



LABORATÓRIO NACIONAL
DE ENGENHARIA CIVIL

DEPARTAMENTO DE MATERIAIS
Núcleo de Materiais Metálicos

Proc. 0204/11/17692

ESTUDOS MICROESTRUTURAIS DE AMOSTRAS DE ARGAMASSA, BETÃO E AGREGADOS

**Projecto PIP LNEC 2009-2012 “Materiais com interesse
histórico. Durabilidade e caracterização”**

Lisboa • Novembro de 2011

I&D MATERIAIS

RELATÓRIO 346/2011 – NMM

ESTUDOS MICROESTRUTURAIS DE AMOSTRAS DE
ARGAMASSA, BETÃO E AGREGADOS: PROJETO PIP LNEC
2009-2012 “MATERIAIS COM INTERESSE HISTÓRICO.
DURABILIDADE E CARACTERIZAÇÃO”

MICROSTRUCTURAL STUDIES IN MORTAR, CONCRETE
AND AGGREGATE SAMPLES: PROJECT PIP LNEC 2009-
2012 “MATERIALS WITH HISTORICAL INTEREST.
DURABILITY AND CHARACTERIZATION”

ÉTUDES DE LA MICROSTRUCTURE DES MORTIERS,
BÉTONS ET GRANULATS : PROJECT PIP LNEC 2009-2012
« MATÉRIAUX AVEC INTÉRÊT HISTORIQUE. DURABILITÉ
ET CHARACTERISATION »

ÍNDICE DO TEXTO

	Pág.
1 - INTRODUÇÃO	1
2 - ENSAIOS REALIZADOS	2
2.1 - Microscopia óptica.....	2
2.2 - Microscopia electrónica de varrimento (MEV) e microanálise de raios X por dispersão em energias (EDS).....	3
2.3 - Difractometria de raios X (DRX).....	3
2.4 - Análise química	4
2.4.1 Determinação do teor de areia, sulfatos e cloretos	4
2.4.2 Determinação do teor de álcalis (sódio e potássio).....	4
3 - CONTEXTUALIZAÇÃO DOS MATERIAIS ANALISADOS	4
3.1 - ESTRUTURAS DE BETÃO.....	4
3.1.1 Pontes Criz I e Criz II.....	4
3.1.2 Ponte da Borralha	5
3.1.3 Barragem de Fagilde	7
3.2 - CARACTERIZAÇÃO PETROGRÁFICA DE AGREGADOS PARA BETÃO	8
3.3 - ARGAMASSAS HISTÓRICAS	8
3.3.1 Forte de Santa Marta - Cascais.....	8
3.3.2 Igreja do Santíssimo Sacramento em Alcântara, Lisboa.....	10
3.3.3 Villa Romana de Pisões, Beja.....	11
3.3.4 Horto e Ermida de N ^a Sr ^a da Conceição do Paço das Alcáçovas, Viana do Alentejo.....	13
3.3.5 Argamassas do Forte da N ^a Sr. ^a da Luz, Cascais.....	15
4 - CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL DE AMOSTRAS DE BETÃO E DE AGREGADOS	17
4.1 - Estudo de caso de formação de etringite de origem interna, sem potencial de expansão	17
4.2 - Estudo de caso de formação de etringite e gel da reacção álcalis-sílica com expansão.....	19
4.3 - Estudo morfológico ao MEV de clínquer portland em amostras de betão.....	21
4.4 - Estudo petrográfico de agregados siliciosos e carbonáticos.....	23
5 - CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL DE AMOSTRAS DE ARGAMASSAS HISTÓRICAS	27
5.1 - Forte de Santa Marta, Cascais	27
5.2 - Igreja do Santíssimo Sacramento em Alcântara em Lisboa	29
5.3 - Villa Romana de Pisões, Beja	37
5.4 - Forte de Nossa Senhora da Luz, Cascais	47
5.5 - Horto do Paço das Alcáçovas	49

6 - CONCLUSÕES	62
BIBLIOGRAFIA	64

INDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1 – a) Máquina usada no polimento das lâminas de vidro e das amostras impregnadas; b) Colagem dos provetes às lâminas de vidro, numa placa de aquecimento e sob pressão (Gonçalves, 2007).....	2
Figura 2 – Localização das Pontes do Criz I e do Criz II.	5
Figura 3 – Localização da Ponte da Borralha.	6
Figura 4 – Localização da Barragem de Fagilde.	7
Figura 5 – Localização do Forte e Farol de Santa Marta, em Cascais.	9
Figura 6 – Localização e fachada da Igreja do Santíssimo Sacramento em Lisboa.	11
Figura 7 – Sítios arqueológicos da Beja romana, com a <i>villa</i> de Pisões (mapa elaborado pelo IPPAR, em <i>Guia a villa romana de Pisões</i> , Lisboa, Outubro 2000).	12
Figura 8 – a) Panorâmica do peristilio e do lado este da villa; b) Panorâmica do lado noroeste da villa.	13
Figura 9 – Localização da (a) povoação de Alcáçovas e (b) do Horto e Ermida de N ^a Sr. ^a da Conceição.	14
Figura 10 – a) Vista do Paço das Alcáçovas e da entrada no horto; b,c) Pormenores do revestimento com embrechados das paredes na zona do horto; d,e) Pormenores do revestimento do interior da Ermida de N ^a Sr. ^a da Conceição.	14
Figura 11 – Forte da N ^a Sr. ^a da Luz: localização e pormenor das muralhas, Cascais.	16
Figura 12 – Betão da Ponte da Borralha (pilar): a) Imagem de microscopia óptica com luz UV, onde é possível ver as zonas com maior incidência de vazios pelo efeito da fluorescência da fluoresceína; b) Imagem ao MEV em que são visíveis cristais aciculares de etringite nos interstícios da pasta; c) Espectro EDS da etringite; d) Difractogramas do betão que mostram a presença da etringite na amostra.....	18
Figura 13 – Betão da Ponte da Borralha (tabuleiro): a) Imagem ao MEV que mostra cristais aciculares de etringite nos vazios de ar incorporado da pasta; b) Imagem ao microscópio petrográfico que evidencia uma pasta com elevada microporosidade; c) O difractograma da amostra não confirma a presença da etringite, porém nota-se portlandite em abundância que associada à alta microporosidade indica uma elevada razão água/cimento.....	19
Figura 14 – Betão da Ponte CRIZ II: a) Observação por microscopia óptica que mostra microfissuras preenchidas por gel de RAS, visão panorâmica (a) e detalhes (b, c); d) Espectro EDS da	

composição do gel de RAS, ilustrado pela imagem (e) de textura botrioidal característica de fases amorfas neoformadas.....	20
Figura 15 – Betão da Ponte Criz II: a,b) Aspecto do gel de RAS ao microscópio óptico, mostrando desenvolvimento de microfissuras em série, caracterizando a expansão por pressão de cristalização; c) Aspecto ao MEV do gel de RAS (detalhe em e) e sua componente cristalina (d).....	21
Figura 16 – Grãos de clínquer em textura “ <i>bunch of grapes</i> ” em diferentes amostras de betão; a) Grãos de clínquer com tamanho da ordem de 100 µm e limites bem definidos; b) Grãos de clínquer da ordem de 150 µm e limites bem definidos; c) Grãos de clínquer com tamanho da ordem de 300 µm e limites difusos; d) Grãos de clínquer que evidenciam composição diferente das amostras anteriores e com grão de dimensão superior a 300 µm e limites difusos.....	22
Figura 17 – Observação ao microscópio petrográfico da areia 1 classificada de reactiva por ensaios de expansão em barra de argamassa (imagem em polarizadores cruzados). Notar as feições características potencialmente reactivas indicadas pelas setas vermelhas (quartzo micro e criptocristalino), seta amarela (filossilicato alterado) e seta azul (feldspato mesoperfítico).....	23
Figura 18 – Observação ao microscópio petrográfico da Brita 1 classificada de reactiva por ensaios de expansão em barra de argamassa (imagem em polarizadores cruzados). Notar as feições características potencialmente reactivas indicadas pelas setas vermelhas (quartzo micro e criptocristalino), seta amarela (quartzo deformado) e setas azuis (filito, filonito).....	24
Figura 19 – Observação ao microscópio petrográfico da Areia 2 classificada de não reactiva por ensaios de expansão em barra de argamassa (imagem em polarizadores cruzados). Apesar da classificação de “não reactiva”, notam-se feições características de minerais potencialmente reactivos (setas vermelhas, quartzo policristalino e criptocristalino) porém em menor quantidade que nas amostras Areia 1 e Brita 1.....	25
Figura 20 – Imagens ao microscópio petrográfico (polarizadores cruzados) de feições reactivas de feldspatos alterados. Amostras: Pedrassa (a), Monte das Carrascas (b), Cabeça Santa (c); Vila das Aves (d). Notam-se diversos tipos de alteração de feldspatos, alteração que incorre na abertura da estrutura cristalina do mineral, libertando os álcalis para a solução intersticial do ligante, além de produzir minerais secundários, que em grande parte são filossilicatos com elevada superfície específica; a) alteração de plagioclase em argilominerais; b) alteração de plagioclase em sericite e (c) em moscovite; d) alteração de plagioclase em argilominerais localizados em microfissuras, formando condutas facilitadoras da distribuição de minerais potencialmente reactivos.	26
Figura 21 – Imagens ao microscópio petrográfico (polarizadores cruzados) de feições reactivas de micas alteradas. Amostras: Esporão (a), Vale do Boi (b). Nota-se a alteração de biotite em clorite, com conseqüente abertura da estrutura e formação secundária de clorite.....	26
Figura 22 – Imagens ao microscópio petrográfico (polarizadores cruzados) de feições potencialmente reactivas: a) Dolomito com quartzo deformado por estiramento (metamorfismo dinâmico); b) Rocha granitóide (TD) com alteração intensa de feldspatos porfiroclásticos em epidoto e filossilicatos diversos (clorite, sericite) e quartzo intersticial.....	27

Figura 23 – Observação ao microscópio óptico de polarização da amostra da argamassa externa (SM 101) do Forte de Santa Marta. a, b) Fragmento de rocha vulcânica muito alterado por reacção com a pasta de cal (orla de reacção com cristais microesparfíticos de carbonato em b); c,d) Precipitação de halite (NaCl) em cavidades devido ao contacto directo com o <i>spray</i> marítimo. Em a) e c) polarizadores paralelos, em b) e d) polarizadores cruzados.	28
Figura 24 – Observação ao microscópio óptico de polarização da amostra da argamassa interna (SM 201) do Forte de Santa Marta (polarizadores cruzados). a) Cavidade em túnel, provavelmente por lixiviação de parte da pasta. Em b,c), nota-se microporosidade da pasta bem desenvolvida, fornecendo a característica de permeabilidade da pasta, permitindo a entrada de soluções externas e consequente precipitação de minerais neoformados, tal como etringite em c). Em d) nota-se a heterogeneidade da pasta onde as setas vermelhas indicam poros isolados e pasta coesa à esquerda, já a seta amarela indica zona da pasta com alta microporosidade.	29
Figura 25 – Vista da fachada das traseiras, de onde foram retiradas as amostras, da Igreja do Santíssimo Sacramento em Lisboa.	30
Figura 26 – Amostra SE1-Ext, argamassa de revestimento semelhante a uma marmorite. Notar a diferenciação mineralógica, indicada pelo difractograma, da área da moldura em relação à zona mais ao meio da marmorite, nomeadamente com elevada proporção de portlandite na moldura. Detectam-se também cloroaluminatos, compostos indiciadores de degradação e que têm características higroscópicas. Notação: CIAh – Cloroaluminatos de cálcio hidratados; C – Calcite; P – Portlandite; CAh – Carboaluminatos de cálcio hidratados; F – Feldspatos; Q – Quartzo; P – Piroxenas; E – Etringite; M - Mica.	30
Figura 27 – Amostra SE1-Int, argamassa de reboco de cor branca. No difractograma detectam-se cloroaluminatos e etringite. Notação: CIAh – Cloroaluminatos de cálcio hidratados; C – Calcite; P – Portlandite; CAh – Carboaluminatos de cálcio hidratados; F – Feldspatos; Q – Quartzo; P – Piroxenas; E – Etringite; M – Mica; A - Anfíbulas.	31
Figura 28 – Amostra SE2, argamassa de reboco de cor branca. No difractograma nota-se que os produtos de alteração, tais como cloroaluminatos e etringite, não ocorrem ou estão em menor quantidade comparativamente à amostra SE1-Int. Notação: C – Calcite; F – Feldspatos; Q – Quartzo; A - Anfíbulas.	32
Figura 29 – Amostra SE4, argamassa de reboco e regularização de cor branca e barramento fino na cor tijolo.	33
Figura 30 – Observação ao microscópio óptico de polarização (polarizadores cruzados) da amostra (a) SE1-Ext - zona central da marmorite e (b) SE1-Ext moldura. De assinalar a diferença de comportamento óptico da pasta, com carbonatação intensa em (a) e concentrada nas fissuras em (b). Na zona da moldura existem orlas de portlandite em torno dos agregados, e a pasta é mais compacta e menos nodular.	34
Figura 31 – Moldura na amostra SE1-Ext: a) imagem ao microscópio óptico de polarização, b) imagem ao MEV no modo de electrões retrodifundidos; c-f) Mapas de raios X.	35
Figura 32 – Observação ao microscópio óptico de polarização do contacto (linha vermelha) entre as argamassas de revestimento tipo marmorite (SE1-Ext) e a de reboco (SE1-Int). É visível que a	

marmorite possui agregados mais grossos e menor porosidade que a argamassa de reboco (abaixo da linha vermelha): a) Imagem em polarizadores paralelos; b) Imagem com polarizadores cruzados.	36
Figura 33 – Observação ao microscópio óptico de polarização (polarizadores cruzados) da amostra SE1-Ext, evidenciando a alteração de feldspatos por reacção com a pasta (centro das imagens a, b e c) e de fragmento de basalto com orla de reacção em d). As orlas de reacção apresentam composição predominantemente carbonática.	36
Figura 34 – Observação ao microscópio óptico de polarização evidenciando neoformação de etringite e halite em poros. Amostra SE1-Ext (a e b) e amostra SE1-Int (c e d). Polarizadores paralelos em a), b) e c) e cruzados em d).	37
Figura 35 – Aspectos da observação macroscópica da amostra P1	39
Figura 36 – Observação estratigráfica da amostra de revestimento P1 à lupa binocular: a) Aspecto geral; b),c) Pormenores das zonas assinaladas na imagem (a) onde são visíveis os agregados escuros e os nódulos de cal.....	39
Figura 37 – Aspectos da observação macroscópica da amostra P2.....	40
Figura 38 – Observação estratigráfica da amostra de revestimento P2 à lupa binocular a) Aspecto geral; b), c) Pormenores da zona assinalada na imagem (a) onde são visíveis os agregados verdes e vermelhos.....	40
Figura 39 – Aspectos da observação macroscópica da amostra de P3.....	41
Figura 40 – Observação estratigráfica da amostra de revestimento P3 à lupa binocular: a) Aspecto geral; b),c) Pormenores da zona assinalada na imagem (a) onde é visível um agregado rolado escuro (b) e um agregado silicioso do tipo quartzito (c).	41
Figura 41 – Aspectos da observação macroscópica da amostra de P6.....	42
Figura 42 – Observação estratigráfica da amostra de revestimento P6 à lupa binocular: a) Aspecto geral; b) Pormenor da zona assinalada na imagem (a) onde é visível um agregado escuro com uma orla de reacção acastanhada; c) Pormenor onde são visíveis agregados vermelhos (tijolo), verdes (tipo xisto) e claros (quartzo).....	42
Figura 43 – Aspectos da observação macroscópica da amostra de P8.....	43
Figura 44 – Observação estratigráfica da amostra de revestimento P8 à lupa binocular: a) Aspecto geral; b) Pormenor da zona assinalada na imagem (a) onde é visível um grande agregado de tijolo, mas nota-se também a variabilidade de outros tipos de agregado; c) Outro pormenor da argamassa onde ocorrem agregados de quartzo e xisto.....	43
Figura 45 – Aspectos da observação macroscópica da amostra de PB1.	44
Figura 46 – Observação estratigráfica da amostra de revestimento PB1 à lupa binocular: a) Aspecto geral; b) Pormenor da zona assinalada na imagem (a) onde é visível um agregado amarelado (xisto alterado); c) Outro pormenor da argamassa onde pode-se ver um agregado cinza-verde (tipo xisto).....	44
Figura 47 – Observação da argamassa P6 em lâmina delgada ao microscópio petrográfico, em polarizadores paralelos (b, d, f) e cruzados (a, c, e): Notação: 1. rocha ígnea ácida muito alterada; 2. fragmentos cerâmicos – tijolo; 3. filossilicato; 4. anfíbola.....	46

