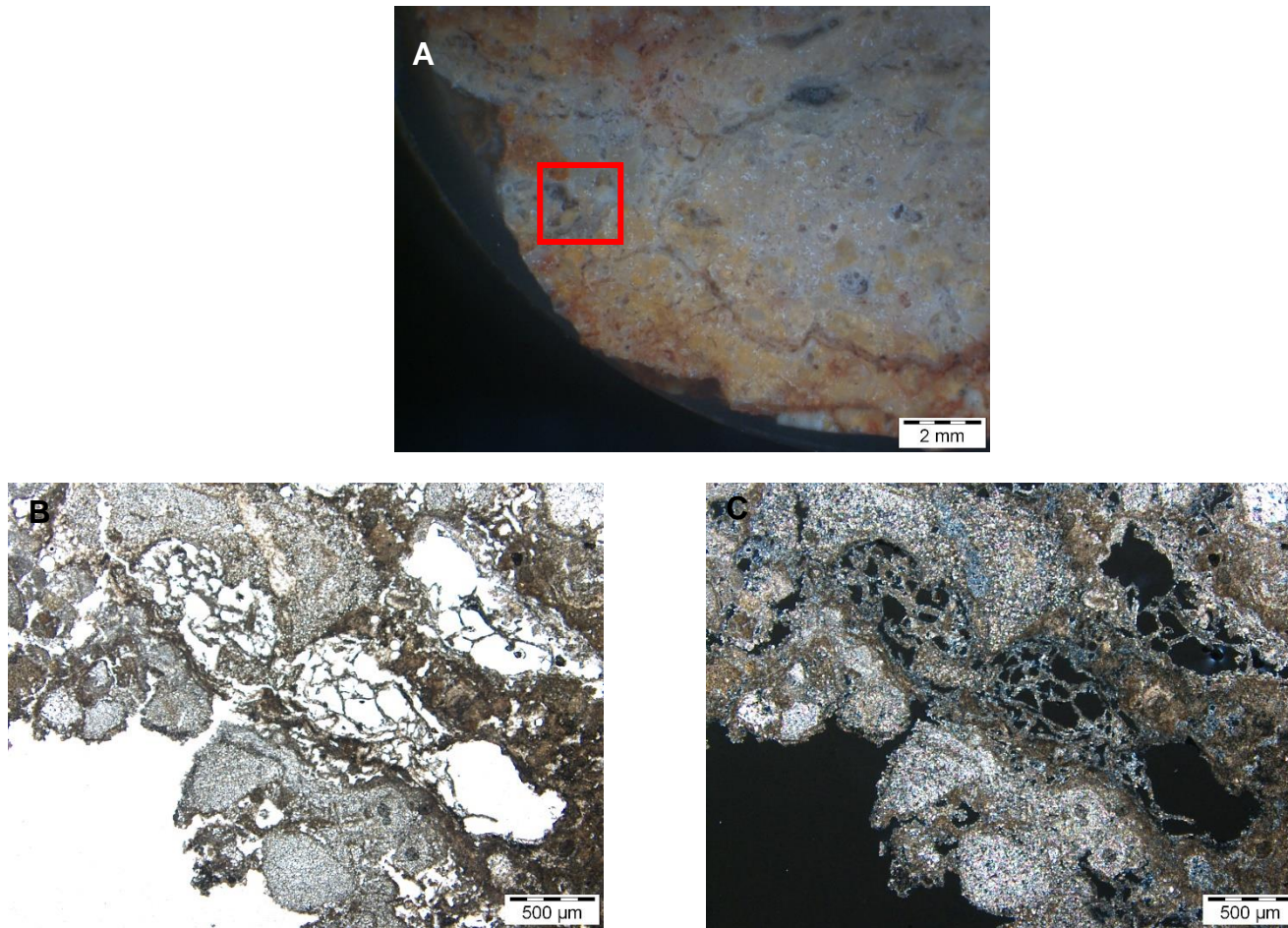


Figura C.24 - Amostra CP2018A: A - Imagem à lupa binocular da amostra de taipa; B e C - Imagens ao microscópio petrográfico da área assinalada a vermelho em A e correspondentes uma zona de pasta rica em cal, com presença de poros preenchidos com estrutura rendilhada; à esquerda imagem obtida com N// e à direita com NX.

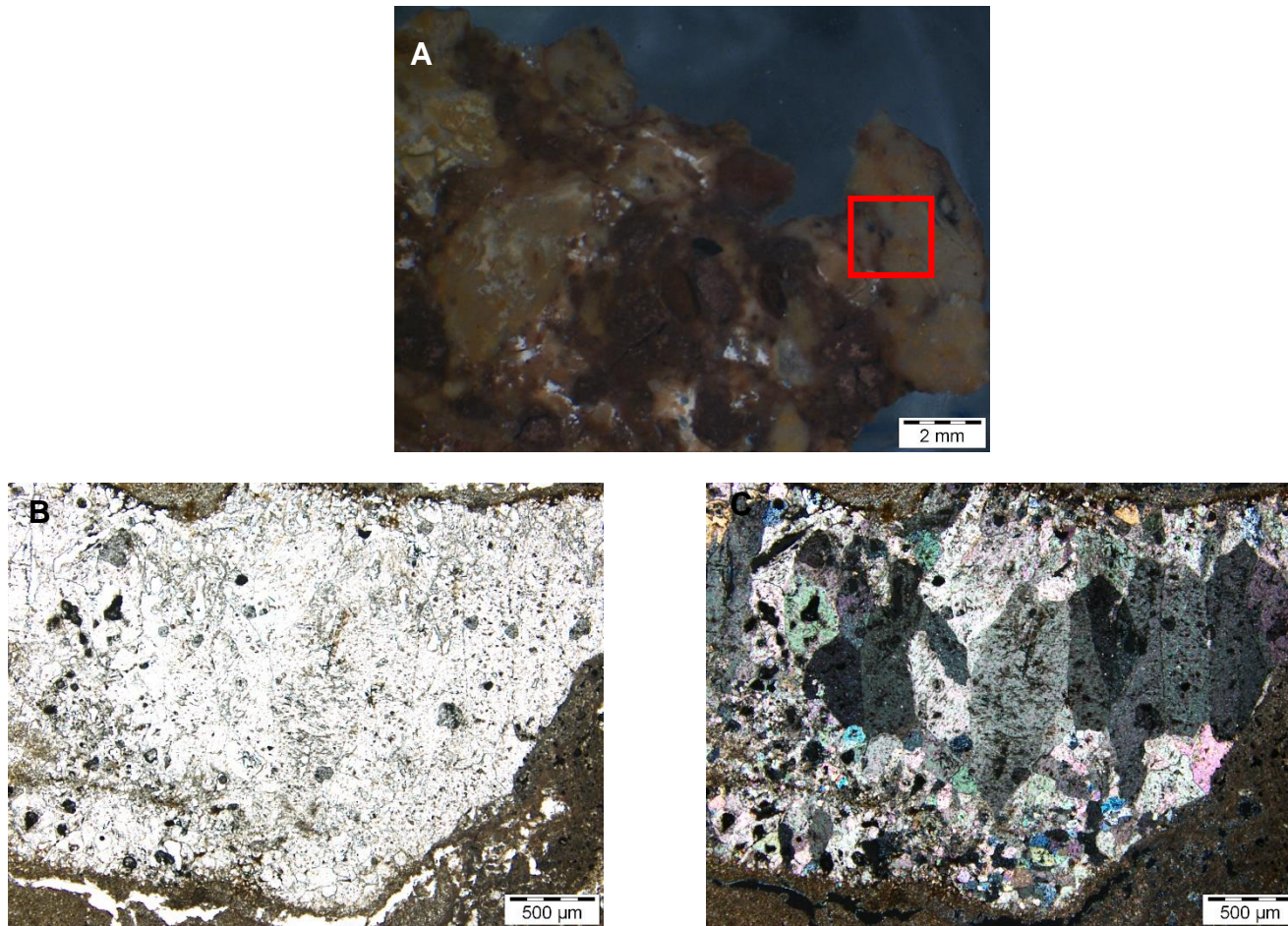


Figura C.25 - Amostra CP2018B: A - Imagem à lupa binocular da amostra de taipa; B e C - Imagens ao microscópio petrográfico da área assinalada a vermelho em A e correspondentes a um agregado calcário; à esquerda imagem obtida com N// e à direita com NX.

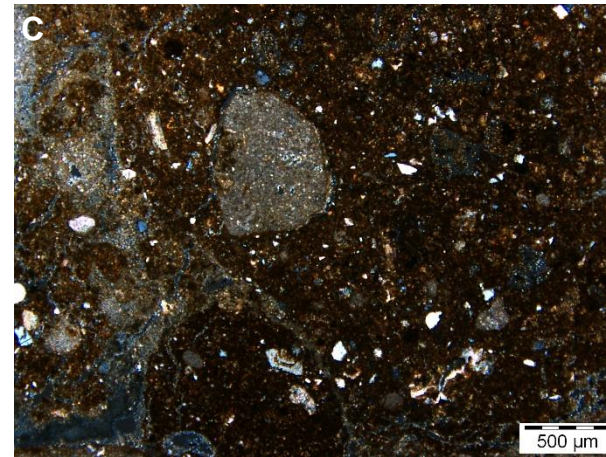
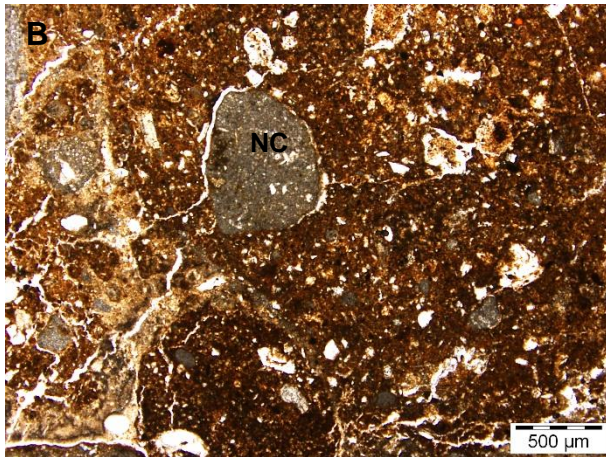
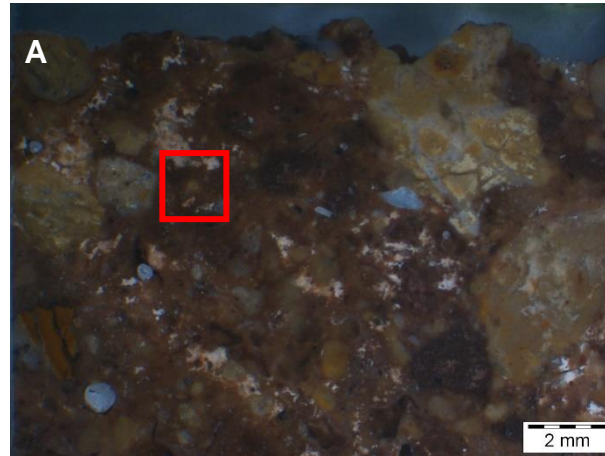


Figura C.26 - Amostra CP2018B: A - Imagem à lupa binocular da amostra de taipa; B e C - Imagens ao microscópio petrográfico da área assinalada a vermelho em A e correspondentes a uma zona bastante rica em terra com pequenos grãos de quartzo e calcário e um nódulo de cal ("NC"); à esquerda imagem obtida com N// e à direita com NX.