Figura 48 – Observação da argamassa do baluarte sul (BS5) do Forte de Nossa Senhora da Luz em lâmina delgada ao microscópio petrográfico. Notar a cristalização maciça de hidromagnesite associado a nódulos de cal em a) e b). Em c) e d) pormenor da imagem (b), mostrando detalhes de hidromagnesite. Em d) polarizadores paralelos, em a), b) e c) polarizadores cruzados.....	48
Figura 49 – Observação da argamassa do baluarte sul (BS5) do Forte de Nossa Senhora da Luz em lâmina delgada ao microscópio petrográfico. É visível a cristalização de halite (NaCl) num vazio irregular. Em a) polarizadores paralelos, em b) polarizadores cruzados.	48
Figura 50 – Imagens ao MEV de superfícies de fractura da argamassa do baluarte sul (BS5); a) Pormenor de halite e respectivo espectro EDS em b); c) Esporo de fungo; d) Formações de gesso e respectivo espectro EDS em e).....	49
Figura 51 – Imagem do local de extracção do revestimento de embrechados numa parede na zona do horto.	50
Figura 52 – Pormenores da argamassa de suporte dos embrechados, sendo visíveis conchas, fragmentos vítreos e de cerâmica.....	50
Figura 53 – Pormenores de materiais dos embrechados, nomeadamente fragmentos pétreos de cor rosada (a), branca (b), verde (c), negra (d) e de origem metalúrgica de cor verde/avermelhada (e).	51
Figura 54 – Pormenores de materiais cerâmicos de diferente origem e natureza usados nos embrechados.....	52
Figura 55 – Registos difractométricos da argamassa, Global (vermelho) e Fração Fina (azul). Notação: M – Mica; Af – Anfíbola; F – Feldspatos; Q – Quartzo; C – Calcite.	53
Figura 56 – Registo difractométrico dos resíduos metalúrgicos. Notação: Q – Quartzo; Ch – Calcopirite; Cu – Cobre.....	54
Figura 57 – Registo difractométrico do minério negro. Notação: T – Turmalina; Q – Quartzo; H – Hematite.....	54
Figura 58 – Imagem ao microscópio petrográfico da argamassa de suporte dos embrechados, sendo visíveis zonas mais escuras no ligante (setas) onde existe maior concentração de micronódulos de cal: a) Imagem com nicóis cruzados (NX); b) Imagem com os nicóis paralelos (N//).	57
Figura 59 – Imagem ao microscópio petrográfico da argamassa de suporte dos embrechados, sendo visíveis vazios e microfissuras na pasta de cal: a) Imagem com nicóis cruzados (NX); b) Imagem com os nicóis paralelos (N//).....	57
Figura 60 – Imagens ao microscópio petrográfico da argamassa de suporte onde são visíveis (a) grão de feldspato gráfico (NX); b) Feldspato alterado para epídoto (NX); c) Feldspato alterado para sericite (NX); d) Fragmento de tonalito/granodiorito com impregnações por hidróxidos de ferro.	58
Figura 61 – Imagens ao microscópio petrográfico da argamassa de suporte onde são visíveis grãos cerâmicos de diferentes reactividades, evidenciadas pela orla de reacção: a) Imagem em NX; b) Imagem em N//.....	58
Figura 62 – Imagens ao microscópio petrográfico da argamassa de suporte onde é visível um fragmento de madeira: a) Imagem em NX; b) Imagem em N//.....	59

Figura 63 – Imagens ao microscópio petrográfico do mármore verde: a) Imagem em NX; b) Pormenor mostrando ao centro cristais prismáticos de piroxena (Imagem em NX); c) Idem mas com N//.	60
Figura 64 – Imagens em NX ao microscópio petrográfico do quartzito rosa	60
Figura 65 – a) Imagem ao MEV no modo de electrões retrodifundidos do minério negro; b, c, d, e) Mapas de raios X dos elementos alumínio (Al), magnésio (Mg), silício (Si) e ferro (Fe).	61

INDICE DE QUADROS

Quadro 1 – Referenciação e proveniência dos agregados estudados	8
Quadro 2 – Teor de clínquer (em %) nas amostras de betão analisadas.....	22
Quadro 3 – Teores de resíduo insolúvel, cloretos, sulfatos, sílica solúvel e álcalis (em %) nas argamassas externas da Igreja do Santíssimo Sacramento	33
Quadro 4 – Referência das amostras do Forte de Nossa Senhora da Luz	47
Quadro 5 – Identificação e referenciação das amostras do Horto do Paço das Alcáçovas.	50
Quadro 6 – Composição mineralógica qualitativa das amostras.	55
Quadro 7 – Teores (em %) de álcalis, sulfatos, cloretos, sílica solúvel e resíduo insolúvel da argamassa.....	56
Quadro 8 – Composição simplificada da argamassa (% em massa)	56

ESTUDOS MICROESTRUTURAIS DE AMOSTRAS DE ARGAMASSA, BETÃO E AGREGADOS: PROJETO PIP LNEC 2009-2012 “MATERIAIS COM INTERESSE HISTÓRICO. DURABILIDADE E CARACTERIZAÇÃO”

1 - INTRODUÇÃO

No Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) a actividade de investigação programada é enquadrada por planos quadrienais de natureza estratégica, desenvolvidos em linhas de investigação consideradas prioritárias pelo seu interesse para o país. Neste enquadramento, está em curso desde 2009 um projecto denominado “Materiais com interesse histórico. Durabilidade e caracterização”, incluído no tema transversal “Conservação e requalificação”, do Plano de Investigação Programada para o quadriénio 2009-2012 do LNEC.

No presente relatório são apresentados e descritos estudos mineralógicos e microestruturais realizados em amostras de argamassas antigas, betão e agregados pétreos. O trabalho desenvolvido inseriu-se num estágio no âmbito da caracterização microestrutural realizado no Núcleo de Materiais Metálicos (NMM) do Departamento de Materiais do LNEC, no âmbito do programa de desenvolvimento e capacitação no exterior (PDCE) de uma técnica do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo - IPT, Brasil.

O estágio dividiu-se em duas vertentes. A primeira consistiu em estudos mineralógicos e microestruturais com o objectivo de identificar produtos decorrentes de reacções expansivas internas, nomeadamente a reacção álcalis-sílica (RAS) e a reacção sulfática interna devida à formação de etringite retardada (DEF). Este estudo inclui ainda a análise petrográfica de agregados pétreos com feições reactivas e a quantificação do teor de clínquer em amostras de betão. A segunda vertente consistiu nos estudos das microfieções e composição química de revestimentos históricos, nomeadamente do Forte de Santa Marta, Forte de Nossa Senhora da Luz, Igreja do Santíssimo Sacramento, *Villa* Romana de Pisões e Embrechados do Horto e Ermida de N^a Sr^a da Conceição de Alcáçovas.

Os principais resultados alcançados com este trabalho consistiram no aperfeiçoamento das metodologias de caracterização microestrutural, utilizando quer a microscopia óptica como a microscopia electrónica, aplicadas a materiais de construção de diversas origens e idades, complementadas com análises químicas e mineralógicas por difractometria de raios X. Este trabalho contribuiu para o reforço das capacidades instaladas no laboratório de análise microestrutural de materiais do NMM, quer ao nível de estudos de composição de materiais como dos mecanismos de degradação físico-química de argamassas e betões, uma vez que no seu decurso houve a possibilidade do aperfeiçoamento e actualização dos conhecimentos do pessoal técnico do laboratório envolvido. Neste sentido resultam maior potencialidade e eficácia de resposta a novas solicitações nos âmbitos já mencionados.

2 - ENSAIOS REALIZADOS

2.1 - Microscopia óptica

Dos provetes foram preparadas lâminas delgadas para observação ao microscópio petrográfico. Sempre que possível as amostras foram cortadas de modo a se obterem provetes paralelepípedicos com dimensões aproximadas de 1 x 2 x 3 cm. Na situação contrária usaram-se fragmentos com superfície externa o mais plana possível.

As amostras foram cortadas numa máquina de corte de precisão LOGITECH CS-10, tendo-se usado um disco diamantado arrefecido a etilenoglicol. As amostras depois de bem lavadas com etanol, foram secas com jacto de ar e colocadas numa estufa à temperatura de cerca de 40° C, durante 24 horas. As amostras foram de seguida impregnadas sob vácuo numa câmara LOGITECH-IU30, tendo sido usada para impregnações dos betões resina epóxi da Logitech (tipo 301) com fluoresceína e sem fluoresceína no caso das argamassas. Após impregnação poliu-se uma das faces da amostra, numa máquina de polimento, empregando como abrasivos carboneto de silício (grid 600) e óxido de alumínio (9 µm), usando etilenoglicol como agente dispersivo.

Para a preparação das lâminas delgadas utilizaram-se lâminas de vidro que foram previamente polidas na máquina de polimento LOGITHEC-PM5 utilizando carboneto de silício como abrasivo, de modo a ficarem com uma espessura uniforme e determinada. As lâminas foram limpas com etanol e secas com jacto de ar livre de poeiras. De seguida colou-se a parte polida da amostra na lâmina de vidro com cola epóxi (Logitech – 301), tendo o cuidado de evitar a formação de bolhas de ar entre amostra/lâmina de vidro. Esta montagem foi deixada sob pressão durante 24 horas numa placa de aquecimento a 40°C, tal como ilustra a Figura 1.



a)



b)

Figura 1 – a) Máquina usada no polimento das lâminas de vidro e das amostras impregnadas; b) Colagem dos provetes às lâminas de vidro, numa placa de aquecimento e sob pressão (Gonçalves, 2007).

As lâminas, após a secagem da cola, foram devidamente identificadas com o auxílio de um marcador para vidro. Em seguida, cortaram-se as amostras, já coladas às lâminas, na máquina de corte com disco de ponta diamantada, de modo a ficarem com uma espessura entre 300 a 400 μm .

Na máquina de polimento fez-se o desbaste das amostras, usando como abrasivos carboneto de silício (grid 600) e óxido de alumínio (15 μm), até se obter uma espessura final de cerca de 30 μm .

As lâminas foram estudadas utilizando um microscópio de polarização da marca Olympus BX60 com sistema de vídeo para aquisição de imagens.

A microscopia óptica permite extrair inúmeras informações, tais como: estado de alteração química da pasta e agregados, padrão de microfissuras, vazios e microporosidade, composição mineralógica da pasta e agregados, identificação mineralógica de fases neoformadas, textura de agregados, frente de carbonatação e orlas de reacções entre pasta e agregado.

2.2 - Microscopia electrónica de varrimento (MEV) e microanálise de raios X por dispersão em energias (EDS)

Efectuaram-se observações de superfícies polidas e de fractura de betões e argamassas num microscópio electrónico de varrimento (MEV) JEOL JSM-6400, tendo-se recoberto as superfícies das amostras com uma película de ouro (Au) – paládio (Pd). Estas observações foram, em simultâneo, complementadas com a informação da sua composição química pela microanálise de raios X por dispersão em energias (EDS), utilizando um microanalizador de raios X OXFORD INCA 300 associado ao MEV, com tensão de feixe electrónico de 15 keV.

A análise de superfícies de fractura permitiu fazer o estudo morfológico dos compostos e, com o auxílio do EDS, a identificação das fases presentes. Permitiu também observar em agregados texturas de corrosão por processos de reacções com a pasta, bem como a morfologia dos minerais da pasta.

A análise de secções polidas ao MEV-EDS permitiu observar as fases minerais por meio do contraste da massa atómica dos elementos químicos presentes (electrões retrodifundidos) e o seu mapeamento como forma de identificar os locais de maior concentração nesses elementos.

2.3 - Difractometria de raios X (DRX)

Com o objectivo de avaliar eventuais variações na composição mineralógica dos betões e argamassas estudadas, efectuaram-se análises mineralógicas por difractometria de raios X (DRX). As amostras foram desagregadas, moídas em moinho de bolas e passadas no peneiro de 106 μm . Quando possível, efectuaram-se análises de fracções mais concentradas no ligante que foram designadas por fracções finas.

As análises de DRX foram realizadas num difractómetro PW 3710 da marca Philips, tendo-se utilizado a radiação $K\alpha$ do cobalto, nas seguintes condições de ensaio: varrimento entre 3 e $74^\circ 2\theta$; velocidade de varrimento de $0.05^\circ 2\theta/s$; tensão e corrente de filamento, respectivamente, de 35 kV e 45 mA.

2.4 - Análise química

2.4.1 Determinação do teor de areia, sulfatos e cloretos

A determinação do teor de areia foi efectuada a partir dum ataque a quente (próximo da temperatura de ebulição) com uma solução de ácido clorídrico (1:3), sendo o resíduo do ataque – *resíduo insolúvel* (RI) – seco a $105^\circ C$. O valor de RI assim determinado traduzirá, grosso modo, o teor actual de areia siliciosa nas amostras analisadas.

Com o objectivo de se detectarem compostos provenientes de reacções de degradação realizou-se um ataque com ácido nítrico (10%) nas amostras de betão ou argamassa (moídas a uma granulometria inferior a $106 \mu m$ e seca a $105^\circ C$), tendo-se efectuado a determinação de cloretos por potenciometria e a determinação de sulfatos pelo método gravimétrico.