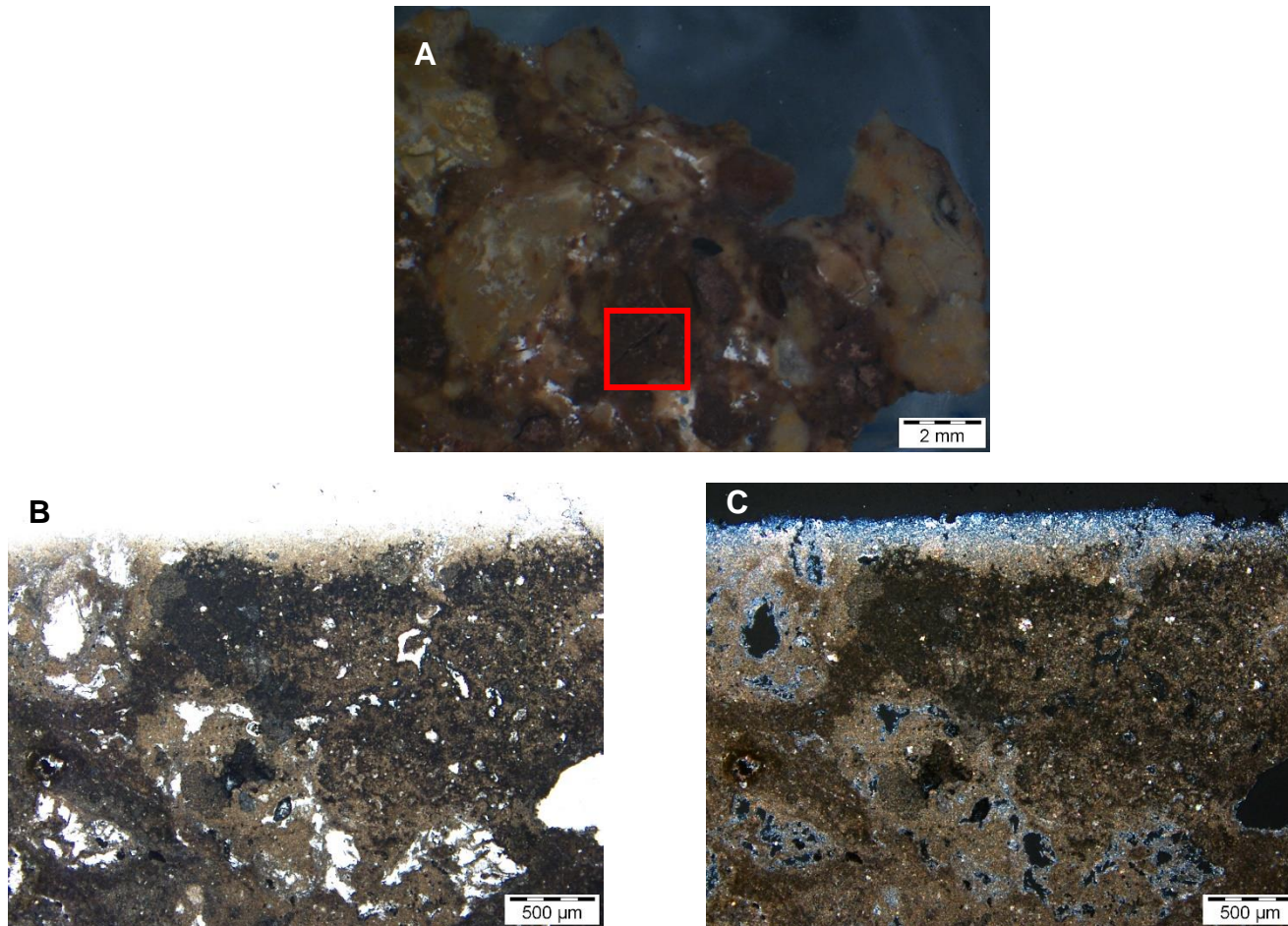


Figura C.27 - Amostra CP2018B: A - Imagem à lupa binocular da amostra de taipa; B e C - Imagens ao microscópio petrográfico da área assinalada a vermelho em A e correspondentes a uma zona de pasta bastante rica em cal com preenchimento dos poros com estrutura rendilhada; à esquerda imagem obtida com N// e à direita com NX.

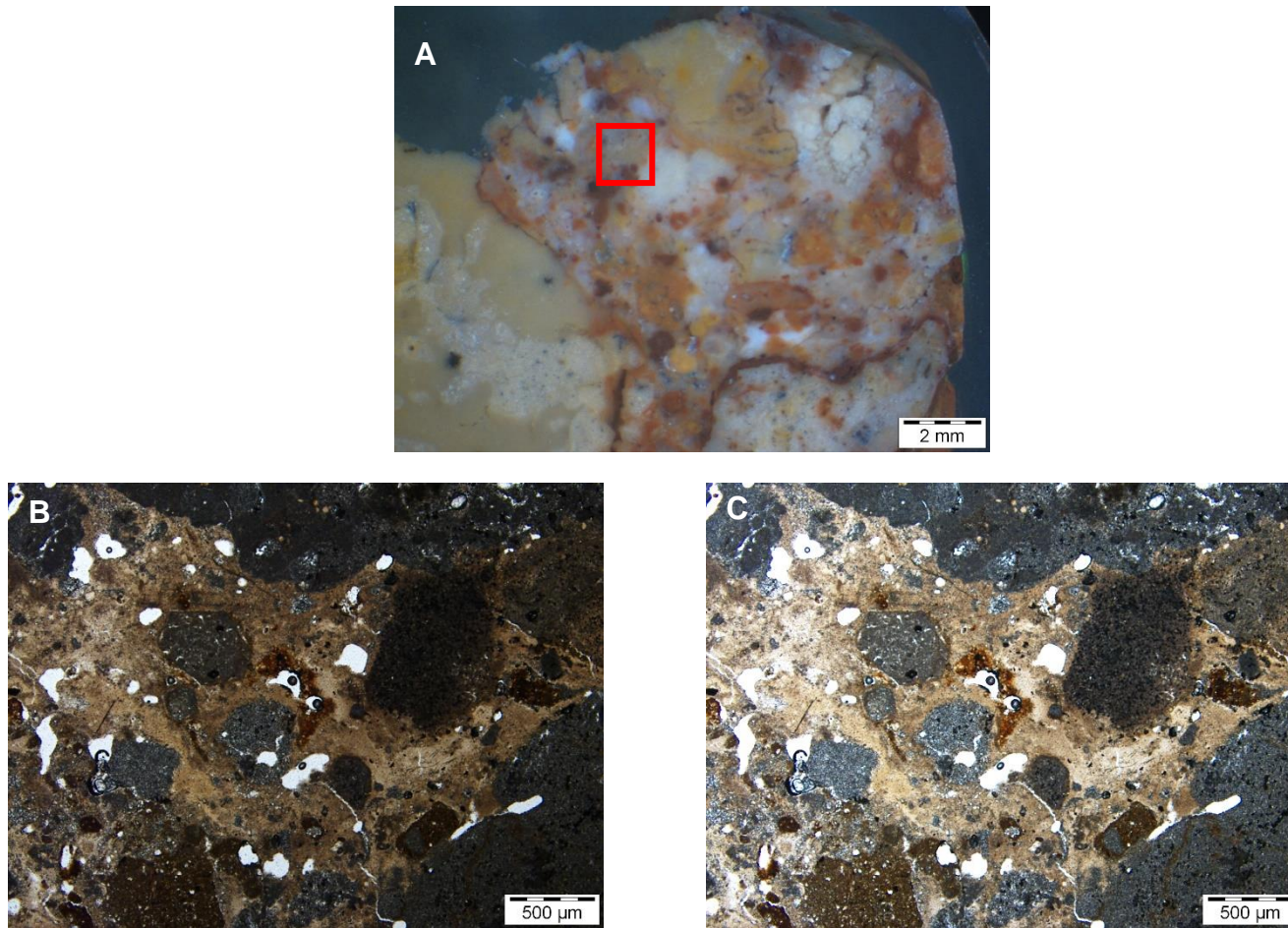


Figura C.28 - Amostra CP2018C: A - Imagem à lupa binocular da amostra de taipa; B e C - Imagens ao microscópio petrográfico da área assinalada a vermelho em A e correspondentes a uma zona de pasta bastante rica em cal; à esquerda imagem obtida com N// e à direita com NX.

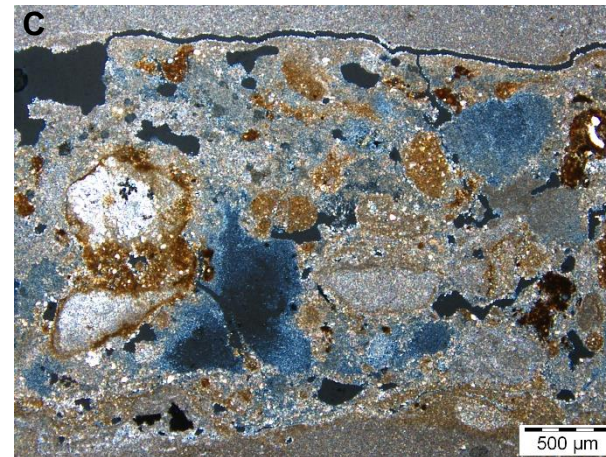
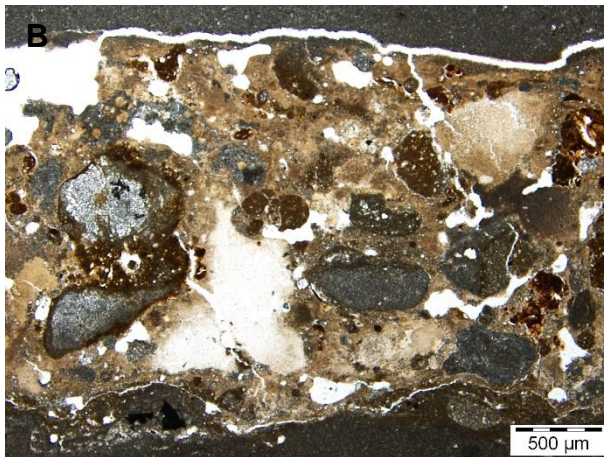
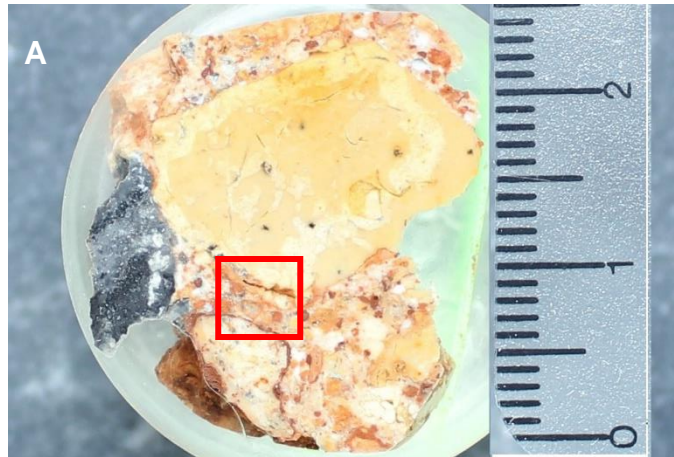


Figura C.29 - Amostra CP2018C: A - Imagem à lupa binocular da amostra de taipa; B e C - Imagens ao microscópio petrográfico da área assinalada a vermelho em A e correspondentes a uma zona de pasta bastante rica em cal e com fissuração devido à retração da terra; à esquerda imagem obtida com N// e à direita com NX.