2.4.2 Determinação do teor de álcalis (sódio e potássio)

A determinação do teor de álcalis foi realizada na solução resultante do ataque da amostra com ácido nítrico a 10%. Assim, a solução resultante da filtração da amostra após sofrer ataque ácido, foi analisada por espectrofotometria de absorção atómica (EAA) num espectrofotómetro AA-6300 da marca Shimadzu para determinação dos teores de sódio (Na^+) e potássio (K^+) permitindo calcular os valores dos teores de óxidos de sódio (Na_2O) e de potássio (K_2O) presentes.

No caso das amostras de argamassa a determinação dos teores de álcalis, quando confrontados com as técnicas mineralógicas, ajudam a perceber o grau de alteração química, pois estes compostos alcalinos, bem como os sulfatos e cloretos, estão contidos nas fases minerais de sais, hidróxidos e argilominerais neoformados. No caso dos betões estes elementos podem ser responsáveis por reacções químicas internas, como as reacções álcalis-agregado, ou externas decorrentes da penetração de soluções alcalinas, como as dos descongelantes.

3 - CONTEXTUALIZAÇÃO DOS MATERIAIS ANALISADOS

3.1 - ESTRUTURAS DE BETÃO

3.1.1 Pontes Criz I e Criz II

As pontes sobre o rio Criz situam-se na EN 234 – Ponte do Criz I (Ponte sobre a Ribeira da Breda ao km 57) e Ponte do Criz II (Ponte do Criz ao km 59,3). O rio Criz nasce no concelho de Tondela, lugar

de Miserela, entre Carvalhal da Mulher e Silvares. O seu leito divide os concelhos de Mortágua e Santa Comba Dão e vai desaguar à Barragem da Aguieira (Figura 2). Os pilares das pontes apresentaram fissuração aleatória (*map cracking*) intensa, indicativa de reacções expansivas internas. De forma a perceber quais são as zonas mais afectadas nestas estruturas, foram retiradas carotes de diferentes pilares e de várias zonas dos tabuleiros. Nos pilares foram amostradas zonas em contacto com a água e fora da sua influência directa.

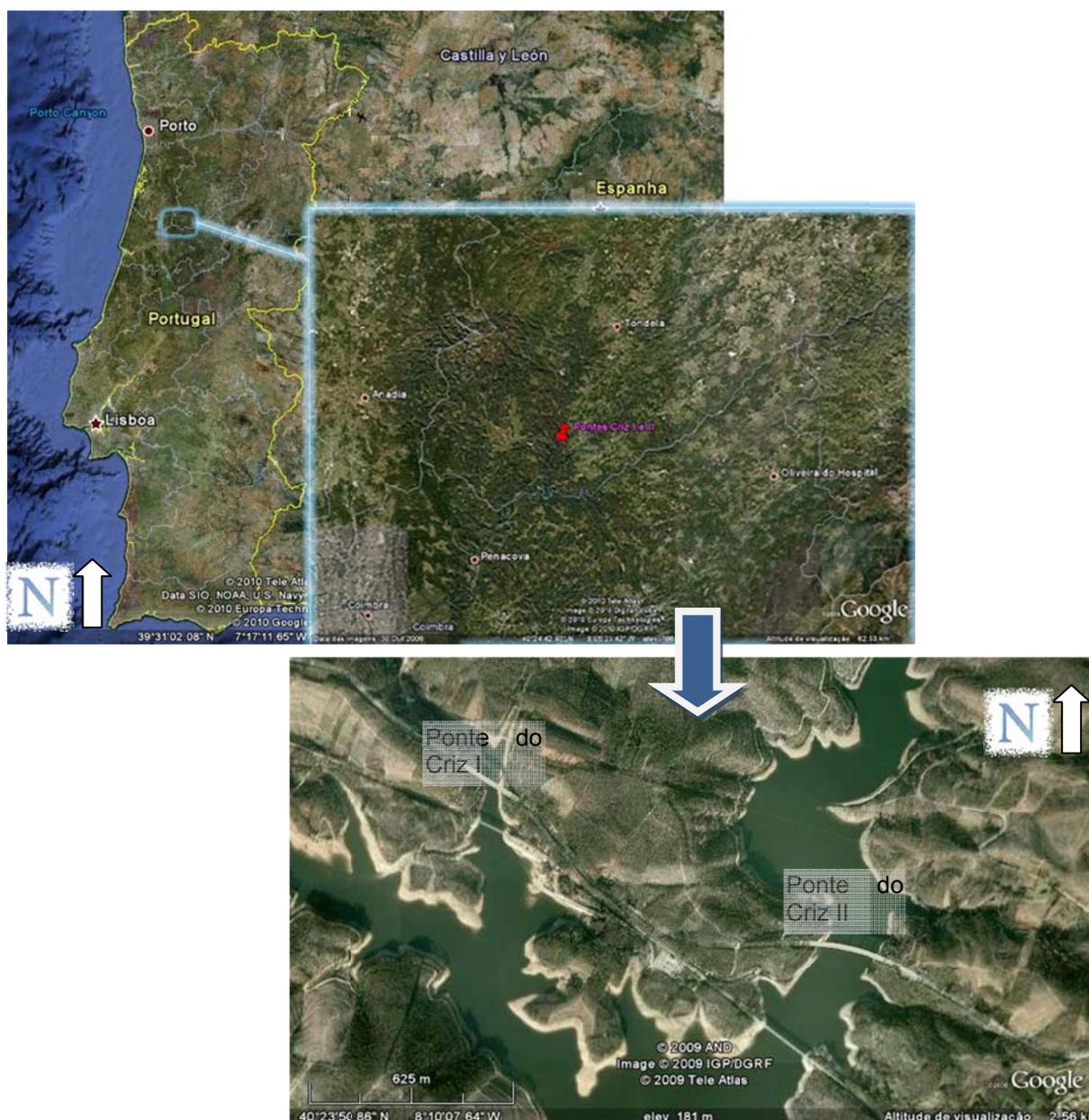


Figura 2 – Localização das Pontes do Criz I e do Criz II.

3.1.2 Ponte da Borralha

A Ponte sobre o Rio Borralha localiza-se na extremidade da Albufeira da Venda Nova, no ponto mais a Sul do Concelho de Montalegre, ao km 95+055 da EN 103, Distrito de Vila Real (Figura 3).

A ponte apresentava sinais de deterioração, tendo sido efectuados ensaios de diagnóstico para verificar se a deterioração era causada por reacções expansivas internas. As amostras foram retiradas dum pilar, fora da zona de influência directa da água, e do tabuleiro.

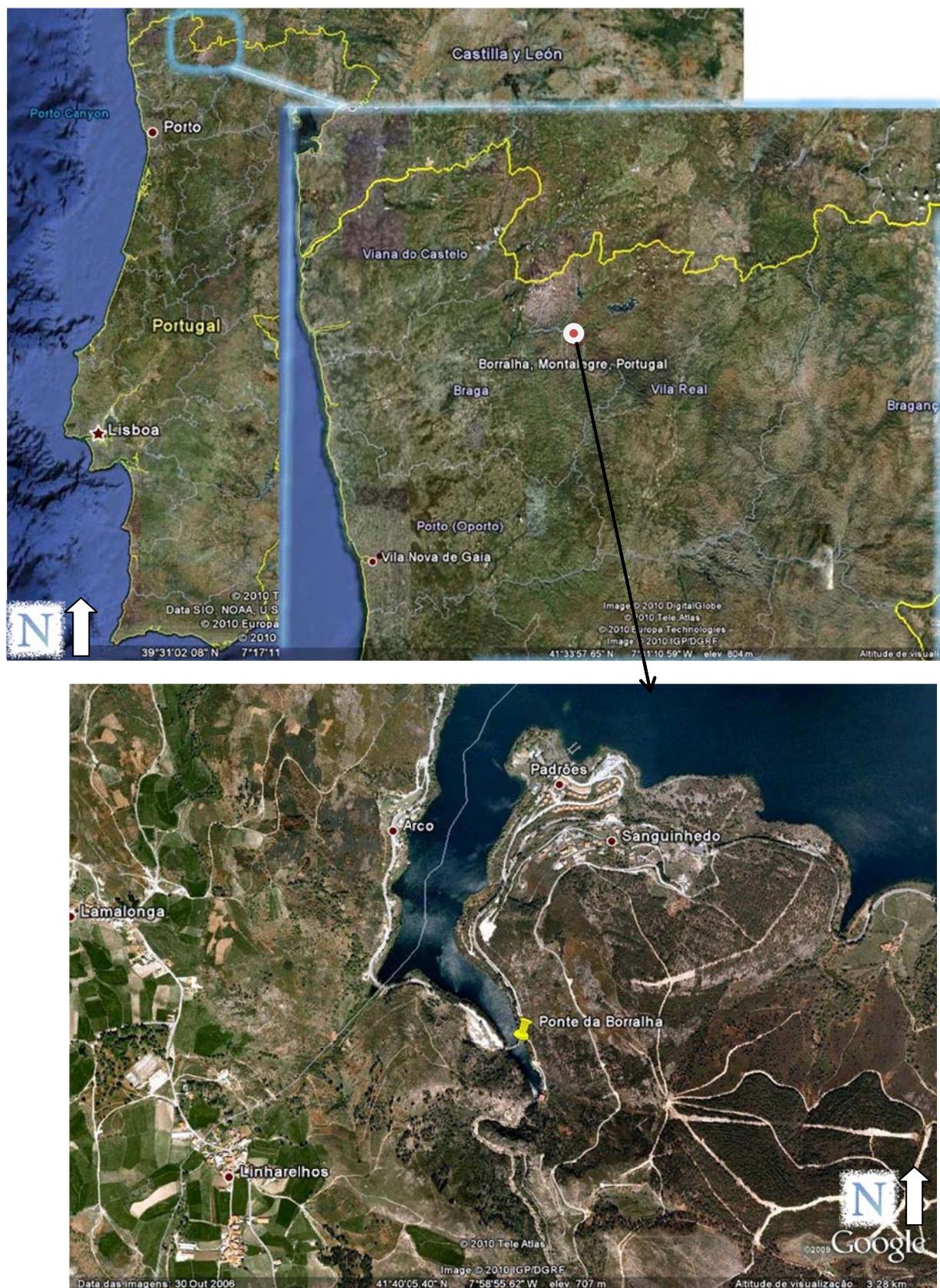


Figura 3 – Localização da Ponte da Borralha.

3.1.3 Barragem de Fagilde

A barragem de Fagilde foi construída no início da década de 1980, no rio Dão, próximo de Viseu, num local onde o rio tem orientação E-W (Figura 4). Trata-se de uma barragem em betão com 27,5m de altura, constituída por trechos em abóbada, em gravidade e contrafortes.

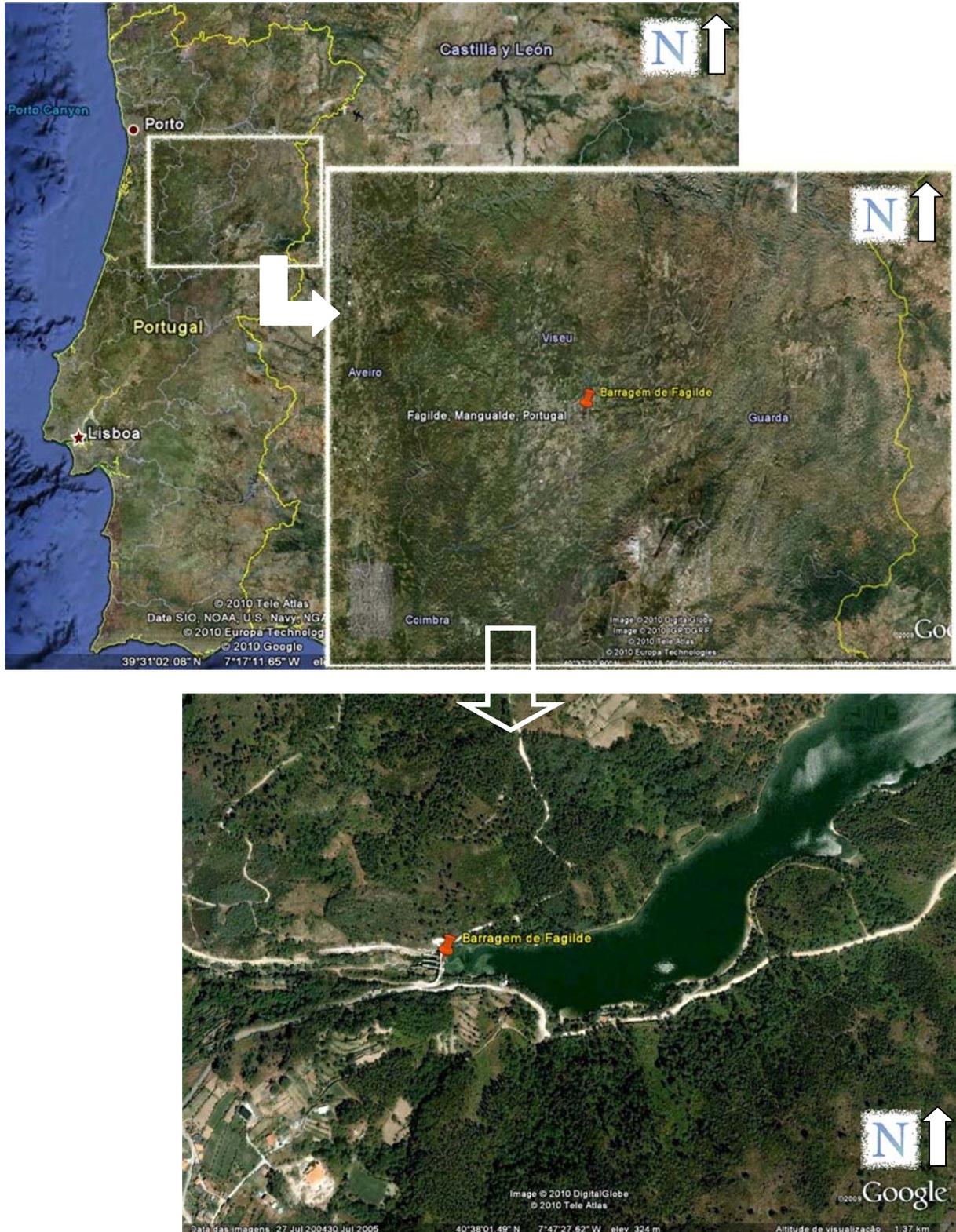


Figura 4 – Localização da Barragem de Fagilde.

A barragem apresentava exsudações no betão, fissuras aleatórias (*map cracking*), características indicativas de deterioração por reacções expansivas internas. Foram amostradas, por meio de furos verticais, as abóbadas direita e esquerda, contrafortes das margens direita e esquerda e patamar do contraforte na margem direita.

3.2 - CARACTERIZAÇÃO PETROGRÁFICA DE AGREGADOS PARA BETÃO

Foram estudadas a microestrutura e textura de agregados rochosos de diversas origens e usos, com o objectivo de determinar a sua reactividade potencial aos álcalis. Os agregados estudados têm as designações e origens indicadas na Tabela 1.