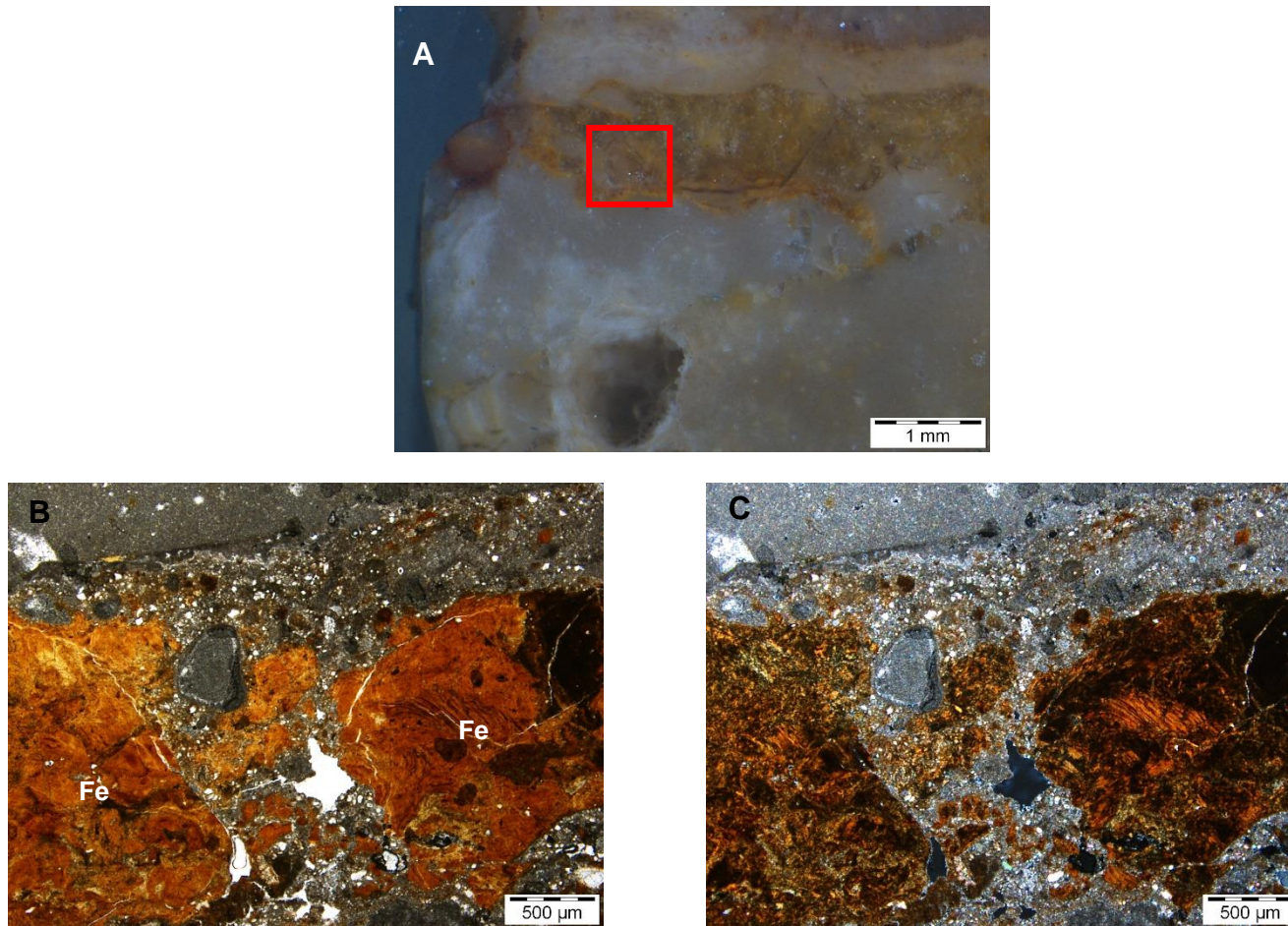


Figura C.30 - Amostra CP2018D: A - Imagem à lupa binocular da amostra de taipa; B e C - Imagens ao microscópio petrográfico da área assinalada a vermelho em A e correspondentes a uma zona de pasta com a presença de óxidos/hidróxidos de ferro ("Fe"); à esquerda imagem obtida com N// e à direita com NX.

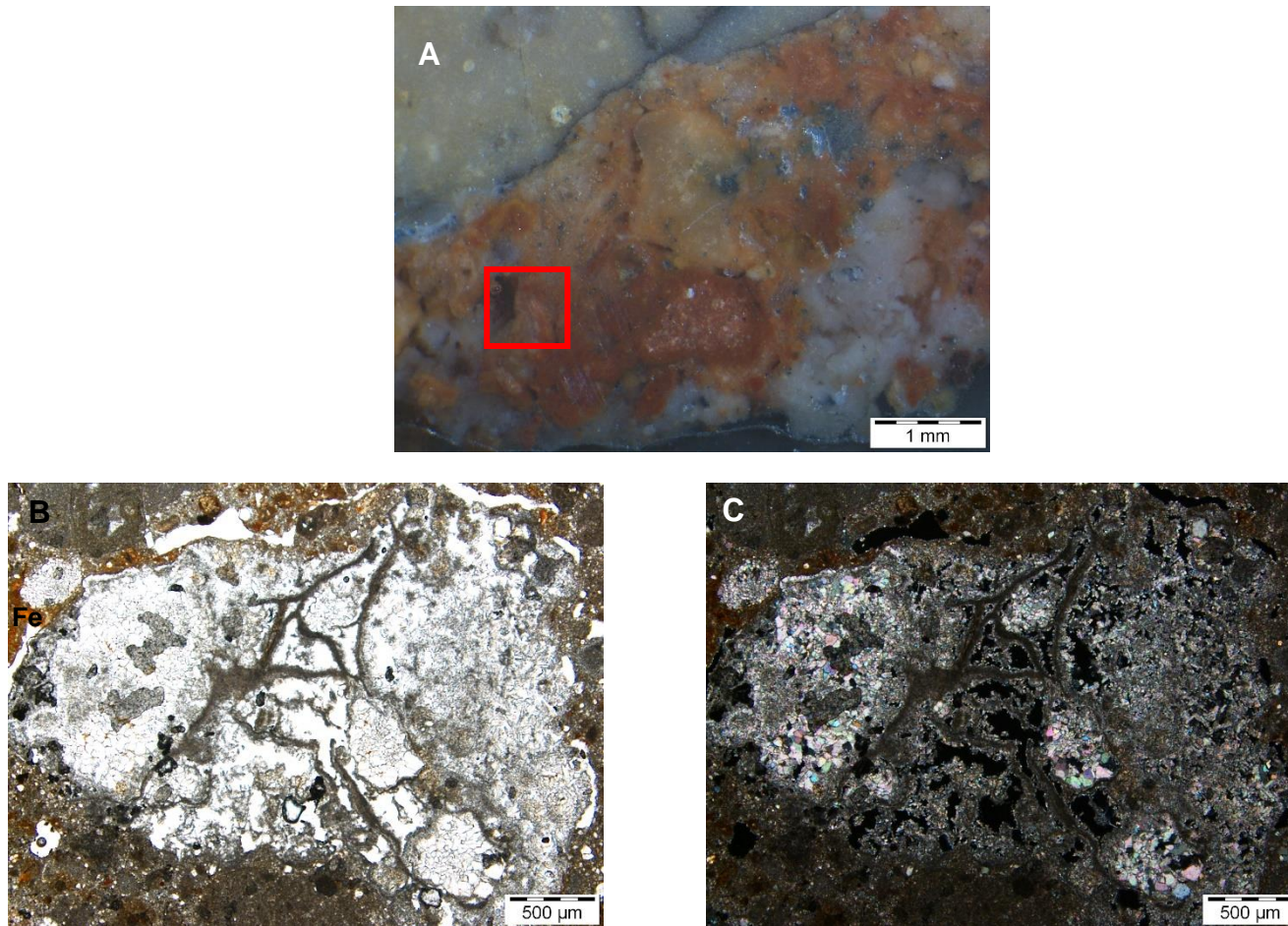


Figura C.31 - Amostra CP2018D: A - Imagem à lupa binocular da amostra de taipa; B e C - Imagens ao microscópio petrográfico da área assinalada a vermelho em A e correspondentes a um poro preenchido com uma estrutura reticulada e com a presença de óxidos/hidróxidos de ferro ("Fe"); à esquerda imagem obtida com N// e à direita com NX.

3 – Observação ao microscópio eletrônico de varrimento com microanálise de raios X

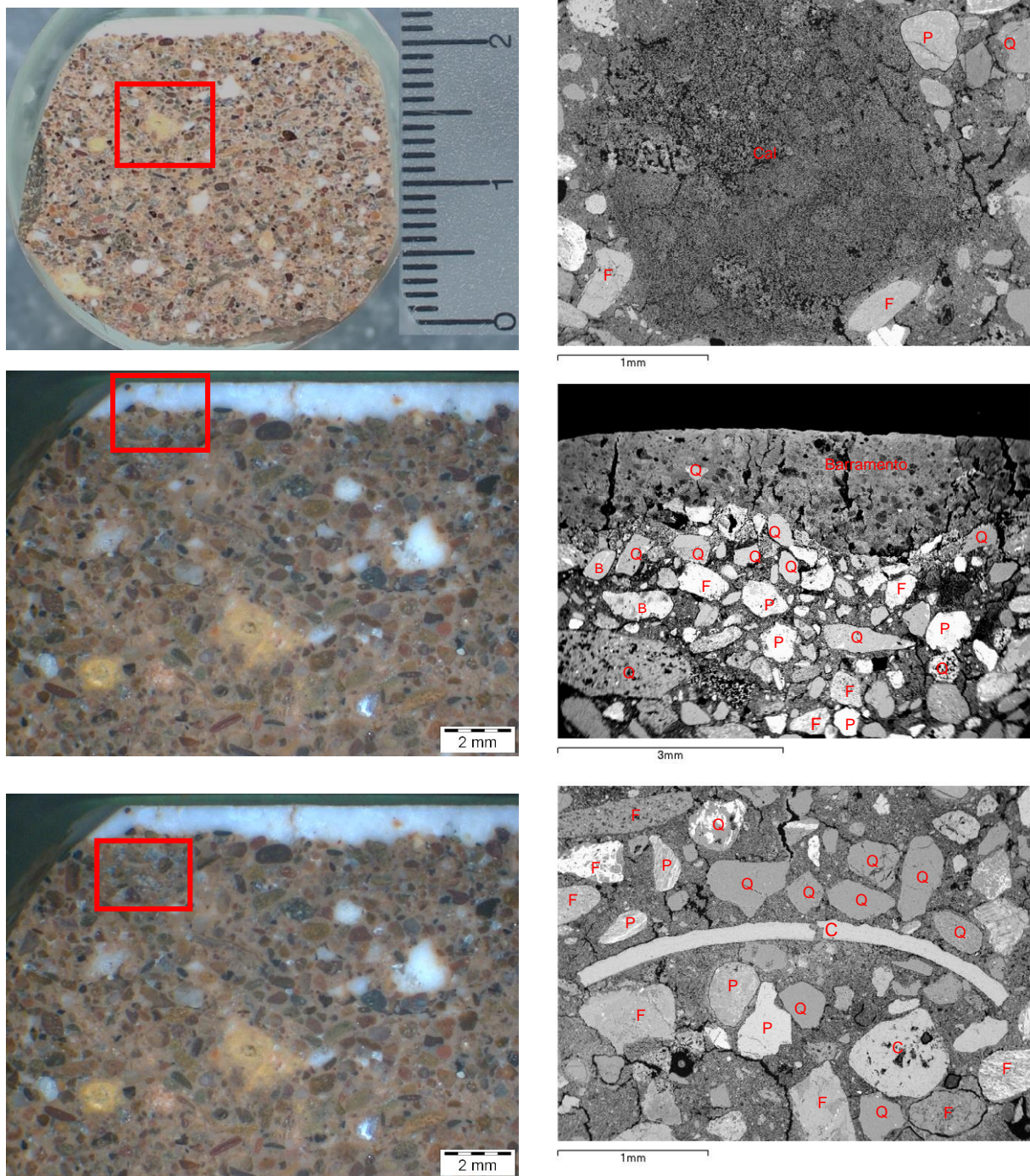


Figura C.32 - Amostra AM1: à esquerda amostras visualizadas à lupa binocular e à direita amostras obtidas ao MEV com a denominação dos agregados obtidos. Nomenclatura: Q- quartzo; C- calcário; F- feldspato; P- piroxena; B- biotite.

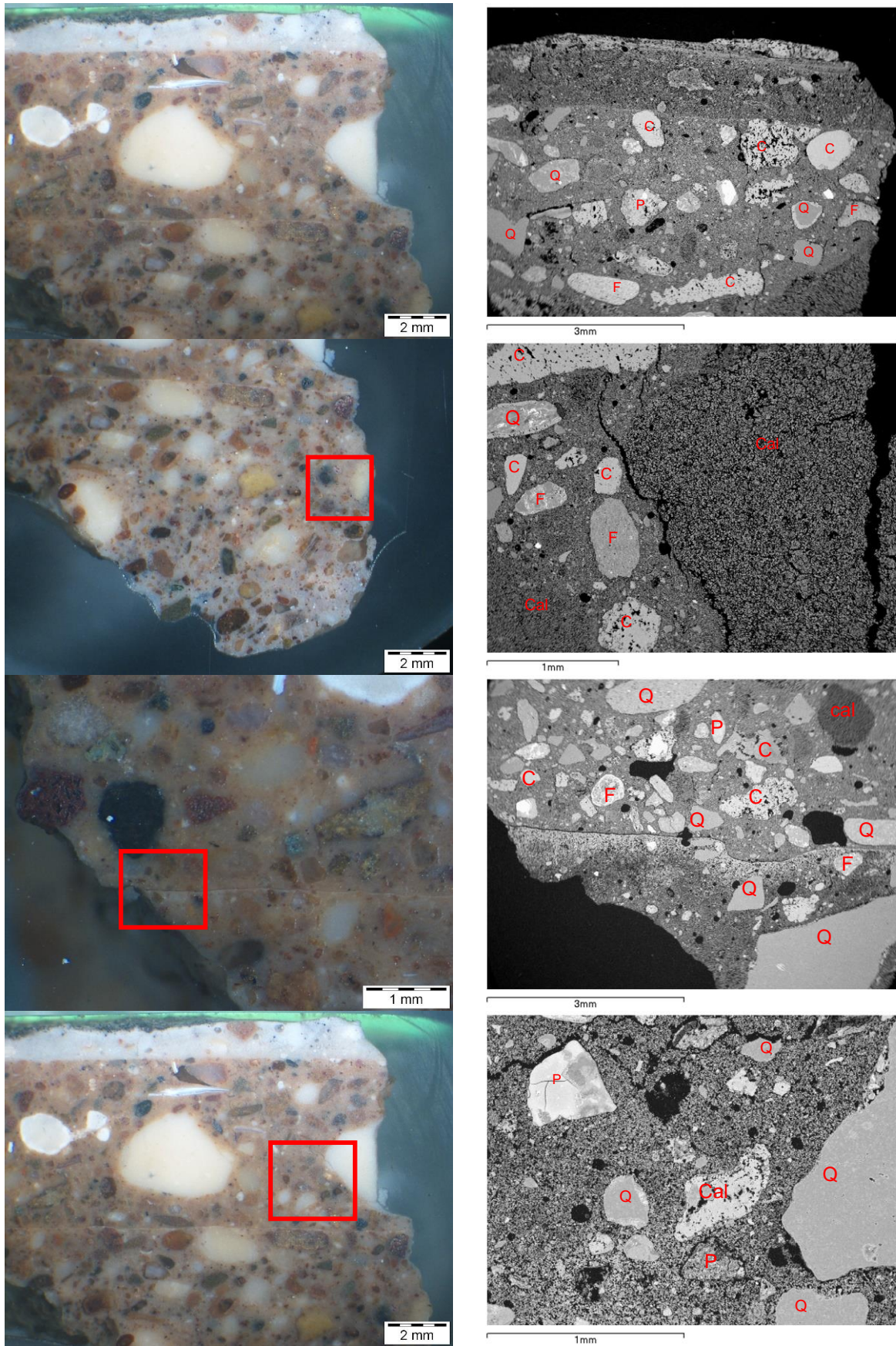


Figura C.33 - Amostra AM2: à esquerda amostras visualizadas à lupa binocular e à direita amostras obtidas ao MEV com a denominação dos agregados obtidos. Nomenclatura: Q- quartzo; C- calcário; F- feldspato; P- piroxena.

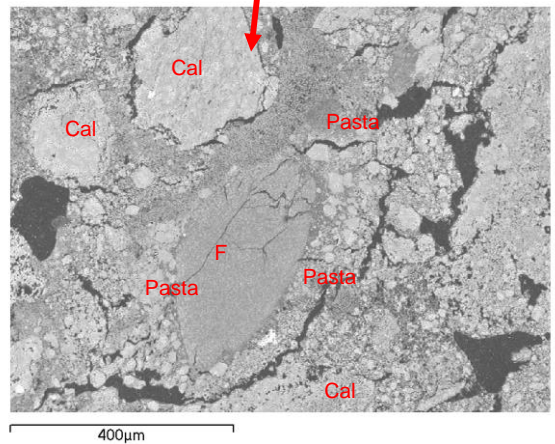
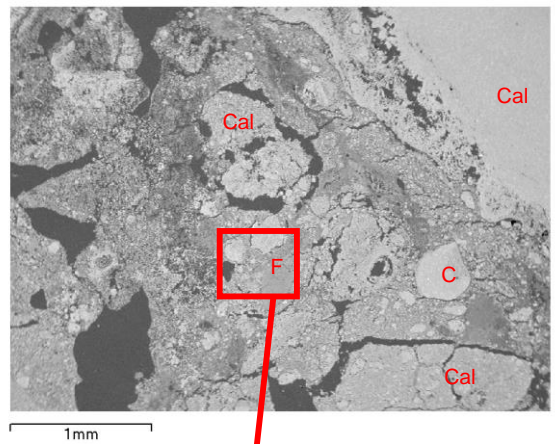
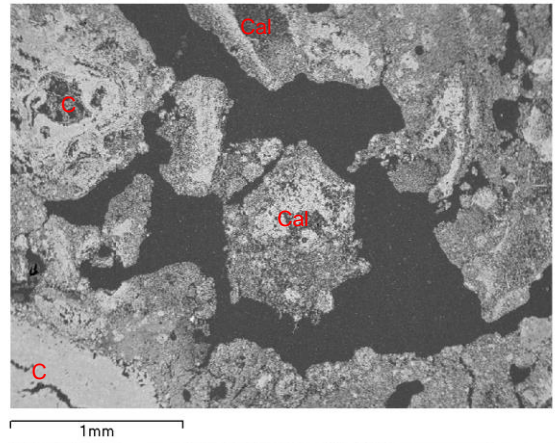
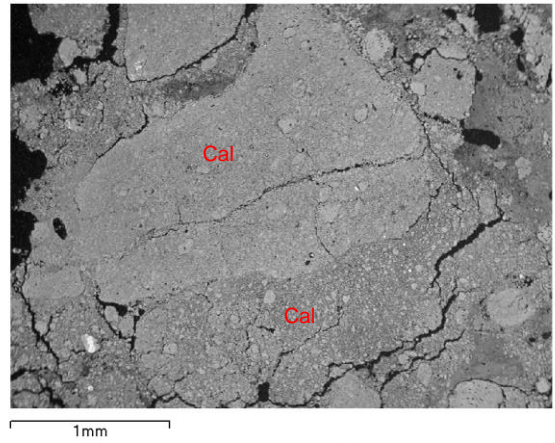


Figura C.34 - Amostra AM10: à esquerda amostras visualizadas à lupa binocular e à direita amostras obtidas ao MEV com a denominação dos agregados obtidos. Nomenclatura: C- calcário; F – feldspato.

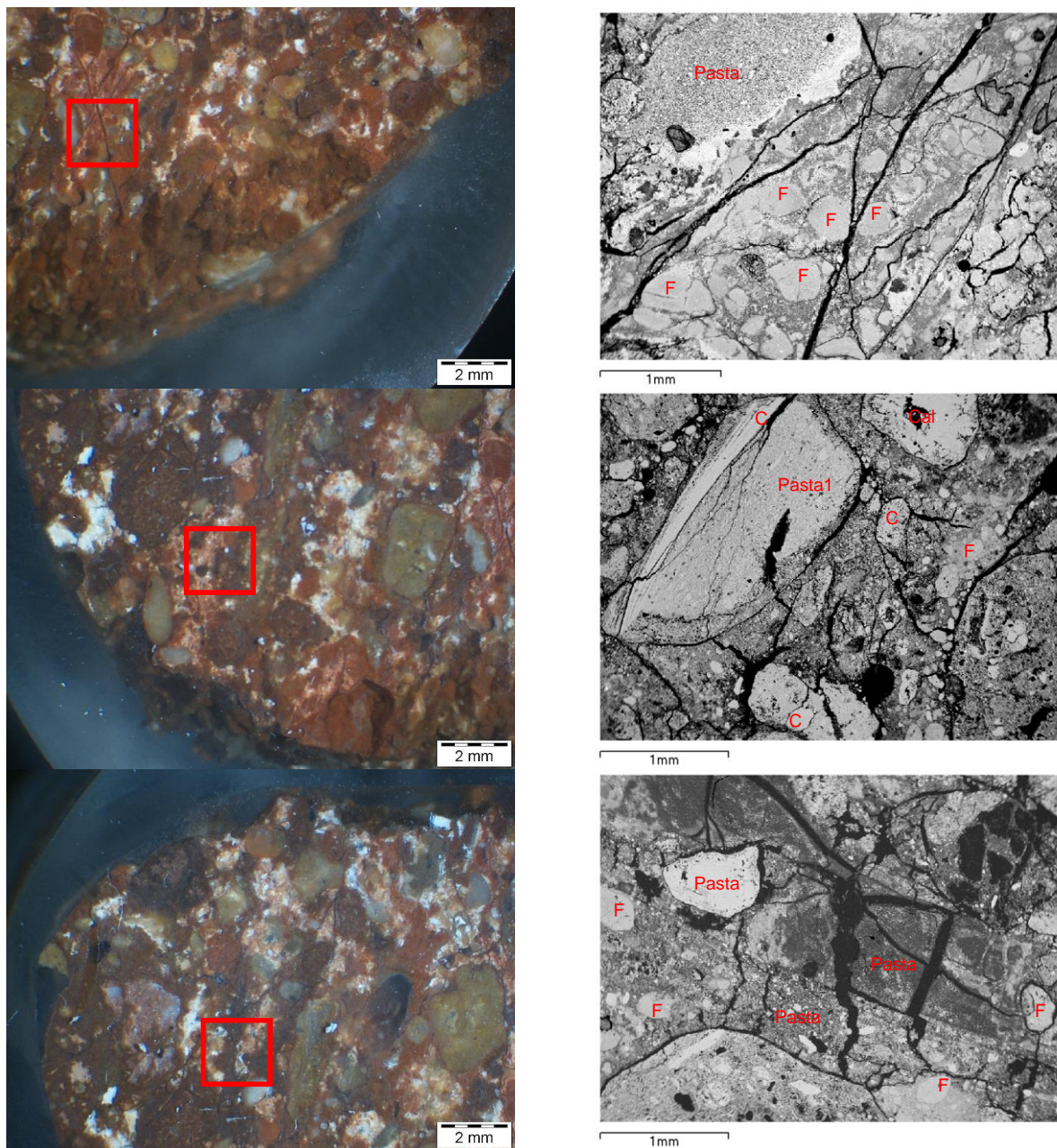


Figura C.35 - Amostra AM11: à esquerda amostras visualizadas à lupa binocular e à direita amostras obtidas ao MEV com a denominação dos agregados obtidos. Nomenclatura C- calcário; F- feldspato.