Quadro 1 – Referenciação e proveniência dos agregados estudados

Designação	Proveniência
Pedrassa	Viseu / Nelas / Canas de Senhorim
Monte das Carrascas	Guarda / Celorico da Beira / Açores
Vale do Boi	Viseu / Nelas / Canas de Senhorim
Vila das Aves	Porto / Santo Tirso / Vila das Aves
Esporão - Cabeça Santa	Porto / Penafiel / Cabeça Santa
Montemor	Évora / Montemor-o-Novo
Santa Eulália	Portalegre / Elvas / Santa Eulália
Areia 1	Santarém / Abrantes / Tramagal
Brita 1	Santarém / Abrantes / Tramagal
Dolomito	Portalegre / Sousel / Vila do Cano
Areia 2	Bragança / Miranda do Douro
TD	Dondo / Angola

3.3 - ARGAMASSAS HISTÓRICAS

3.3.1 Forte de Santa Marta - Cascais

A defesa marítima da Vila e porto de Cascais foi reforçada a partir de 1640 com a Restauração, ao temer-se que as forças castelhanas avançassem sobre Lisboa. Criou-se então um programa de defesa que implicava a construção de várias fortificações ao longo da costa. Muitas destas fortificações foram edificadas na costa Norte de Cascais durante a segunda metade do século XVII, com grande impacto na defesa da linha de costa, então muito vulnerável aos ataques da armada de Castela, mas também de piratas e saqueadores.

O Forte de Santa Marta foi erguido no local onde existia uma pequena e antiga ermida dedicada a Santa Marta, razão do seu nome. Está situado no lado direito da foz da Ribeira dos Mochos, na Ponta de Santa Marta, ou *Ponta de Salmado*, na Freguesia de Cascais (Figura 5), incluindo o farol que possui o mesmo nome.

Não se sabe ao certo a data exacta de construção deste Forte. O historiador Joaquim Boiça (Barros, *et al.* 2001) aponta como provável a segunda metade do século XVII, por existir um documento

datado de 1663 onde já existem referências ao Forte de Santa Marta. Até meados do século XVIII o Forte parece não ter sofrido qualquer alteração, sendo definido por três corpos rectangulares justapostos. As primeiras intervenções, que se têm conhecimento, terão sido efectuadas entre 1762 e 1763. Após o caos económico em que Portugal ficou mergulhado após as invasões francesas (1807-1811) e a guerra civil entre absolutistas e liberais (1832-1834) muitos dos Fortes da Costa de Cascais ficaram em mau estado de conservação, mas isto não terá acontecido com o Forte de Santa Marta, que recebeu apenas pequenas intervenções nos rebocos de paredes e madeiramentos (Barros *et al.*, 2001).

A caracterização das argamassas de reboco do Forte de Santa Marta teve como objectivo a determinação da estratigrafia das diversas camadas, composição e a compreensão dos factores que levaram a que as argamassas tenham resistido em boas condições ao longo do tempo, apesar da influência do ambiente agressivo da costa marítima.



Figura 5 – Localização do Forte e Farol de Santa Marta, em Cascais.

3.3.2 Igreja do Santíssimo Sacramento em Alcântara, Lisboa

O mosteiro do Santíssimo Sacramento, perto de Alcântara, à Rua do Sacramento em Lisboa (Figura 6), da Ordem de S. Domingos (Dominicanas), foi fundado, por escritura de doação dada em Évora, no início do século XVII, pelos condes de Vimioso D. Luís de Portugal e D. Joana de Castro e Mendonça, de acordo com o modelo da Igreja de S. Xisto em Roma (Silva Matos, R.M., 2008).

Este mosteiro, o quarto mais antigo fundado pela Ordem, foi inicialmente estabelecido em casas arrendadas entre Alfama e S. Vicente de Fora, onde Dona Joana de Castro e Mendonça, já nobre por ascendência, irmã do Conde de Basto, se recolhia. Este convento foi dos mais concorridos e procurados pela alta nobreza, que para aqui mandou o melhor dos seus elementos femininos. Ao longo da sua existência, apesar de naturais variações e algumas situações de crise ou dificuldade, o mosteiro manteve a observância. Sucessivas gerações mantiveram o espírito da fundação, num ambiente de grande austeridade.

A proclamação da República levou a nova expulsão das ordens e à definitiva secularização do edifício e da Igreja do mosteiro. O colégio foi ocupado pela Academia das Ciências de Portugal, emula moderna da sua homónima Setecentista. Fundada em 1907 por Teófilo Braga, António Cabreira e outros, com um programa ambicioso, foi oficializada em 1910 e teve larga actividade até 1918-1920. Foi nessa época que o convento passou para a propriedade do Estado, na sequência da extinção das Congregações Religiosas, ficando adstrito ao Ministério da Guerra, que desde 1916 o destinou a Depósito de Material de Aquartelamento do Exército, situação que se manteve até finais do século XX, ocupando a instituição militar os números 41 a 51 e 55 da Rua do Sacramento a Alcântara. Nos anos 20 do século XX foi aí instalado também o Comando Geral da Guarda Republicana e a Conservatória do Registo Civil de Lisboa. Mais tarde, nos anos 90, deu-se a saída dos militares e a cedência do edifício ao Ministério dos Negócios Estrangeiros, ao qual ainda hoje pertence.

Em 2007, sob a responsabilidade do Instituto de Gestão do Património Arquitectónico e Arqueológico (IGESPAR), iniciaram-se os trabalhos preparatórios do Projecto de Reabilitação e Adaptação do Convento do Sacramento (IGESPAR, 2010). O objectivo da análise das argamassas da Igreja do Sacramento visou a definição do seu estado de conservação, nomeadamente com a identificação estratigráfica dos revestimentos, a composição dos materiais usados, de modo a fornecer suporte para as obras de restauro das fachadas exteriores.

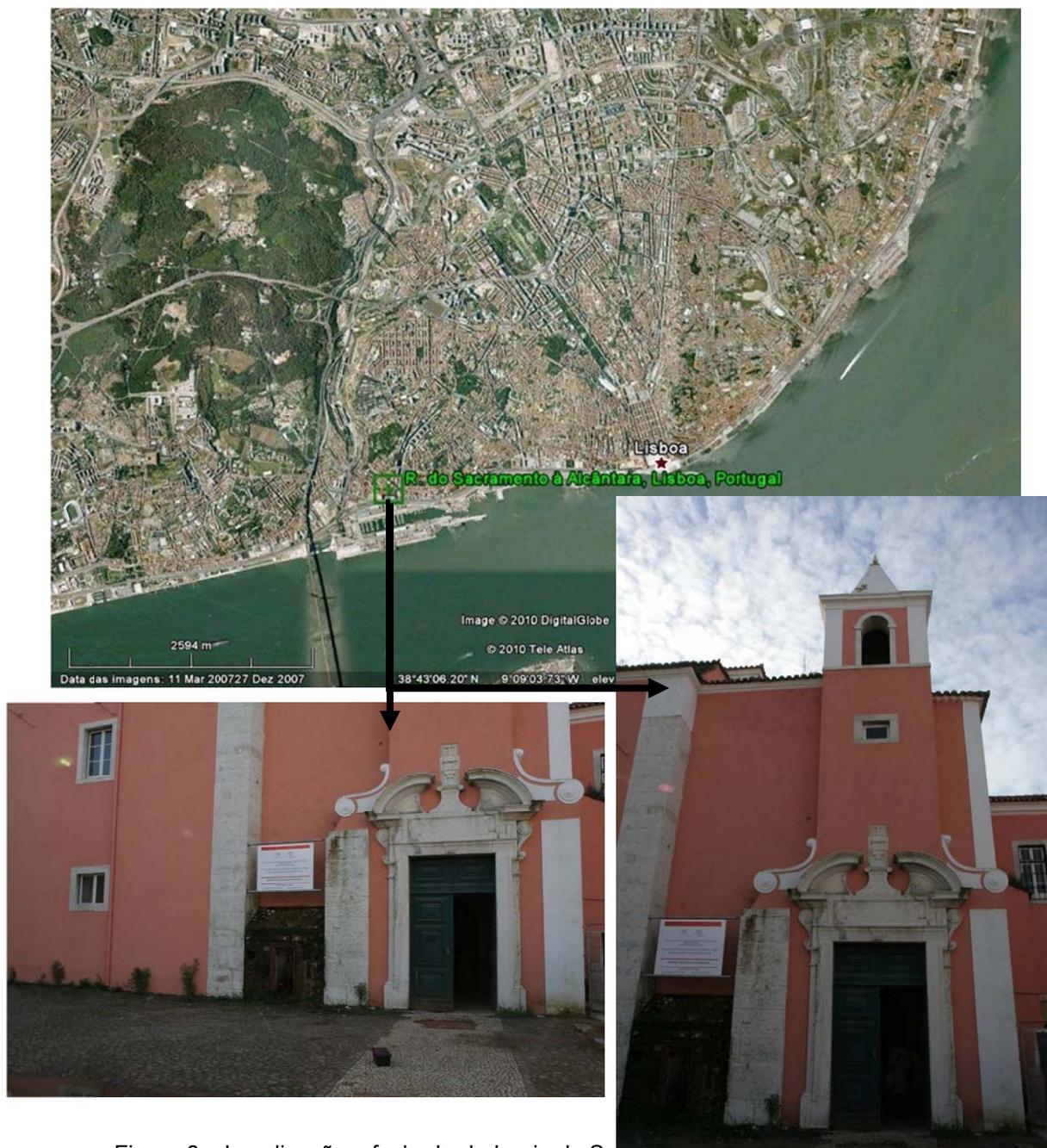


Figura 6 – Localização e fachada da Igreja do Santíssimo Sacramento em Lisboa.

3.3.3 *Villa Romana de Pisões, Beja*

A *villa* romana de Pisões, concelho de Pisões, no distrito de Beja (Figura 7), foi acidentalmente descoberta em Fevereiro de 1967, no decurso de trabalhos agrícolas, tendo as escavações arqueológicas então iniciadas revelado uma *villa* luso-romana de grande interesse. No Alentejo existem vários testemunhos arqueológicos destas estruturas agrárias romanas, as *villae*, que caracterizam um tipo de ocupação e exploração agrícola do território. As culturas principais incluíam a vinha e a oliveira, a produção de cereais e de gado, cuja produção de destinava ao abastecimento dos mercados da *Pax Julia* (Beja) ou de outras cidades do Alentejo e do Algarve, dos coutos mineiros como Vipasca (Aljustrel) e das Minas de São Domingos, ou ainda do exército.

A *villa* de Pisões (Figura 8), ocupada entre o século I a IV d.C., só se encontra parcialmente escavada, compreendendo parte significativa da *pars urbana*, com mais de quarenta divisões dispostas em torno de um peristilo. A fachada, que seria porticada, estaria virada a sul, abrindo sobre o grande tanque, *natatio*, de 40 x 8,50 m. Um corredor dá acesso ao peristilo de quatro colunas, para o qual se abrem as outras salas, uma das quais possui uma pequena abside e lago central. Os mosaicos da *villa* romana de Pisões são a sua maior riqueza plástica, com uma apreciável diversidade de painéis de excepcional importância artística. Faz parte deste núcleo o edifício termal com duas fases construtivas distintas, e cuja entrada seria efectuada através de um pátio ao ar livre que dava acesso a uma sala fechada - o *apodyterium*, e daí dirigiam-se à sala de sauna, o *laconicum*.



Figura 7 – Sítios arqueológicos da Beja romana, com a *villa* de Pisões (mapa elaborado pelo IPPAR, em *Guia a villa romana de Pisões*, Lisboa, Outubro 2000).

No concelho de Beja para além de Pisões conhecem-se outras *villae*, mas que nunca foram objecto de escavações sistemáticas. O modelo arquitectónico das *villae* centrava-se na casa do proprietário, *pars urbana*, existindo ainda habitações do criado e armazéns, *pars rustica* e *fructuaria*, sendo esta

última composta por um conjunto de lagares e celeiro, onde se procedia à transformação dos produtos da terra. A dimensão da propriedade, o *fundus*, é difícil de precisar, mas a área poderia mediar entre os 200 a 420 hectares (Borsoi, G. e Santos Silva, A., 2010).



Figura 8 – a) Panorâmica do peristílio e do lado este da villa; b) Panorâmica do lado noroeste da villa.

A caracterização de argamassas desta *villa* teve o objectivo de determinar a estratigrafia das diversas camadas, composição e o seu estado de conservação.

3.3.4 Horto e Ermida de N^a Sr^a da Conceição do Paço das Alcáçovas, Viana do Alentejo

Alcáçovas, em Viana do Alentejo – Figura 9 – é uma povoação de fundação muito antiga, estando situada sobre vestígios da via romana que ligava *Ebora Liberalitas Iulia* (Évora) a *Urbs Imperatoria Salacia* (Alcácer do Sal), derivando o seu nome da designação árabe *Al-qacabâ* para "cidade fortificada", tendo sido repovoada em 1259 por D. Martinho, Bispo de Évora, que lhe concedeu foral, antes de D. Afonso III a elevar a vila após ter sido incluída nos bens da Coroa. A sua localização no território português, assim como a adaptação, por iniciativa de D. Dinis, de um dos castelos a residência real (Paço), foram razões suficientes para que no Paço se tivessem realizado múltiplas cerimónias de assinalável envergadura e importância política e social, nomeadamente a assinatura do Tratado de Alcáçovas, em 1479, que pôs termo à guerra de sucessão da coroa castelhana. O Paço está classificado como Imóvel de Interesse Público, Decreto n.º 45/93, DR n.º 280, de 30-11-1993, fazendo parte da classificação a área ajardinada e a capela de Nossa Senhora da Conceição edificada no século XVII. A ermida/capela de Nossa Senhora da Conceição, inserida no horto do Paço das Alcáçovas que lhe é fronteiro, constituem um todo integrado estando o conjunto urbano totalmente murado. A ermida encontra-se implantada na confluência dos flancos sul e poente do horto, com o alçado lateral esquerdo e o tardo voltados para o interior do horto.

A matéria-prima, a que se recorreu ao longo dos tempos para a execução da grande maioria das obras de *embrechado*, constitui uma miríade de materiais das mais diversas composições, texturas, cores ou brilho, fabrico ou origem, geografias, formas e dimensões. Particularmente no horto do Paço das Alcáçovas e na ermida de N^a Sr.^a da Conceição, na vila do mesmo nome em Viana do Alentejo -, foram utilizados materiais cerâmicos (porcelana e faiança), vítreos (contas, canutilhos e canudos),

pétreos (rochas naturais) e conquiliológicos (conchas e búzios), empregues com recurso a argamassas de cal – Figura 10.



Figura 9 – Localização da (a) povoação de Alcáçovas e (b) do Horto e Ermida de N^a Sr.^a da Conceição.



Figura 10 – Vista do Paço das Alcáçovas e da entrada no horto; b,c) Pormenores do revestimento com embrechados das paredes na zona do horto; d,e) Pormenores do revestimento do interior da Ermida de N^a Sr.^a da Conceição.