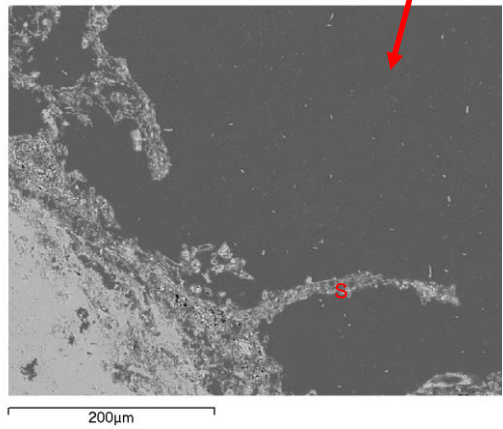
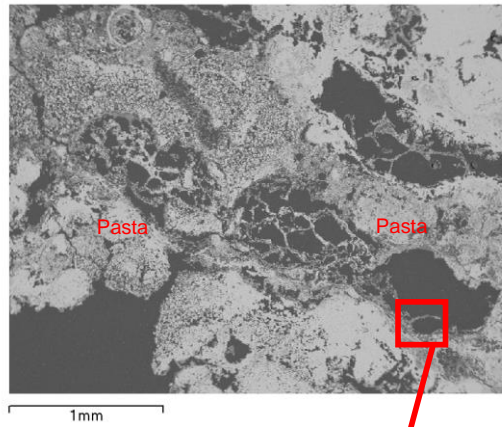
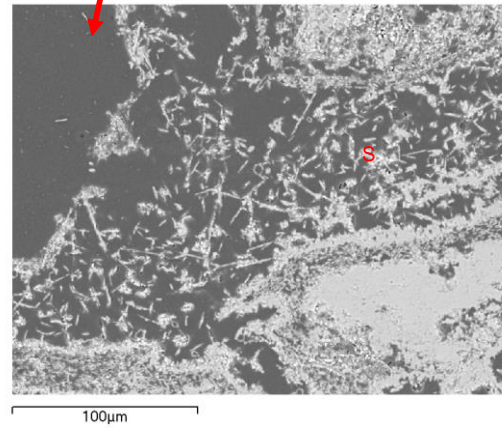
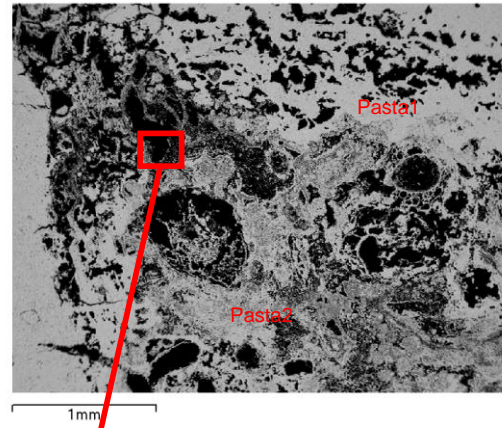
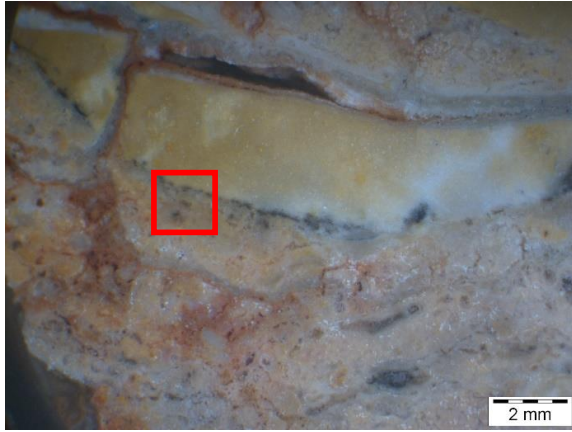


Figura C.36 - Amostra CP2018A: à esquerda amostras visualizadas à lupa binocular e à direita amostras obtidas ao MEV com a denominação dos agregados obtidos por microanálise de raios X. Nomenclatura: S – silicato de cálcio.

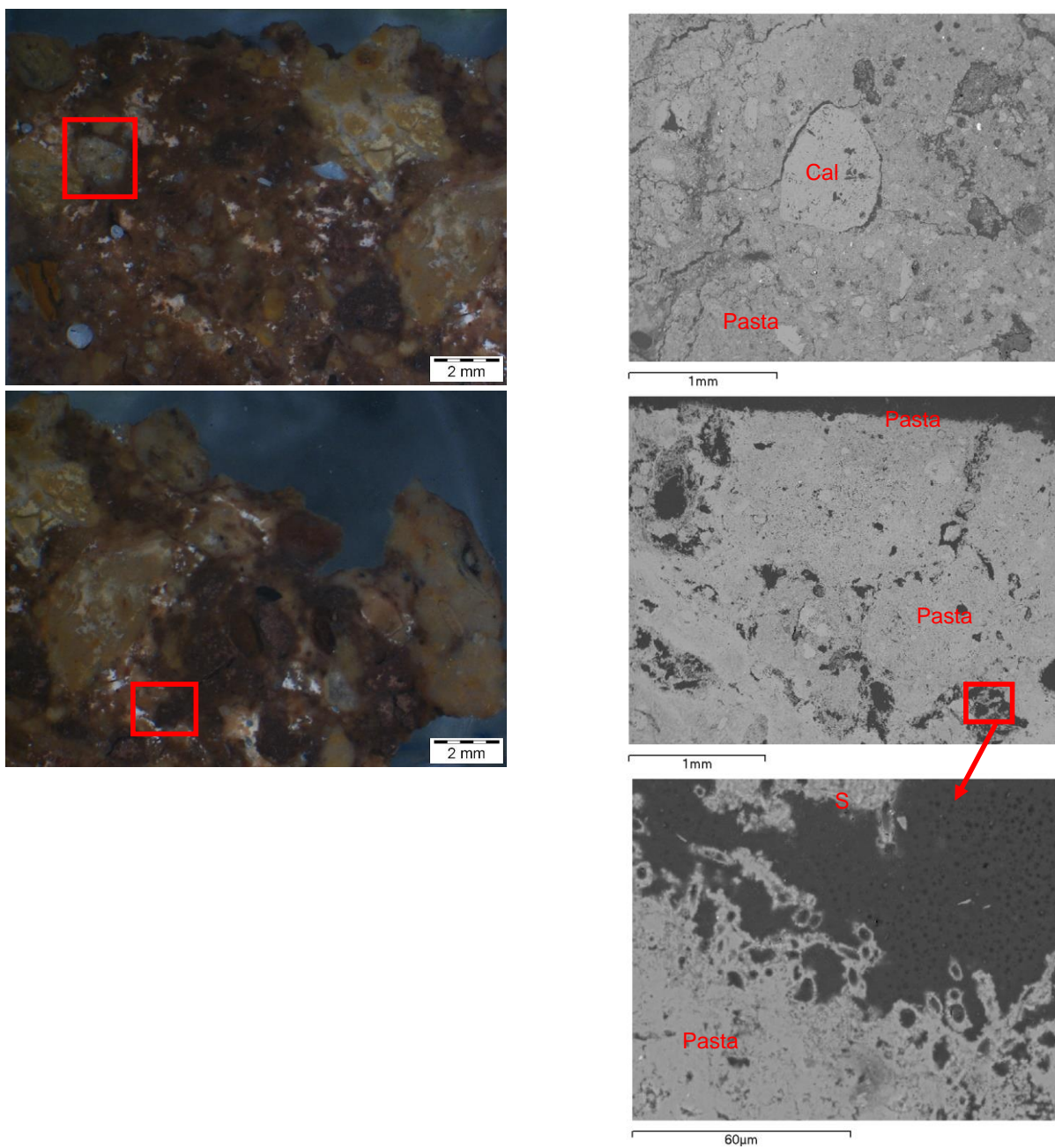


Figura C.37 - Amostra CP2018B: à esquerda amostras visualizadas à lupa binocular e à direita amostras obtidas ao MEV com a denominação dos agregados obtidos por microanálise de raios X. Nomenclatura: S – silicato de cálcio.

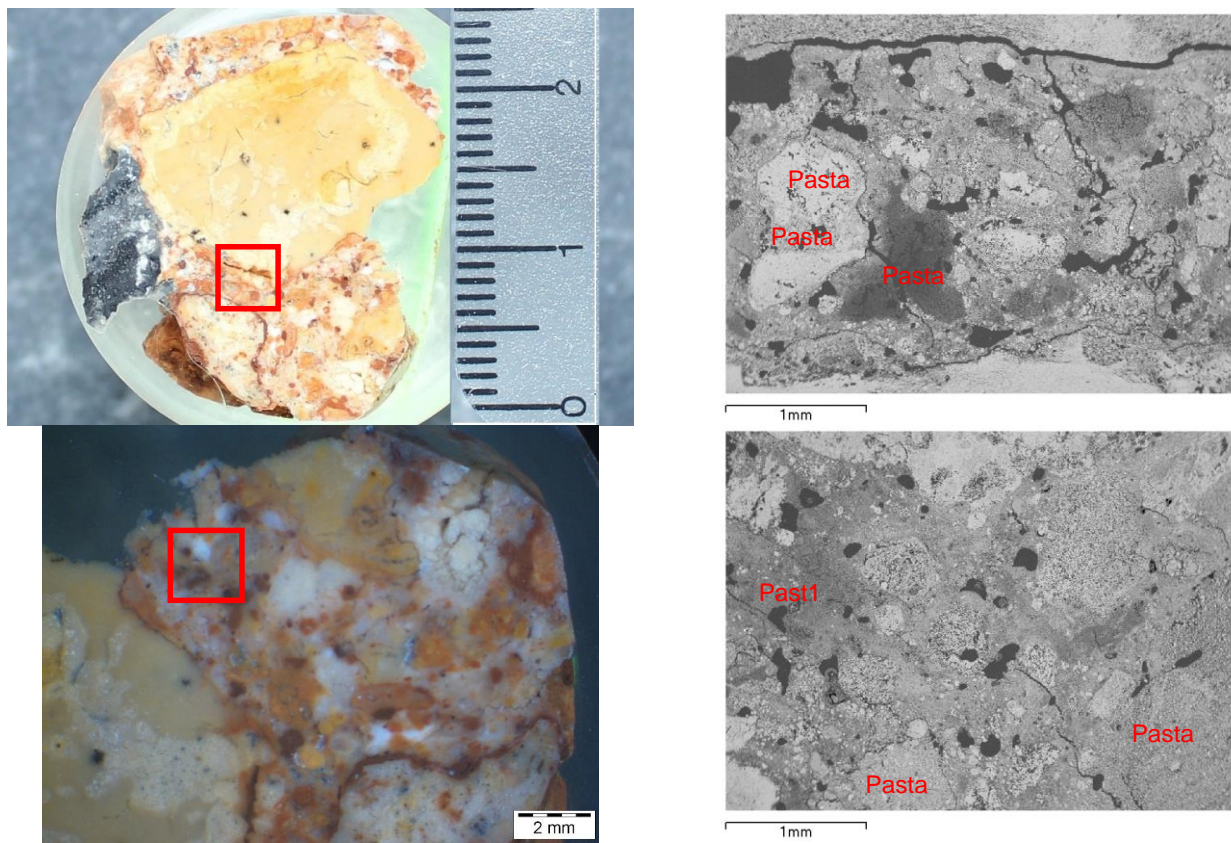


Figura C.38 - Amostra CP2018C: à esquerda amostras visualizadas à lupa binocular e à direita amostras obtidas ao MEV.

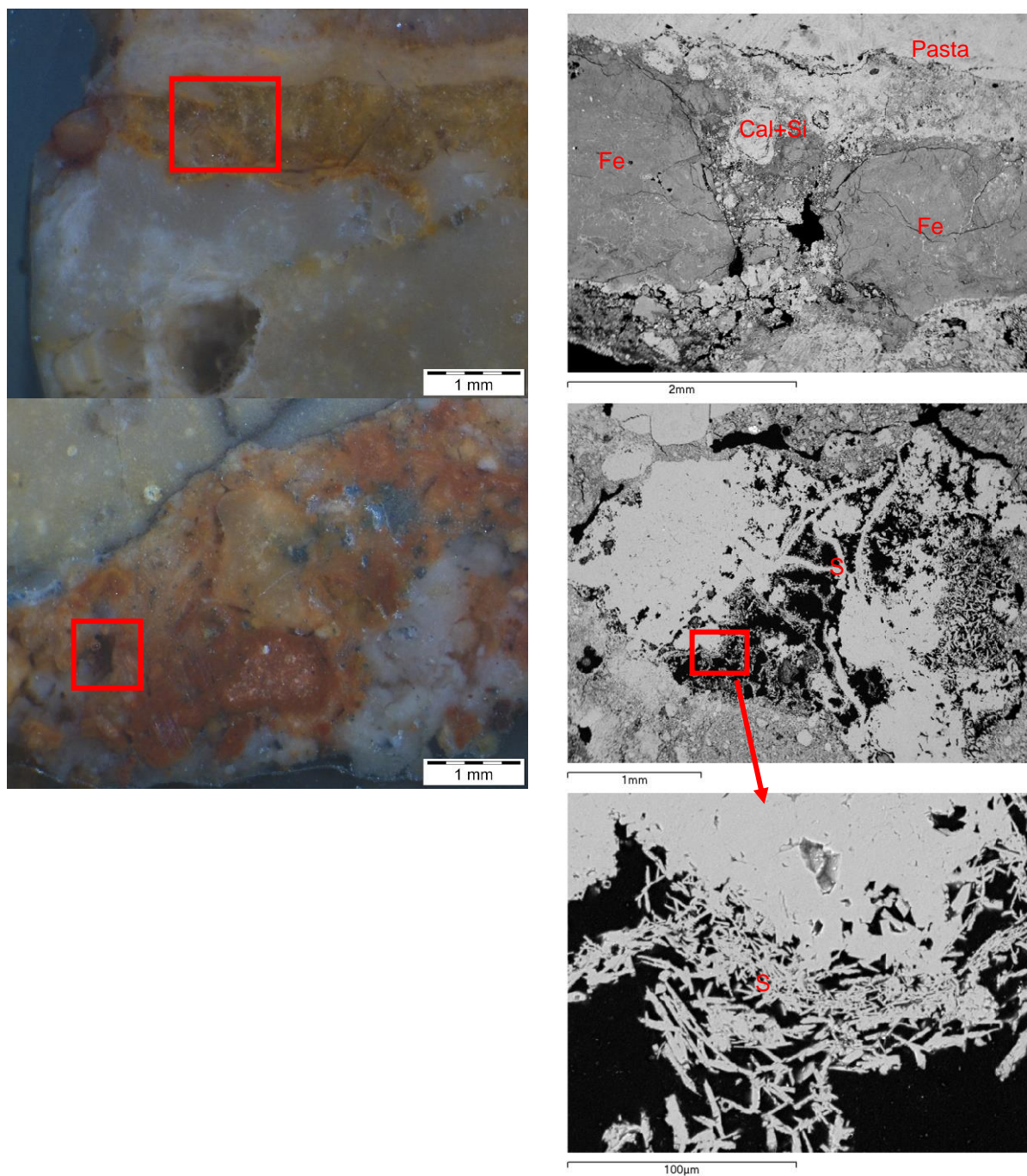


Figura C.39 - Amostra CP2018D: à esquerda amostras visualizadas à lupa binocular e à direita amostras obtidas ao MEV com a denominação dos agregados obtidos por microanálise de raios X. Nomenclatura: Fe – óxido/ hidróxido de ferro; S – silicato de cálcio.

4- Determinação do resíduo insolúvel

Amostra	Massa amostra (g)	Cadinho	C_{vazio} (g)	C_{resíduo} (g)	m RI (g)	% RI	média	desv. Pad
CP2018A	1,0155	3p	15,7553	15,8466	0,0913	8,99	9,01	0,025
	1,0314	6p	16,4687	16,5618	0,0931	9,03		
CP2018B	1,0218	15p	15,5247	15,6761	0,1514	14,82	15,02	0,291
	1,0218	4p	15,6173	15,7729	0,1556	15,23		
CP2018C	1,0130	10p	16,4004	16,5157	0,1153	11,38	11,39	0,011
	1,0072	19p	17,4346	17,5494	0,1148	11,40		
CP2018D	1,0484	F19	21,2394	21,3788	0,1394	13,30	13,51	0,297
	1,0826	6	21,2217	21,3702	0,1485	13,72		

5 - Análise granulométrica do agregado

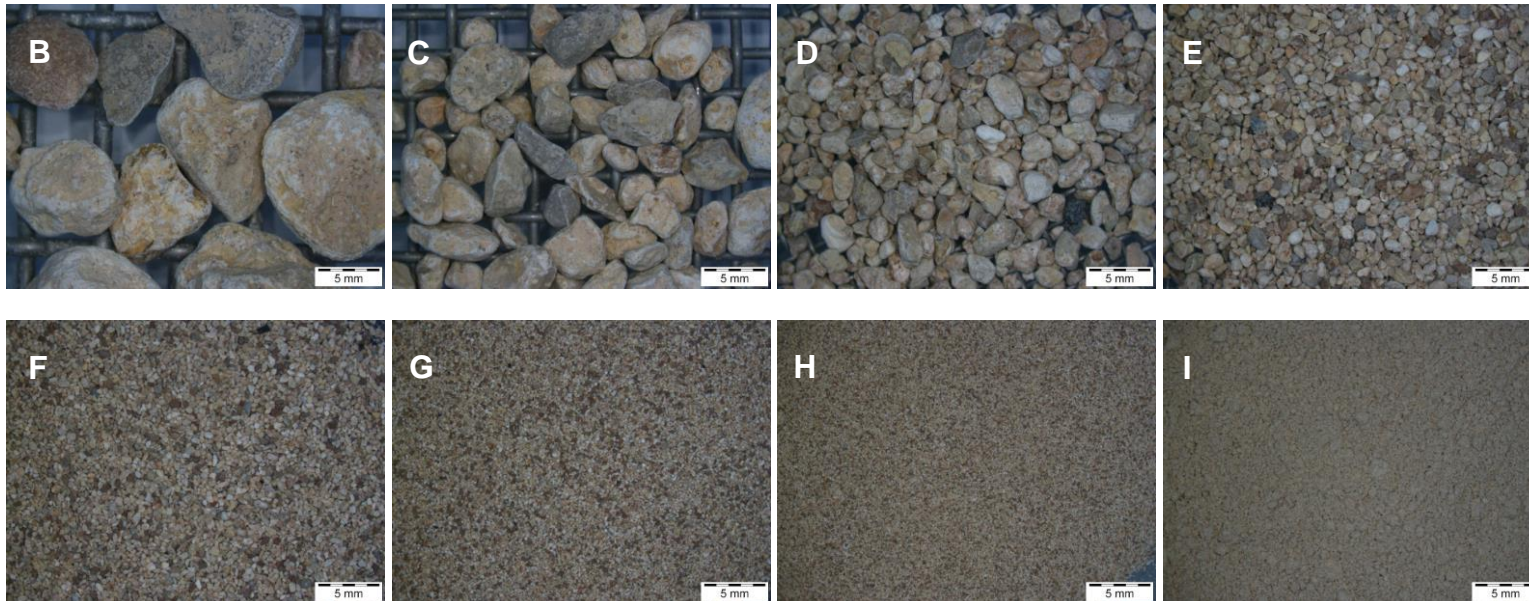
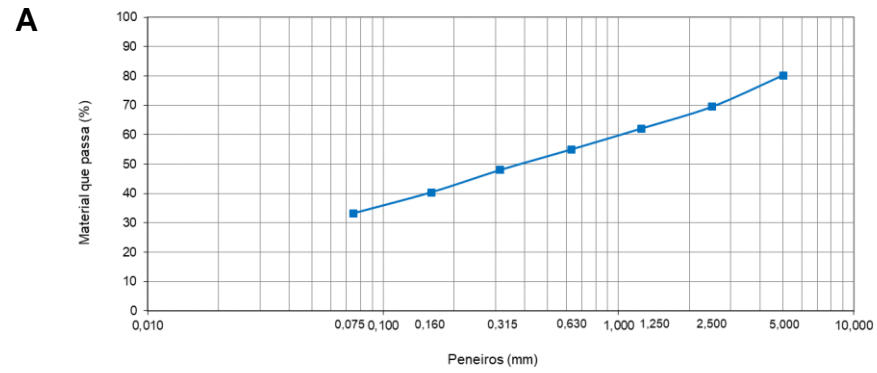


Figura C.40 – Amostra CP2018A: A – curva granulométrica; B – fração 4,75 mm; C – fração 2,36 mm; D – fração 1,18 mm; E – fração 600 μm ; F – fração 300 μm ; G – fração 150 μm ; H – fração 75 μm ; I – fração < 75 μm