O vocábulo *embrechado* não tem equivalência em qualquer outra língua, apenas algumas analogias que, por vezes, se confundem e adulteram a acepção de *obra de embrechado*, *embrechados*, *embrechar* ou mesmo de *embrechador*. Pode descrever-se o *trabalho de embrechado* como a técnica que consiste em cravar ou imbricar materiais diversos em argamassa fresca, no revestimento de paredes e tectos das mais variadas arquitecturas, e que conferem efeitos cenográficos e ornamentações insólitas, com características ora rudes e ingénuas, ora sofisticadas e eruditas. Os materiais utilizados eram variados, quanto à sua constituição e proveniência, assim como à sua forma, sendo utilizados incólumes ou em fragmentos, como conchas, búzios ou esponjas marinhas, contas missangas e cacos de vidro, porcelana, faiança, mosaico ou azulejo, elementos pétreos, cristais, fósseis, corais e concreções.

Estas matérias-primas, essencialmente fragmentárias, adornaram espaços sagrados ou profanos, intimamente ligados aos deleitosos ambientes de jardim; vestiram casas de fresco, fontes, cascatas, tanques, espaldares, grutas, ninfeus, nichos, conversadeiras, canteiros e alegretes e ornaram paredes e tectos de ermidas, ermitérios, ou ainda interiores palacianos. A referida acção de cravar resume-se, no essencial, ao enterrar/espetar os materiais numa camada de reboco ainda na fase fresca, permanecendo assim parte dos referidos materiais embebidos no reboco e parte fora deste, ou seja, a porção do material que permanece evidente, que confere o tratamento visual.

O objectivo do estudo foi o de conhecer o tipo de argamassa utilizada nos embrechados, sua composição e estado de conservação e proveniência dos agregados, de forma a apoiar as formulações das argamassas de restauro a serem aplicadas.

3.3.5 Argamassas do Forte da N^a Sr.^a da Luz, Cascais

A Fortaleza da N^a Sr.^a da Luz é composta pelo forte e torre fortificada, e está localizada em posição dominante na enseada de mesmo nome, na margem direita da foz do rio Tejo, em Cascais (Figura 11). Segundo inventários da antiga Direcção Geral dos Edifícios e Monumentos Nacionais (DGEMN), em cerca de 1488, D. João II manda construir a torre fortificada na ponta do Salmodo, devido aos frequentes ataques de piratas ingleses, franceses e mouros e à necessidade de tornar mais eficaz a defesa de Lisboa.

Em 1589, Filipe I manda edificar nova fortificação, contando agora com três baluartes e o restante da fortaleza. O Forte passou ainda por nova ampliação em 1650, onde a torre foi transformada em baluarte incluindo o aumento da cisterna. Estas obras de ampliação terminaram em 1675. Em 1755, as coberturas e os vários pisos da torre desabam com a acção do grande terramoto/maremoto que atingiu a região de Lisboa. Para a sua reconstrução, foram abertos mais vãos na fachada devido à grande espessura das paredes, apoiadas às muralhas quinhentistas. Em 1871, a cidadela passa por adaptações para abrigar a família real, passando a ser a residência de verão. Nesta fortaleza, morre D. Luís em 1889. Em 1963, o local passa a ser a residência de verão do então Presidente da República. Entre 1978 a 1988 a torre e a fortaleza passam por obras de carácter arqueológico. Em 1992 parte do imóvel foi afecto ao Instituto Português do Património e Arquitectónico (IPPAR), por

Decreto-lei 106F/92. Por fim, em 2004, o conjunto arquitectónico passa por nova campanha arqueológica.



Figura 11 – Forte da Nª Srª da Luz: localização e pormenor das muralhas, Cascais.

Em 2009, sob a responsabilidade Câmara Municipal de Cascais, iniciaram-se os trabalhos preparatórios do projecto de reabilitação, tendo o LNEC efectuado a caracterização das argamassas de modo a fornecer suporte para as obras de restauro dos rebocos.

4 - CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL DE AMOSTRAS DE BETÃO E DE AGREGADOS

4.1 - Estudo de caso de formação de etringite de origem interna, sem potencial de expansão

O ataque por sulfatos é o termo usado para descrever a deterioração do betão resultante da reacção química entre os aluminatos do betão, como aluminatos de cálcio hidratados da pasta de cimento portland ou alumina reactiva dos agregados, e iões de sulfato que podem provir do ambiente, ou eventualmente, de constituintes do próprio betão [Gonçalves e Reis, 1998; Fernandes, 2005].

É um fenómeno que provoca uma fissuração associada a expansão por formação de produtos de reacção no betão, de que se destaca o gesso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), a etringite (trisulfoaluminato de cálcio hidratado – $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$) e, em certas condições, a taumasite ($\text{CaSiO}_3 \cdot \text{CaCO}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 15\text{H}_2\text{O}$) (Fernandes, 2005). No entanto, as reacções entre sulfatos e a alumina do betão nem sempre são expansivas, dependendo do pH do meio. Se o pH for elevado (superior a 12) formar-se-á etringite, havendo expansão; se o pH for baixo há formação de sulfoaluminato sem que ocorra expansão, isto é, sem absorção de água, depositando-se nos poros do betão e contribuindo assim para o aumento da sua compacidade (Silva, 1996).

O ataque por sulfatos pode ser dividido em dois grupos, em função da origem do ião sulfato:

- Ataque por sulfatos de origem interna;
- Ataque por sulfatos de origem externa.

No primeiro caso, o sulfato tem origem no próprio betão a partir dos agregados ou da pasta de cimento e no segundo, o sulfato penetra no betão proveniente do solo, do *spray* marinho, das águas subterrâneas ou pluviais e da poluição.

A etringite ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$) é um mineral que cristaliza no sistema romboédrico, e que se forma no betão ou na argamassa com consumo dos aluminatos hidratados (Soares, 2006). A etringite pode ser primária, quando se forma durante o processo de cura e, desta forma, está microestruturalmente disseminada na pasta endurecida e não causa expansão. Já a etringite secundária, ou seja, a que se forma após o endurecimento da pasta, ocupa espaços vazios tais como bolhas de ar, microfissuras, interfaces pasta-agregado e microporosidade, independentemente da origem interna ou externa dos sulfatos. Ao processo formativo da etringite secundária, que potencialmente causa expansão e consequente fissuração do material, dá-se o nome de “formação de etringite retardada”, do inglês *delayed ettringite formation* (DEF).

De entre os casos estudados, o do betão da Ponte da Borralha revelou-se um exemplo típico da presença de etringite sem que tenha havido expansão por cristalização – Figuras 12 e 13. Os motivos pelos quais o processo de cristalização da etringite não causaram expansão, podem dever-se neste caso ao facto de não terem existido fontes suficientes de sulfatos, tanto externos como internos, ou por factores microestruturais, tais como o espaço de acomodação (vazios, microporosidade) ser maior do que o volume dos cristais de etringite formados. No primeiro caso, a falta da fonte de enxofre, o processo de formação cessa, já no segundo caso, havendo fonte de enxofre e condições

de cristalização, o potencial expansivo deletério é condicionado pelo falta de espaço de acomodação para os cristais de etringite, ou seja, nesse caso ainda poderá existir potencial expansivo.

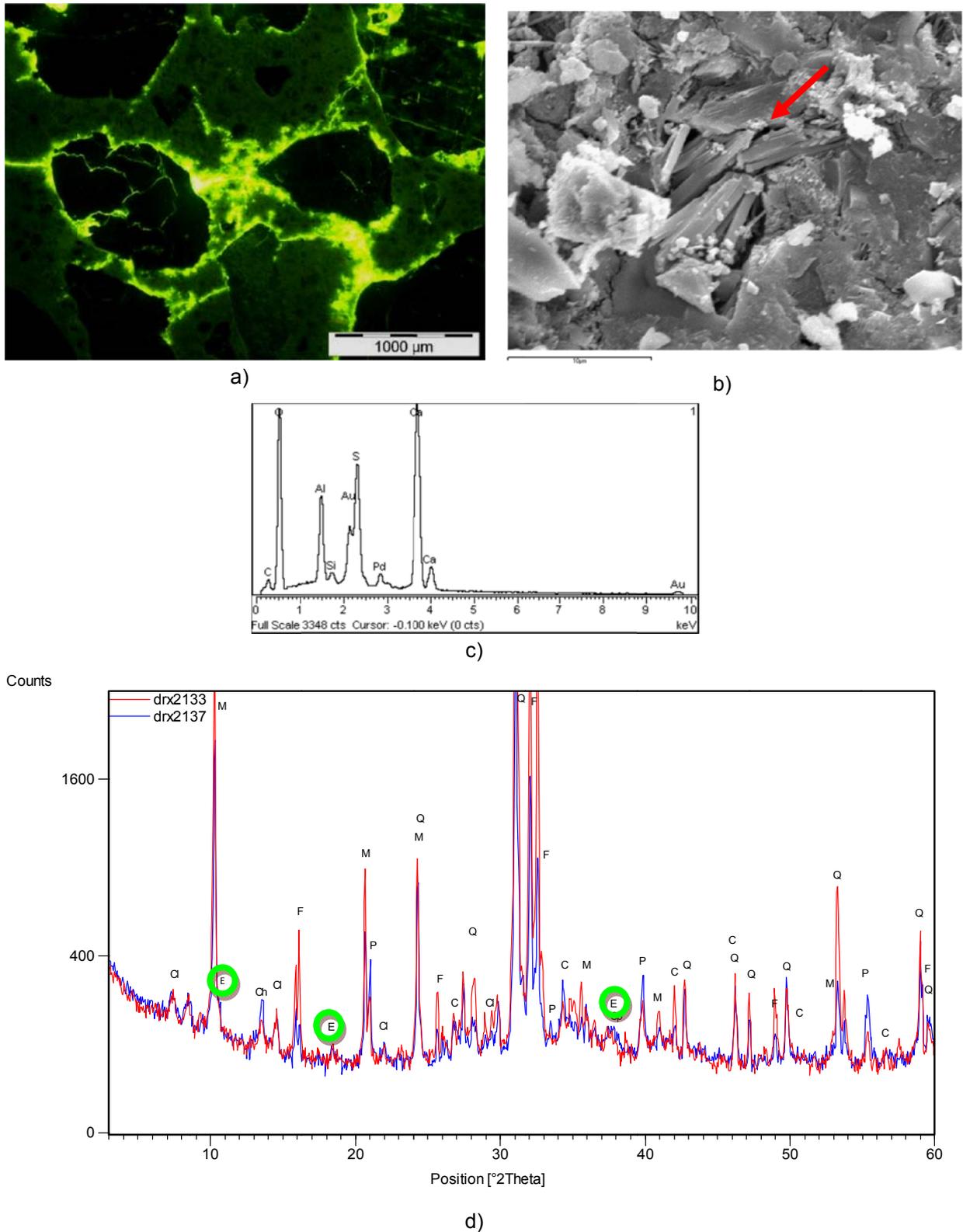


Figura 12 – Betão da Ponte da Borralha (pilar): a) Imagem de microscopia óptica com luz UV, onde é possível ver as zonas com maior incidência de vazios pelo efeito da fluorescência da fluoresceína; b) Imagem ao MEV em que são visíveis cristais aciculares de etringite nos interstícios da pasta; c) Espectro EDS da etringite; d) Difractogramas do betão que mostram a presença da etringite na amostra.

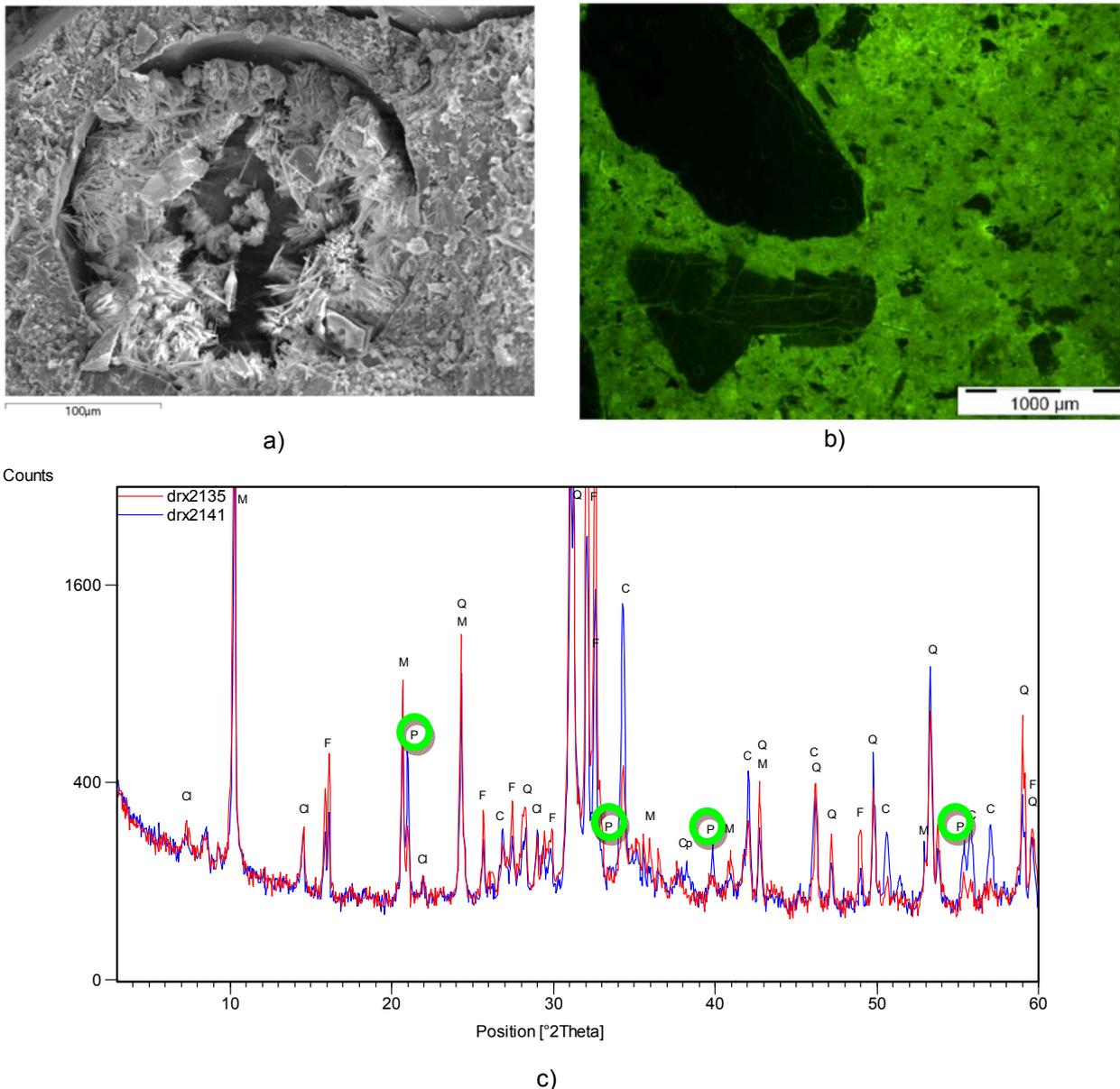


Figura 13 – Betão da Ponte da Borralha (tabuleiro): a) Imagem ao MEV que mostra cristais aciculares de etringite nos vazios de ar incorporado da pasta; b) Imagem ao microscópio petrográfico que evidencia uma pasta com elevada microporosidade; c) O difractograma da amostra não confirma a presença da etringite, porém nota-se portlandite em abundância que associada à alta microporosidade indica uma elevada razão água/cimento.

4.2 - Estudo de caso de formação de etringite e gel da reacção álcalis-sílica com expansão

No processo de cristalização, alguns minerais ou fases inorgânicas provocam expansão nos interstícios do betão, provocando microfissuras que comprometem a durabilidade e vida útil da estrutura.

Além da etringite, outro produto expansivo é o gel resultante da reacção entre os álcalis do ligante e algumas formas de sílica presentes nos agregados. Este gel de alta solubilidade corresponde a formas amorfas ou incipientemente cristalizadas de sílica. As reacções álcalis-sílica (RAS) correspondem a uma série de interacções químicas que ocorrem entre os minerais silicatados

presentes no agregado e os iões alcalinos (sódio e potássio) e hidroxilos presentes na solução intersticial da pasta de cimento. Estas reacções que são de dissolução, ocorrem em resultado da grande solubilidade que as formas amorfas, desordenadas ou mal cristalizadas de sílica apresentam em solução muito alcalina. A reacção origina um gel higroscópico alcalino que absorve água e expande, originando tensões internas no betão que provocam a sua fissuração (Santos Silva, 2005).

No caso do betão das Pontes Criz I e Criz II, detectou-se grande quantidade de geles da RAS e de etringite expansiva (Figuras 14 e 15). Nas carotes submetidas a ensaios de expansão residual (semelhante ao método ASTM C 1293) registaram-se valores elevados de expansão em algumas das zonas amostradas.

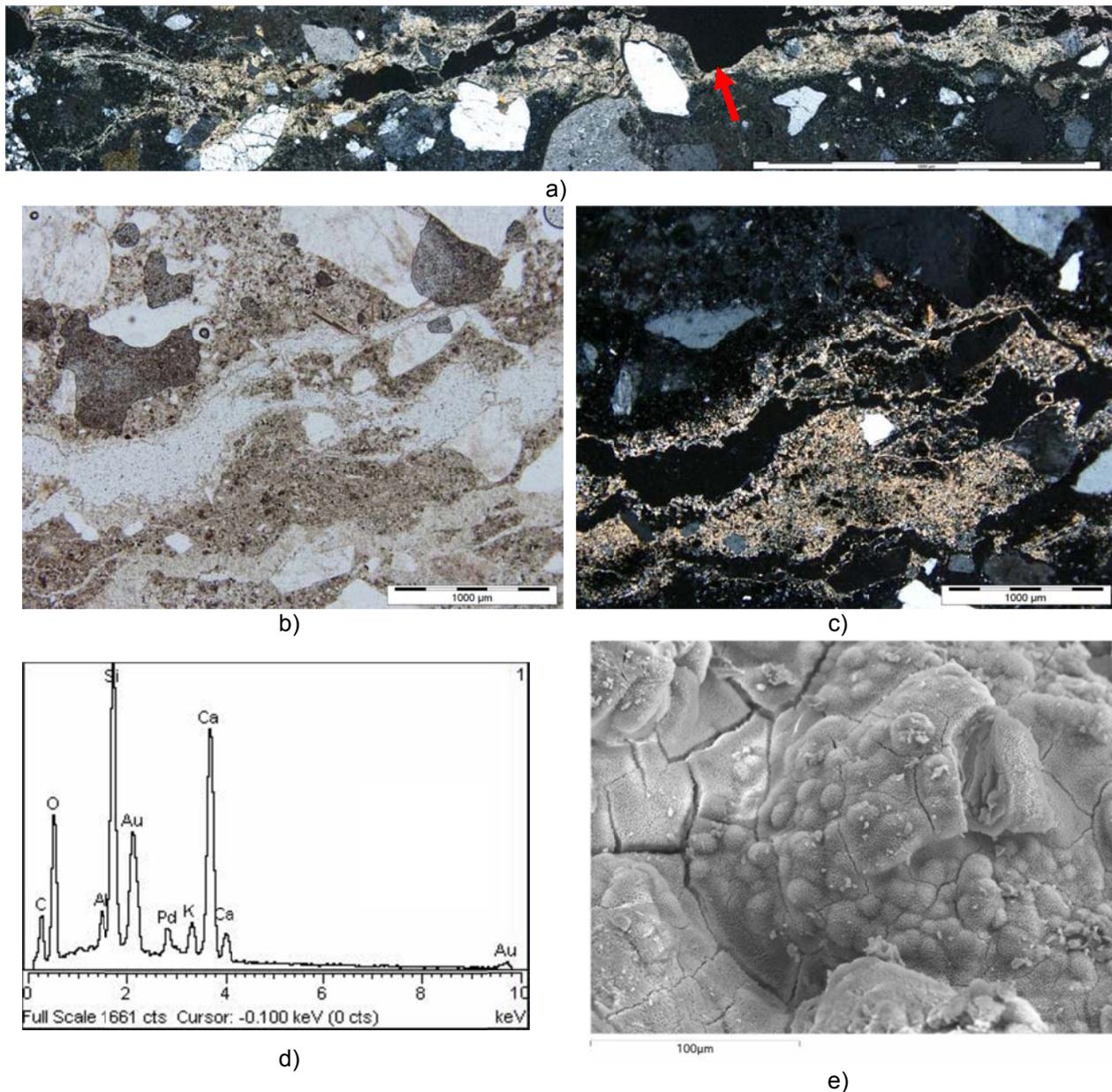


Figura 14 – Betão da Ponte CRIZ II: a) Observação por microscopia óptica que mostra microfissuras preenchidas por gel de RAS, visão panorâmica (a) e detalhes (b, c); d) Espectro EDS da composição do gel de RAS, ilustrado pela imagem (e) de textura botrioidal característica de fases amorfas neoformadas.

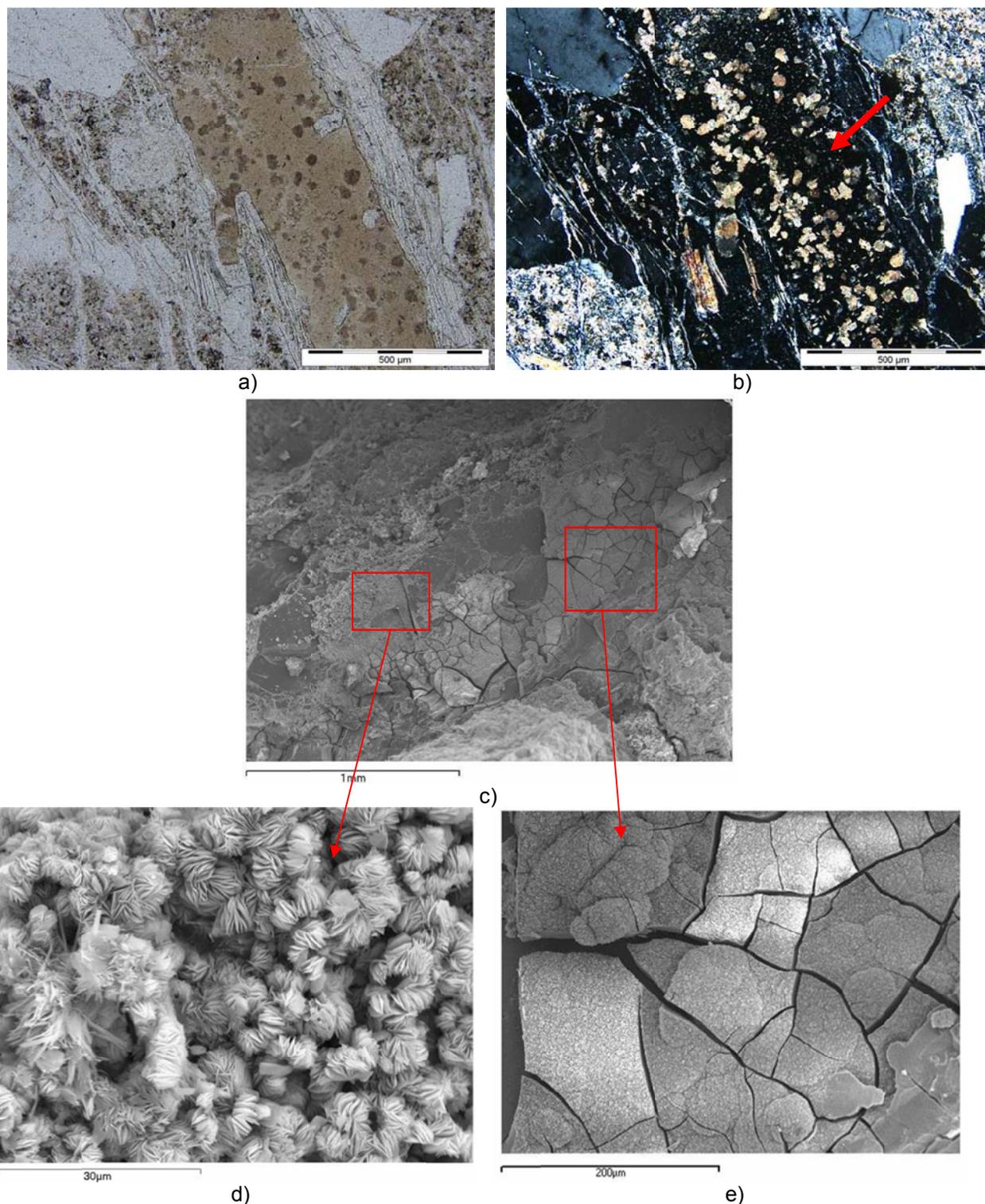


Figura 15 – Betão da Ponte Criz II: a,b) Aspecto do gel de RAS ao microscópio óptico, mostrando desenvolvimento de microfissuras em série, caracterizando a expansão por pressão de cristalização; c) Aspecto ao MEV do gel de RAS (detalhe em e) e sua componente cristalina (d).

4.3 - Estudo morfológico ao MEV de clínquer portland em amostras de betão

Com o objectivo de se avaliar eventuais diferenças no teor e morfologia do clínquer portland em amostras de betão provenientes da barragem de Fagilde, procedeu-se ao estudo morfológico por MEV (no modo de electrões retrodifundidos) de secções polidas de betão – Figura 22.

A quantificação do clínquer foi feita pela contagem dos pontos resultantes da intersecção das rectas de uma grade colocada sobre a imagem. O teor de clínquer (em percentagem) foi calculado pela razão entre a quantidade de intersecções contendo grãos de clínquer e a quantidade total de intersecções da grade. A quantidade de clínquer na amostra de betão foi obtida pela média aritmética da % de clínquer em 10 imagens. Os resultados podem ser observados no Quadro 2. As amostras que apresentaram a maior teor de clínquer são as que apresentaram os grãos de maiores dimensões.

Quadro 2 – Teor de clínquer (em %) nas amostras de betão analisadas.

Imagem nº#	Furo 2, Troço 6A	Furo 3, Troço 6A	Furo 3, troço 4C	Furo 3, troço 4A
1	20,8	22,9	41,7	10,4
2	12,5	18,8	35,4	33,3
3	22,9	18,8	12,5	25,0
4	12,5	52,1	60,4	43,8
5	16,7	47,9	20,8	29,2
6	25,0	16,7	22,9	64,6
7	12,5	25,0	25,0	33,3
8	16,7	25,0	52,1	66,7
9	12,5	14,6	39,6	22,9
10	18,8	37,5	22,9	18,8
Média	17,1	27,9	33,3	34,8

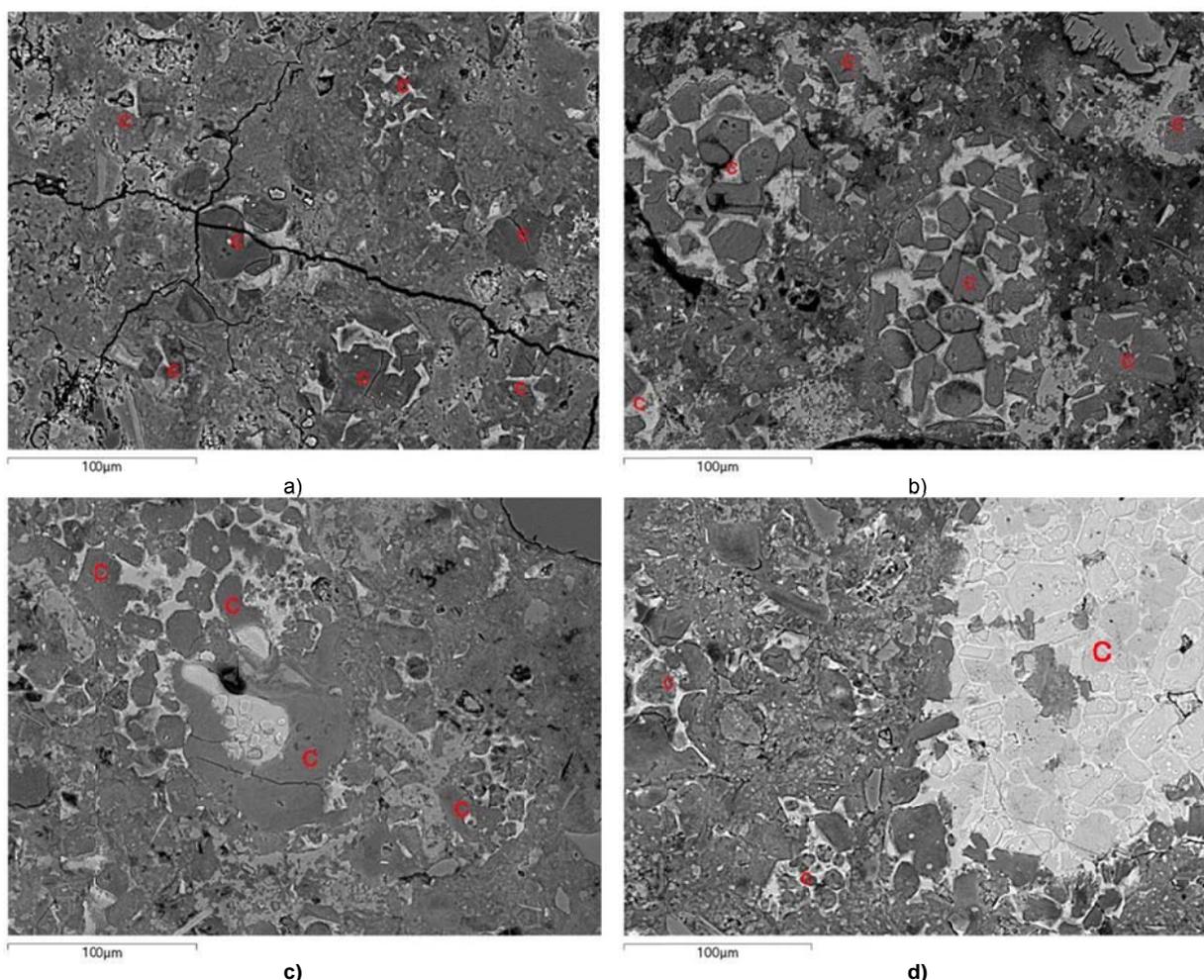


Figura 16 – Grãos de clínquer em textura “*bunch of grapes*” em diferentes amostras de betão; a) Grãos de clínquer com tamanho da ordem de 100 µm e limites bem definidos; b) Grãos de clínquer da ordem de 150 µm e limites bem definidos; c) Grãos de clínquer com tamanho da ordem de 300 µm e limites difusos; d) Grãos de clínquer que evidenciam composição diferente das amostras anteriores e com grão de dimensão superior a 300 µm e limites difusos.