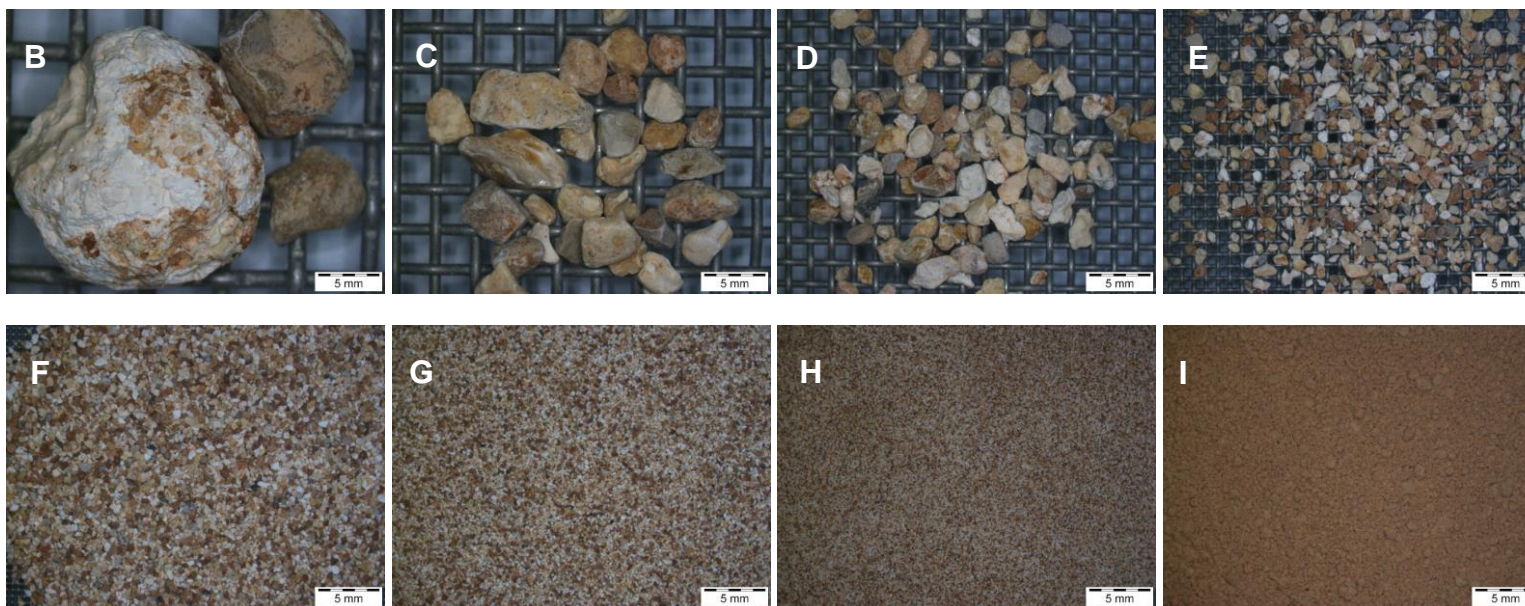
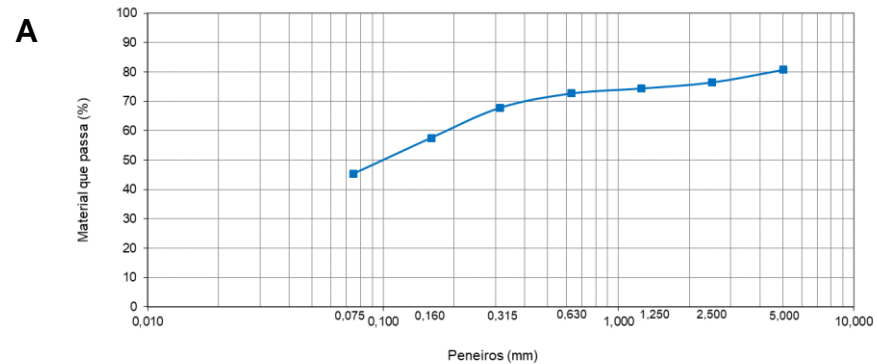


Figura C.41 – Amostra CP2018B: A – curva granulométrica; B – fração 4,75 mm; C – fração 2,36 mm; D – fração 1,18 mm; E – fração 600 μm ; F – fração 300 μm ; G – fração 150 μm ; H – fração 75 μm ; I – fração < 75 μm

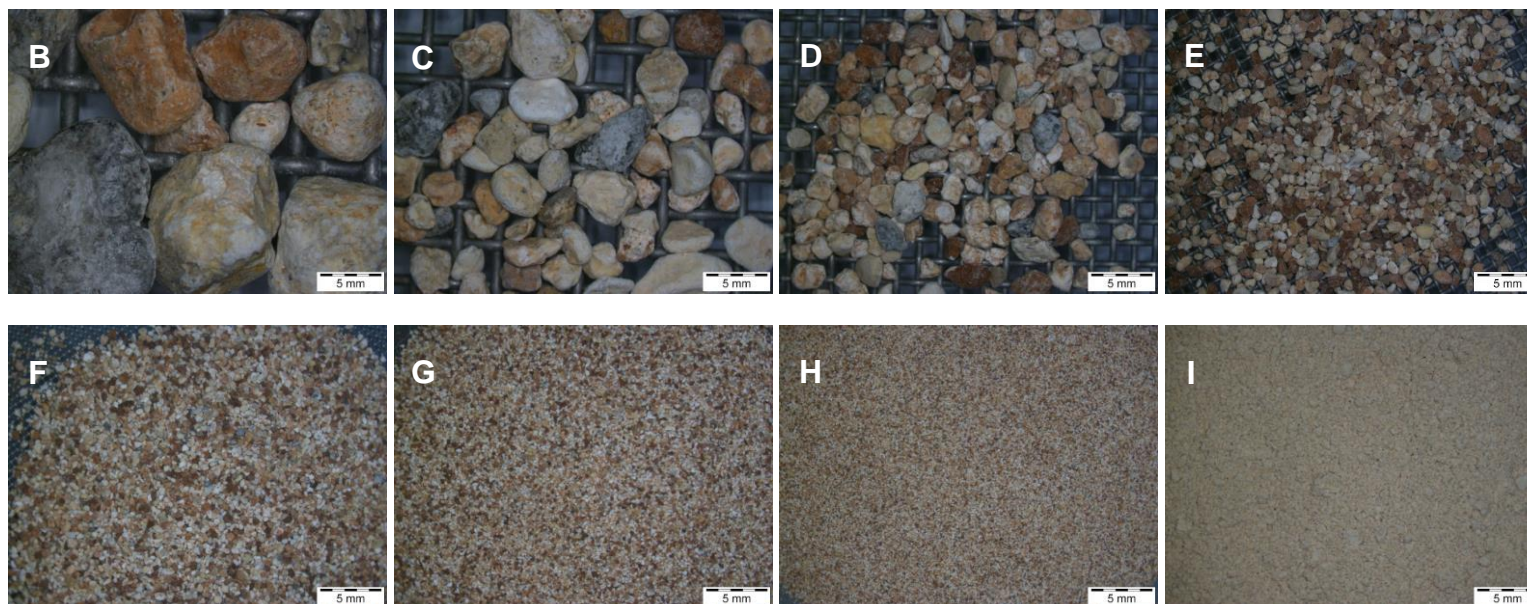
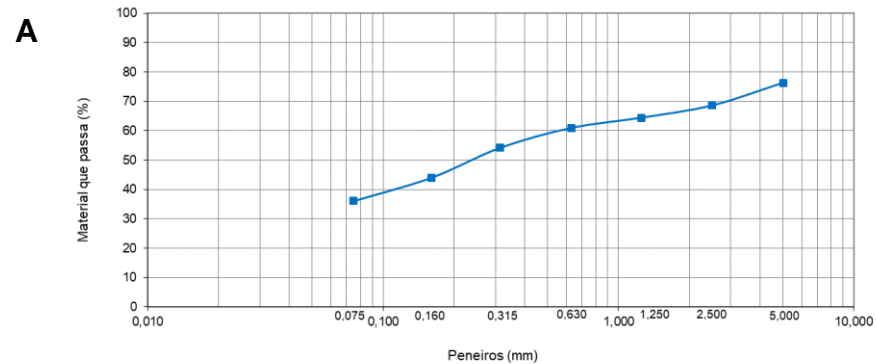


Figura C.42 – Amostra CP2018C: A – curva granulométrica; B – fração 4,75 mm; C – fração 2,36 mm; D – fração 1,18 mm; E – fração 600 μm ; F – fração 300 μm ; G – fração 150 μm ; H – fração 75 μm ; I – r fração < 75 μm

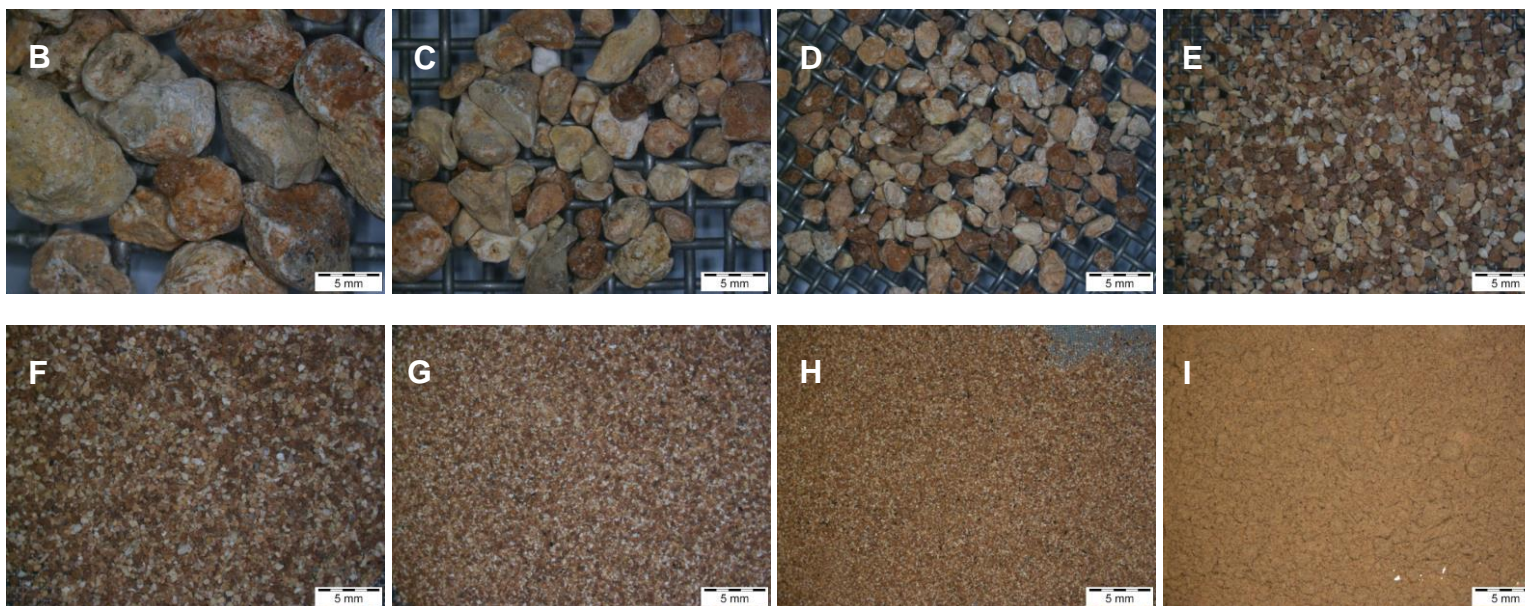
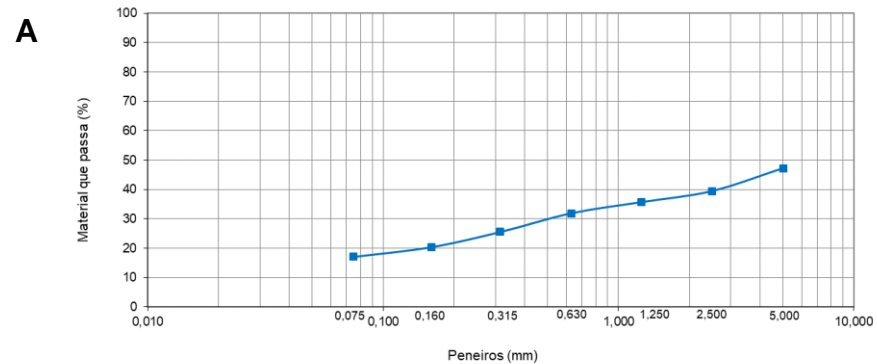


Figura C.43 – Amostra CP2018D: A – curva granulométrica; B – fração 4,75 mm; C – fração 2,36 mm; D – fração 1,18 mm; E – fração 600 μm ; F – fração 300 μm ; G – fração 150 μm ; H – fração 75 μm ; I – fração < 75 μm

Anexo D – Resultados da caracterização física e mecânica

1- Massa volúmica aparente

	Massa (kg)	Volume (m ³)	Baridade (kg/m ³)
Baridade Areia	1,0443	0,000749	1394,26
	1,037	0,000749	1384,51
	1,0317	0,000749	1377,44
			1385,40