4.4 - Estudo petrográfico de agregados siliciosos e carbonáticos

O projecto FCT EXREACT contemplou o estudo de diferentes métodos de ensaio para a avaliação da reactividade aos álcalis de agregados para betão. Uma das técnicas contidas neste projecto foi a avaliação microscópica das feições características em agregados rochosos e sedimentos que potencialmente contribuam para o desenvolvimento das reacções expansivas. As Figuras 16 e 18 Figura 17 ilustram feições caracterizadas em areia e as Figuras 17, 19 a 21 em rocha.

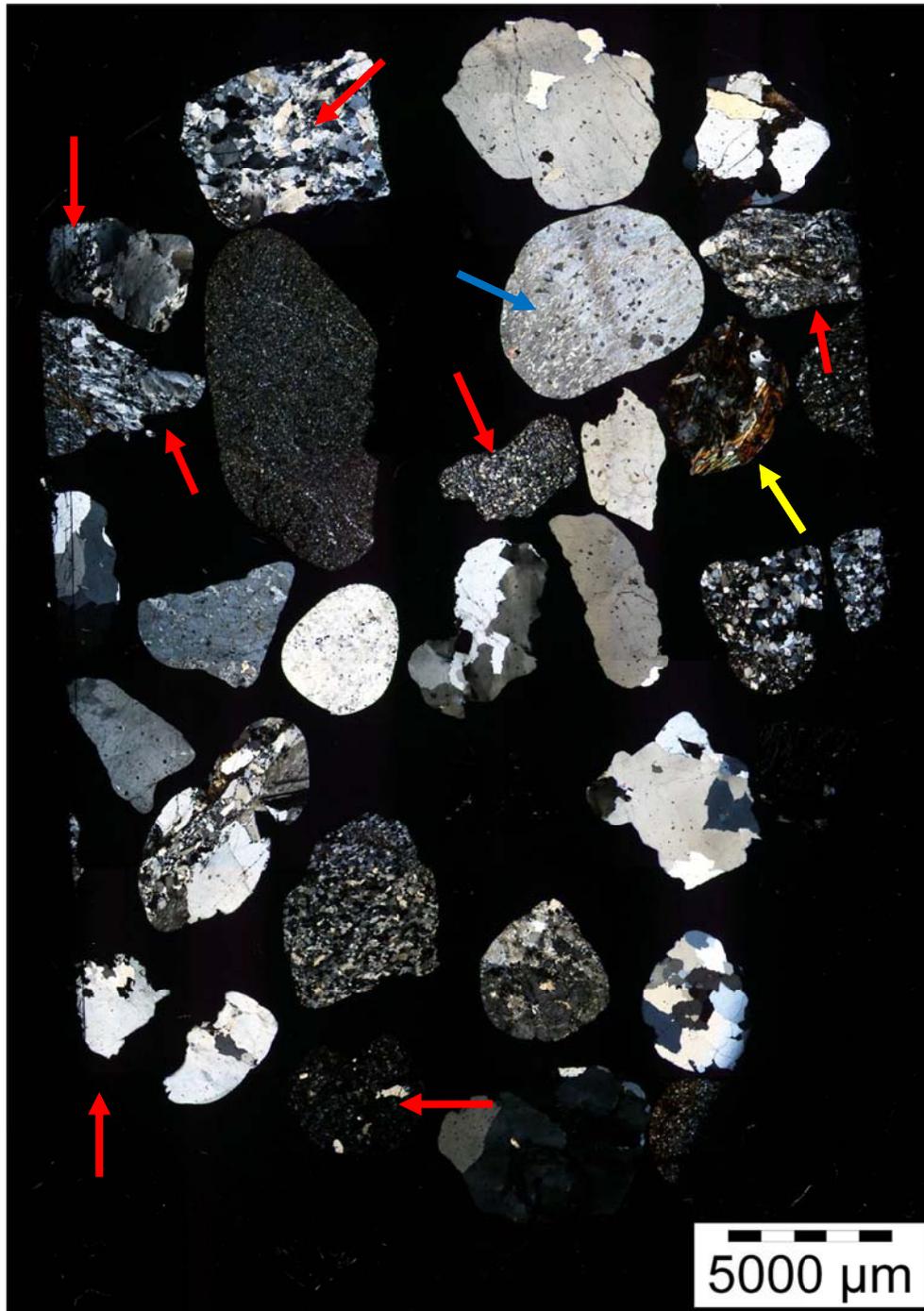


Figura 17 – Observação ao microscópio petrográfico da areia 1 classificada de reactiva por ensaios de expansão em barra de argamassa (imagem em polarizadores cruzados). Notar as feições características potencialmente reactivas indicadas pelas setas vermelhas (quartzo micro e criptocristalino), seta amarela (filossilicato alterado) e seta azul (feldspato mesopertítico).

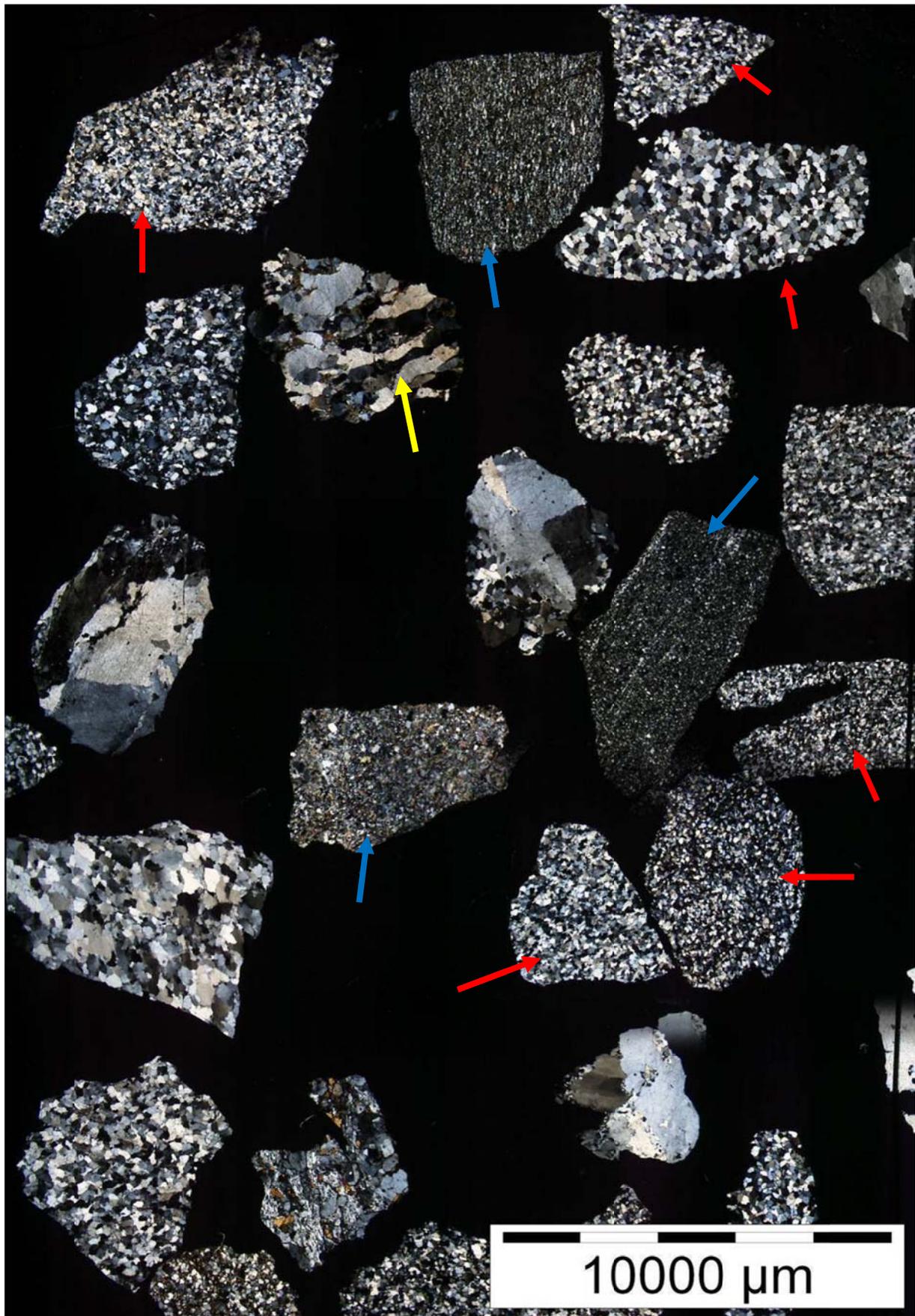


Figura 18 – Observação ao microscópio petrográfico da Brita 1 classificada de reactiva por ensaios de expansão em barra de argamassa (imagem em polarizadores cruzados). Notar as feições características potencialmente reactivas indicadas pelas setas vermelhas (quartzo micro e criptocristalino), seta amarela (quartzo deformado) e setas azuis (filito, filonito).



Figura 19 – Observação ao microscópio petrográfico da Areia 2 classificada de não reactiva por ensaios de expansão em barra de argamassa (imagem em polarizadores cruzados). Apesar da classificação de “não reactiva”, notam-se feições características de minerais potencialmente reactivos (setas vermelhas, quartzo policristalino e criptocristalino) porém em menor quantidade que nas amostras Areia 1 e Brita 1.

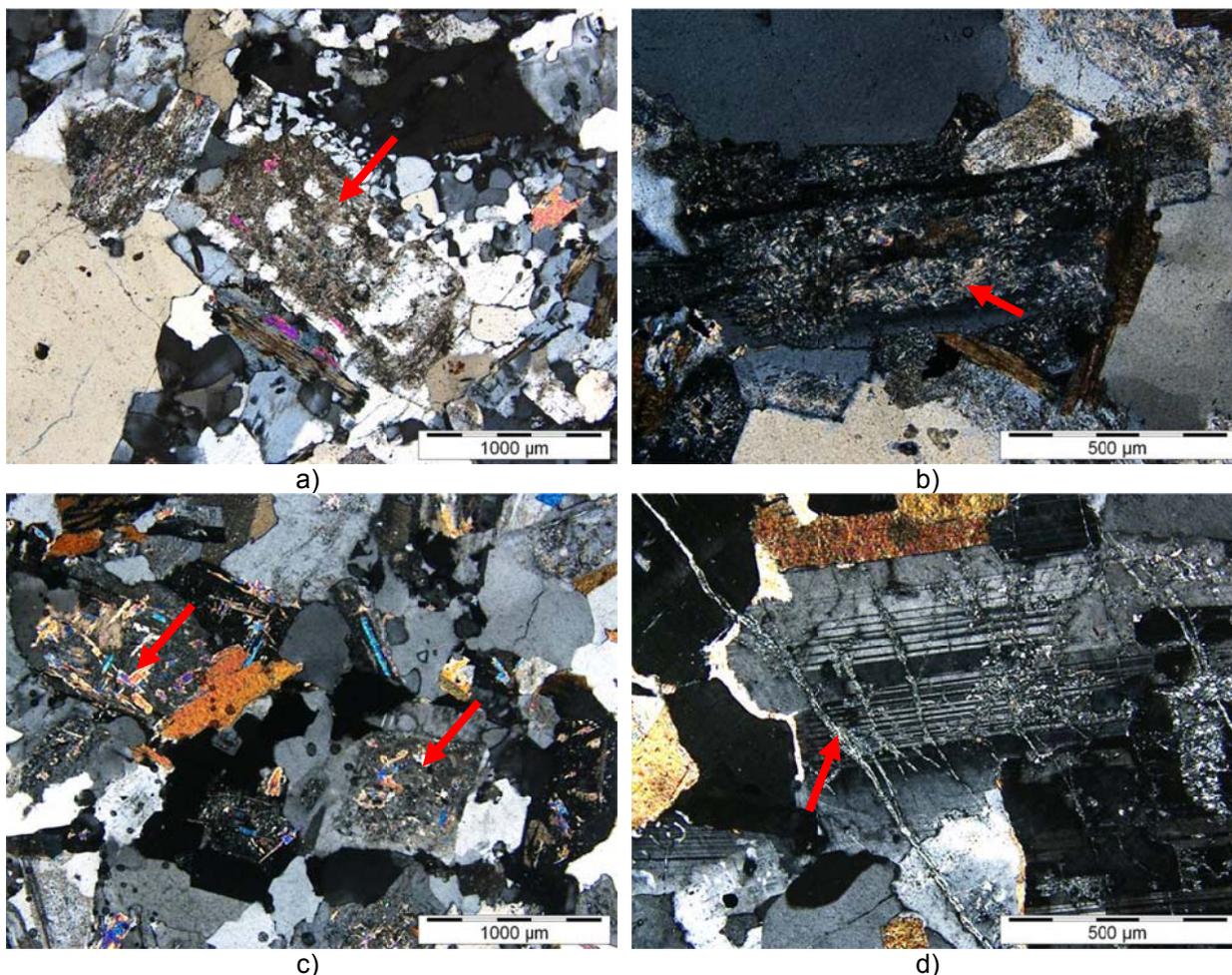


Figura 20 – Imagens ao microscópio petrográfico (polarizadores cruzados) de feições reactivas de feldspatos alterados. Amostras: Pedrassa (a), Monte das Carrascas (b), Cabeça Santa (c); Vila das Aves (d). Notam-se diversos tipos de alteração de feldspatos, alteração que incorre na abertura da estrutura cristalina do mineral, libertando os álcalis para a solução intersticial do ligante, além de produzir minerais secundários, que em grande parte são filossilicatos com elevada superfície específica; a) alteração de plagioclase em argilominerais; b) alteração de plagioclase em sericite e (c) em moscovite; d) alteração de plagioclase em argilominerais localizados em microfissuras, formando condutas facilitadoras da distribuição de minerais potencialmente reactivos.