Amostra	Massa areia (kg)	Volume areia (m ³)	Massa com amostra (kg)	Massa amostra (kg)	Massa de areia sem amostra(kg)	Massa deslocada (kg)	Volume deslocado	Massa Volúmica
AM4	4,8143	0,003475	4,6484	0,1647	4,4837	0,3306	0,003236387	1436,292835
AM6	4,8143	0,003475	4,6008	0,266	4,3348	0,4795	0,00312891	1470,416401
AM10	4,8143	0,003475	4,7365	0,4901	4,2464	0,5679	0,003065101	1545,299588
AM11	4,8143	0,003475	4,9075	1,1415	3,766	1,0483	0,002718343	1805,327679
CP2018B	4,8143	0,003475	4,7991	1,4046	3,3945	1,4198	0,00245019	1958,664422
CP2018C	4,8143	0,003475	4,7461	1,0051	3,741	1,0733	0,002700298	1757,620966
CP2018D	4,8143	0,003475	4,6664	1,2714	3,395	1,4193	0,002450551	1904,224871

4 – Abrasão a seco

Amostra	massa [kg]			perda de massa [%]
	mi	mf	perda de massa	
AM10	0,4896	0,4738	0,0158	2%
AM11	1,1419	1,1183	0,0236	2%
CP2018B	1,285	1,2813	0,0037	0%
CP2018C	0,9527	0,9458	0,0069	1%
CP2018D	1,2378	1,2322	0,0056	1%

5 – Erosão por gotejamento – *Geelong test*

Amostra	massa [kg]			dimensão mancha [mm]	Observações
	mi	m c/H2O	mf		
AM4	0,1641	0,1765	0,1652	47,09x51,95	NÃO PERDEU MASSA
AM6	0,2268	0,2388	0,227	45,86x59,21	NÃO PERDEU MASSA
AM10	0,4901	0,4998	0,4914	44,83x66,80	NÃO PERDEU MASSA
AM11	1,1394	1,1466	1,1437	34,26x66,65	NÃO PERDEU MASSA
CP2018B	1,401	1,4097	1,3449	74,88x30,21	PERDEU MASSA
CP2018C	0,99	0,9962	0,9666	47,24x36,01	PERDEU MASSA
CP2018D	1,367	1,371	1,359	69,58x27,13	PERDEU MASSA

6 – Absorção de água por capilaridade

	CP2018C		CP2018D				AM11			AM10	CP2018B		
m [g]	69,391	444,602	34,857	51,259	55,268	421,823	107,035	47,14	231,611	308,756	184,707	174,375	141,931
área [mm²]	0,0018	0,00779	0,00116	0,00177	0,00199	0,0051	0,00216	0,0019	0,005	0,0034	0,00375	0,0031	0,002975
√t [min]	a	b	a	b	c	d	a	b	c	a	a	b	c
0,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1,0	2,971111	2,592041	3,942241	4,410734	4,597487	4,312745	1,798611	3,027368	3,1008	4,501471	3,726133	5,944194	4,83395
1,4	4,991667	3,904236	4,035345	4,413559	4,790955	5,100784	2,06713	3,104737	3,1184	5,545588	4,818133	6,112258	5,839664
1,7	5,747778	4,579974	4,622414	4,612429	4,907035	5,400588	2,131481	3,115263	3,6734	6,518824	5,988267	6,199355	6,136471
2,0	6,477778	5,058537	5,274138	4,70226	5,022613	6,158824	2,189815	3,145263	3,6742	7,838529	6,609067	6,575161	6,459832
2,2	7,429444	5,772144	5,183621	4,724859	5,060302	6,651176	2,274074	3,214737	3,7926	8,507353	6,578667	6,944516	6,482353
3,2	7,773889	6,100385	4,101724	4,731073	5,132161	6,918627	2,33287	3,233158	3,8134	9,088529	6,897067	7,251935	6,801345
3,9	7,821667	6,482028	4,098276	4,884746	5,234673	7,47451	2,351852	3,374211	3,8272	9,666176	6,279733	8,643226	6,94521
4,5	7,985556	7,521438	3,960345	4,889266	5,237688	8,147843	2,403704	3,397368	3,9954	10,24118	7,250667	8,901613	7,26521
5,5	8,101667	9,979589	4,234483	4,933333	5,338693	11,23275	2,635185	3,514737	4,115	11,68559	7,6552	9,045484	7,613445
7,7	8	11,99641	4,69569	5,048023	5,490452	12,48765	3,331481	3,561053	4,5782	18,00941	9,425867	12,25645	8,104874
11,0	8,060556	12,02041	4,785345	5,454237	5,739196	12,66549	3,506944	3,65	4,7322	18,33324	10,40107	13,55839	8,734118
13,4	8,188333	12,11874	5,012931	5,459887	5,770854	12,7	3,512037	3,657895	4,7386	18,51853	10,788	13,98419	9,226891
19,0	8,264444	12,33877	5,325	5,49096	5,815578	12,79961	3,565278	3,719474	4,7542	18,60794	10,92533	14,01452	9,435966
37,9	8,522778	12,4344	5,481034	5,520339	5,938693	12,95784	3,603241	3,768421	4,7616	18,73382	10,78693	14,05742	9,515966
53,7	8,693333	12,86804	5,686207	5,557062	6,119598	13,20078	3,862037	3,928421	5,0566	18,75029	11,19227	14,53	9,78521

7 – Secagem

	AM10	AM11			CP2018B			CP2018C		CP2018D			
m [g]	69,391	444,602	34,857	51,259	55,268	421,823	107,035	47,14	231,611	308,756	184,707	174,375	141,931
\sqrt{t} [h]	a	a	b	c	a	b	c	a	b	a	b	c	d
0,0	18,75029	3,86204	3,92842	5,05660	11,19227	14,53000	9,78521	8,693333	12,86804	5,686207	5,557062	6,119598	13,20078
0,4	18,69941	3,82083	3,83842	5,03000	11,14773	14,46419	9,74319	8,688333	12,85327	5,74569	5,40113	6,054271	13,16569
0,6	18,66971	3,80972	3,80526	5,01240	11,12827	14,43548	9,72202	8,684444	12,83928	5,716379	5,39322	6,038693	13,14667
0,7	18,60824	3,78287	3,79211	4,98600	11,08773	14,37516	9,67462	8,652778	12,81874	5,67069	5,368362	6,009548	13,11824
0,8	18,55529	3,77130	3,78421	4,97180	11,05360	14,33323	9,64235	8,637222	12,80526	5,646552	5,353672	6,002513	13,09765
0,9	18,44029	3,75417	3,75368	4,95820	10,98480	14,24839	9,57210	8,617222	12,78575	5,628448	5,342373	5,985427	13,06961
1,0	18,38588	3,73981	3,75158	4,94200	10,94480	14,20581	9,53580	8,596111	12,76932	5,599138	5,335028	5,966834	13,04686
1,4	18,14235	3,61759	3,63526	4,82900	10,78080	14,04065	9,37378	8,386667	12,60128	5,484483	5,230508	5,845226	12,81294
1,7	17,87471	3,47870	3,50789	4,67940	10,57547	13,83935	9,14824	8,155	12,41374	5,32931	5,108475	5,722111	12,56451
2,4	17,32588	3,21944	3,25895	4,42400	10,16987	13,38935	8,66118	7,781667	12,2294	5,080172	4,89887	5,504523	12,14882
4,9	12,95029	1,96991	1,91421	3,05060	7,48933	10,40935	6,08437	5,420556	10,12683	3,59569	3,725424	4,192462	9,501373
6,9	7,74588	0,91898	1,11000	2,06820	6,22640	6,89355	5,18723	2,361667	7,450064	2,278448	2,081356	2,632161	6,019804

8 – Resistência à compressão

Amostra	massa (g)	Área (mm ²)	Força (N)	Rc (N/mm ²)	MÉDIA	DP
AM10	288,0	4141,0	7012,5	1,69	1,78	0,222934
AM11	132,2	2063,0	3345,8	1,62		
AM11	170,7	3043,2	6204,3	2,04		
CP2018D	726,7	4764,8	5638,9	1,18	1,23	0,182038
CP2018D	1002,5	6047,1	6535,9	1,08		
CP2018D	744,5	8009,4	11490,8	1,43		

Anexo E – Resultados dos ensaios *in situ*

1 – Resistência superficial por esclerómetro pendular

	Muralha							Torre								
	Pro- vete	2004 N	Antiga N	2004 S	Antiga S	2004 Nas- cente	Antiga Nas- cente	2004 Po- ente	Argamassa 2018 N	Antiga N	2018 S	Argamassa 2018 S	Antiga S	Argamassa 2018 Nascente	Antiga Nas- cente	Antiga Po- ente
	75	35	26	66	99	50	34	74	40	65	28	40	54	22	72	28
	71	43	28	72	90	60	38	67	24	65	26	39	68	40	99	52
	75	50	40	60	65	68	49	46	38	45	42	11	64	31	85	52
	80	56	35	80	65	28	53	61	29	86	28	31	48	33	87	
	72	49	44	73	93	57	29	64	35	91	28	10	72	38	90	
	83	49	54	83	84	68	34	74		99	46	22	56	28	77	
	76	48	62	77	77	79	32	53		87	30	38	54	24	79	
	85	40	46	70	91	28	29	77		86	34	37	46	37	77	
	82	40	26	58	88	71	21	76		83	40	45	38	37	77	
	62	36	56	50	97	74	27			93	36	40	56	29	69	
	76	38	74	80	66	81	29			67	32	40	48		75	
	78	43	54	81	70	81	42			91	28	21	55		53	
		28	38	74	72	78	40			71	34	36			71	
		43	46	74	68	50	26				39	45			54	
			65	74	66	83	30				45	25			75	
			44	78	62	57	55				46	35				
			35	93	48		47				56	27				
				65	42		37				42	34				
				74	47		34					27				
				74	39		48					22				
				77	80		47					28				
				90	82		43					25				
				81	87		37					35				

				87	80		37					27				
				77	82		63					34				
				77	94		60					27				
				70	81		60					22				
				80								28				
				85												
				69												
				71												
				72												
				86												
				74												
Mé- dia	76	43	45	75	75	63	40	66	33	79	37	30	55	32	76	44
DP	6	7	14	9	17	18	11	11	7	15	8	9	10	6	12	14

2 – Velocidade de propagação de ultrassons

	Torre					
	Bloco novo			Bloco antigo		
	1083	1167	1029	1010,5	956	954
	949,5	1089,5	1034	1129,5	1131,5	1304,5
	1065	1073,5	1034	1134	1033	1067
	1417	1576	2165,5	985,5	1051,5	1124,5
	1577,5	1700,5	2383,5	983	877,5	1199,5
	2016,5	1661	1997	939,5	862	1098
	1453	1397,5		1175,5		
	1344	1450,5		1188,5		
	1344	1289,5		1244		
	1228	1318,5		1304		
		1437		1215,5		
		1462,5		1407,5		
		971		1180,5		
		1436,5		1085		
				1091,5		
				1074		
				1236,5		
				1299,5		
Média	1405,0			1111,4		
Desvio padrão	363,9			133,6		

	Muralha								
	Projeção 2004			Blocos 2004			Original		
	2541,5	511	541,5	1143	871,5	840,5	2772	2361	1849,5
	501	537,5	501	1145,5	729,5	877	2978	1984,5	1931,5
	490,5	524,5	517	1170	842,5	784,5	2522	2141,5	1872,5
	505	602	549,5	1099	903	746,5	994,5	1031,5	1071,5
	512	589,5	526,5	1103	892,5	891,5	949,5	992	1215,5
	521,5	616	539	1213,5			950,5	972,5	1106,5
	612,5	946,5	519,5				953	918,5	1067
	722,5	535	587				976,5	985	1268
	700,5	496,5	571				966	942,5	1073
Média	641,4			953,3			1 438,7		
Desvio padrão	391,5			163,3			644,9		