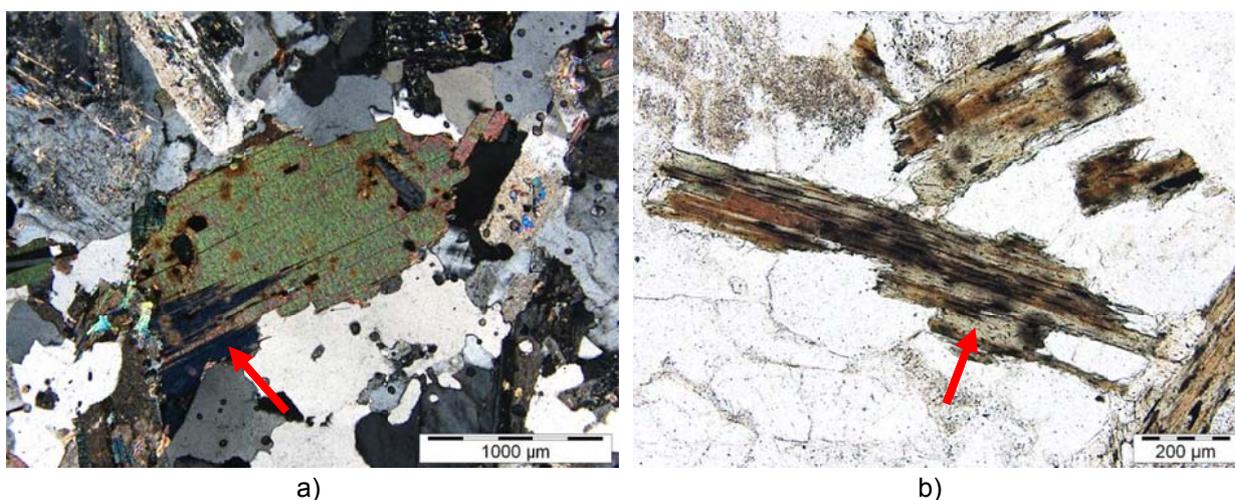


Figura 21 – Imagens ao microscópio petrográfico (polarizadores cruzados) de feições reactivas de micas alteradas. Amostras: Esporão (a), Vale do Boi (b). Nota-se a alteração de biotite em clorite, com consequente abertura da estrutura e formação secundária de clorite.

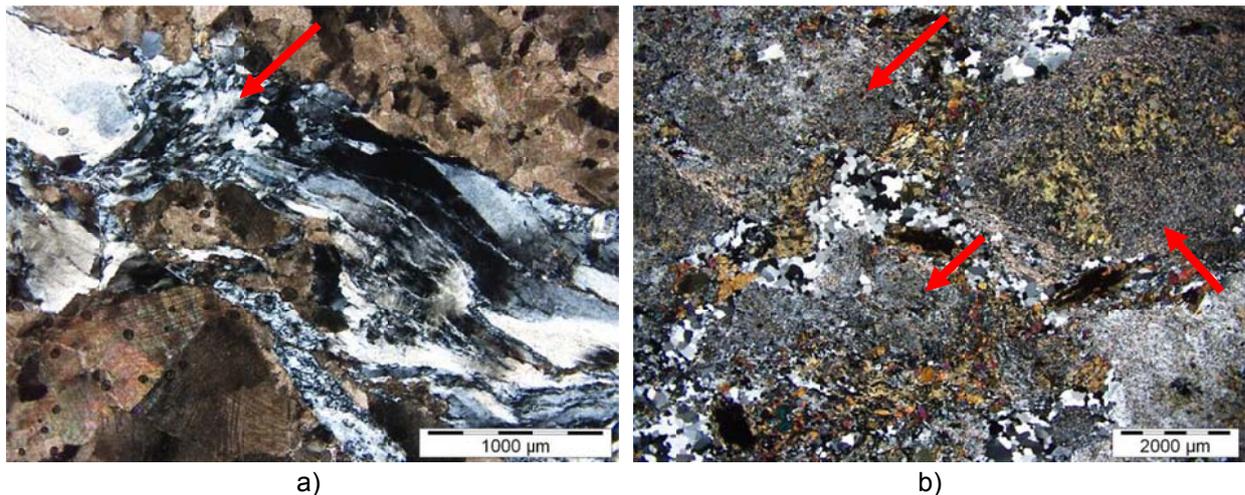


Figura 22 – Imagens ao microscópio petrográfico (polarizadores cruzados) de feições potencialmente reactivas: a) Dolomito com quartzo deformado por estiramento (metamorfismo dinâmico); b) Rocha granitóide (TD) com alteração intensa de feldspatos porfiroclásticos em epidoto e filossilicatos diversos (clorite, sericite) e quartzo intersticial.

5 - CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL DE AMOSTRAS DE ARGAMASSAS HISTÓRICAS

5.1 - Forte de Santa Marta, Cascais

As argamassas do Forte de Santa Marta evidenciaram um rigor característico nas construções com fins militares, em particular, o cuidado na escolha dos materiais e nas técnicas construtivas. Daí que, apesar do ambiente agressivo do ambiente marítimo, estas argamassas apresentavam-se em bom estado de conservação, com boa coesão e adesão entre os estratos e com o substrato.

Analisaram-se amostras correspondentes a zonas mais expostas (SM101) e menos expostas (SM 201) ao ambiente marítimo. Nas figuras 23 e 24, nota-se alguns aspectos que reflectem as diferenças entre os ambientes.

A observação petrográfica da argamassa externa evidenciou principalmente a alteração dos agregados, por reacção lenta com a pasta de cal (Figura 23 a,b), e a precipitação de fases minerais oriundas do ambiente externo, tal como halite (Figura 23 c, d) e etringite. Apesar da alteração dos agregados e a neoformação de minerais, cujos principais elementos migraram essencialmente do ambiente exterior para o interior da argamassa, nota-se que a pasta é coesa, com pouca microporosidade e poros maiores isolados, o que se traduz numa baixa capilaridade.

O tipo de porosidade da argamassa tem papel fundamental na sua durabilidade, pois os poros, mesmo se em elevada quantidade, estando isolados, tornam a argamassa pouco permeável. O tipo de poros observados na argamassa externa do Forte de Santa Marta possui esta característica, pois ocorrem como grandes cavidades irregulares ou mesmo canais com precipitação de sais, como halite e etringite. É notório que a argamassa interna, comparativamente à externa, apresenta baixa microporosidade e é mais compacta. A baixa microporosidade e maior coesão da pasta podem ter

influenciado a baixa permeabilidade da argamassa, tornando-a mais resistente à acção das agressões do ambiente externo.

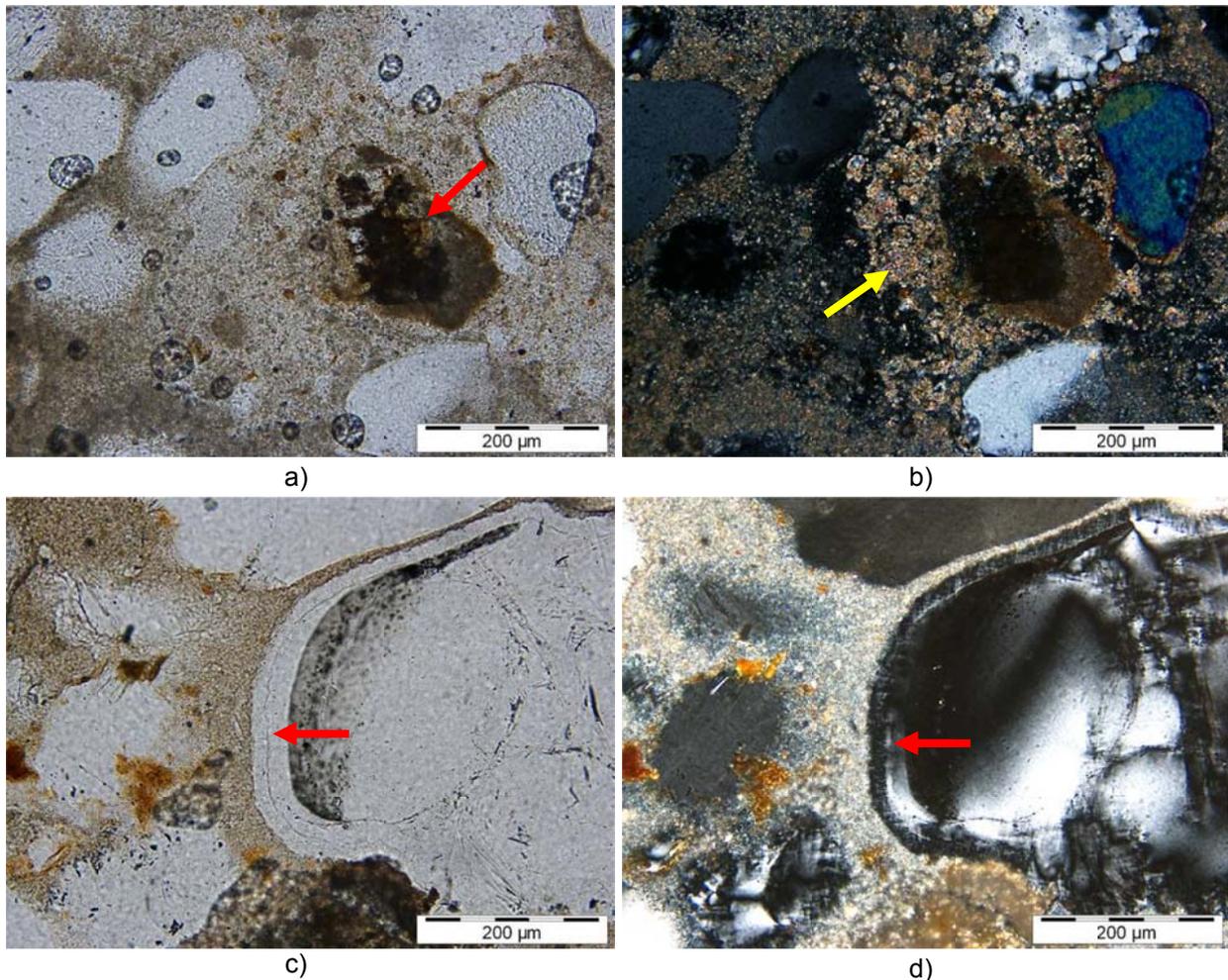


Figura 23 – Observação ao microscópio óptico de polarização da amostra da argamassa externa (SM 101) do Forte de Santa Marta. a, b) Fragmento de rocha vulcânica muito alterado por reacção com a pasta de cal (orla de reacção com cristais microesparfíticos de carbonato em b); c,d) Precipitação de halite (NaCl) em cavidades devido ao contacto directo com o *spray* marítimo. Em a) e c) polarizadores paralelos, em b) e d) polarizadores cruzados.

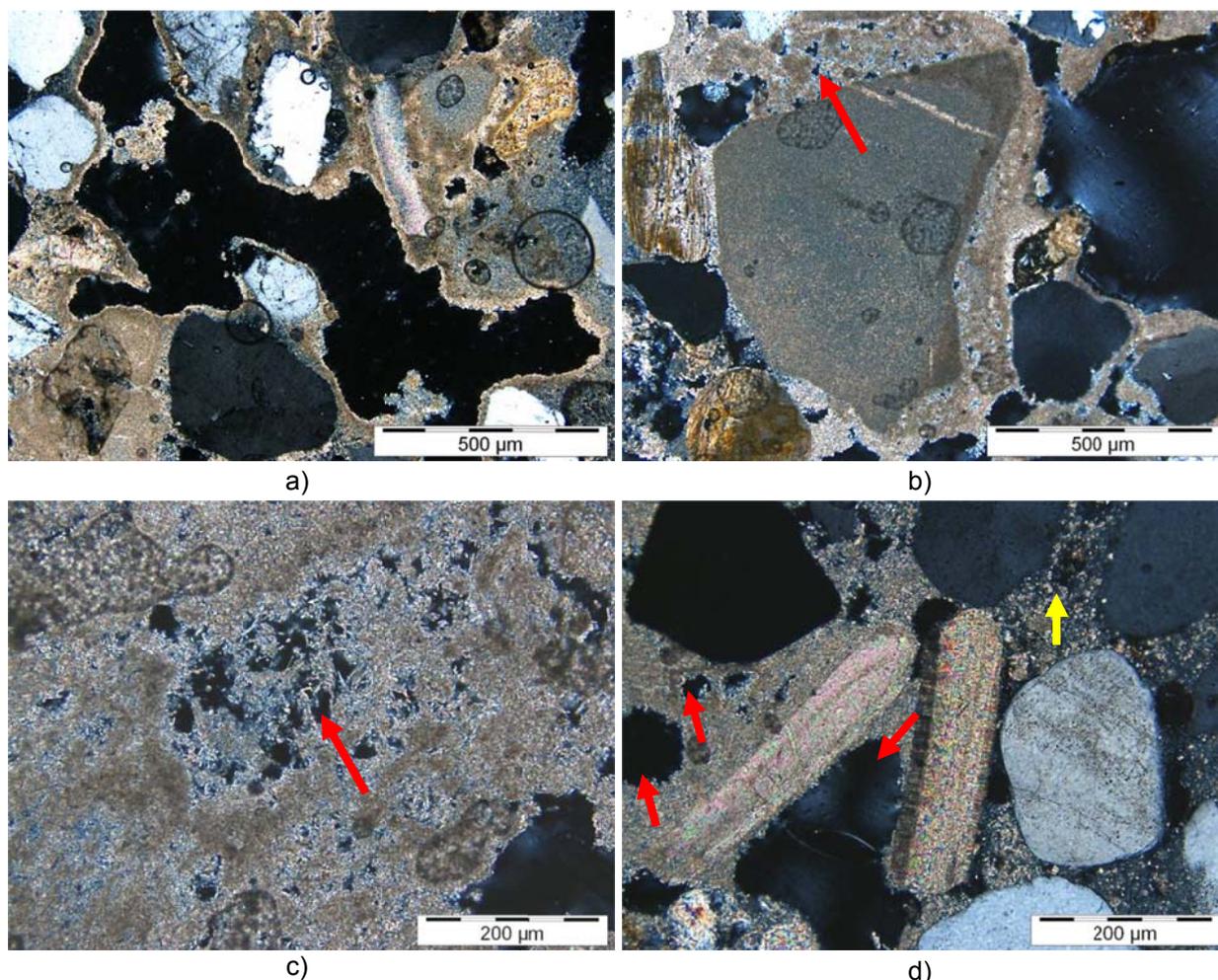


Figura 24 – Observação ao microscópio óptico de polarização da amostra da argamassa interna (SM 201) do Forte de Santa Marta (polarizadores cruzados). a) Cavidade em túnel, provavelmente por lixiviação de parte da pasta. Em b,c), nota-se microporosidade da pasta bem desenvolvida, fornecendo a característica de permeabilidade da pasta, permitindo a entrada de soluções externas e consequente precipitação de minerais neoformados, tal como etringite em c). Em d) nota-se a heterogeneidade da pasta onde as setas vermelhas indicam poros isolados e pasta coesa à esquerda, já a seta amarela indica zona da pasta com alta microporosidade.

5.2 - Igreja do Santíssimo Sacramento em Alcântara em Lisboa

Foram estudadas as argamassas de revestimento exteriores da Igreja do Santíssimo Sacramento, nomeadamente retiradas de um cumhal com exposição para Sul/nascente e de um contraforte com exposição Sul/poente – Figura 25.

As amostras do cumhal são constituídas por uma camada interna, de reboco (SE1-Int e SE 2), e uma mais externa, do tipo “marmorite”, com acabamento emoldurado (SE1-Ext e SE1-Ext moldura). A amostra do contraforte é composta por uma argamassa de reboco, e um barramento cor tijolo (SE4) - Figuras 26 e 29.



Figura 25 – Vista da fachada das traseiras, de onde foram retiradas as amostras, da Igreja do Santíssimo Sacramento em Lisboa.

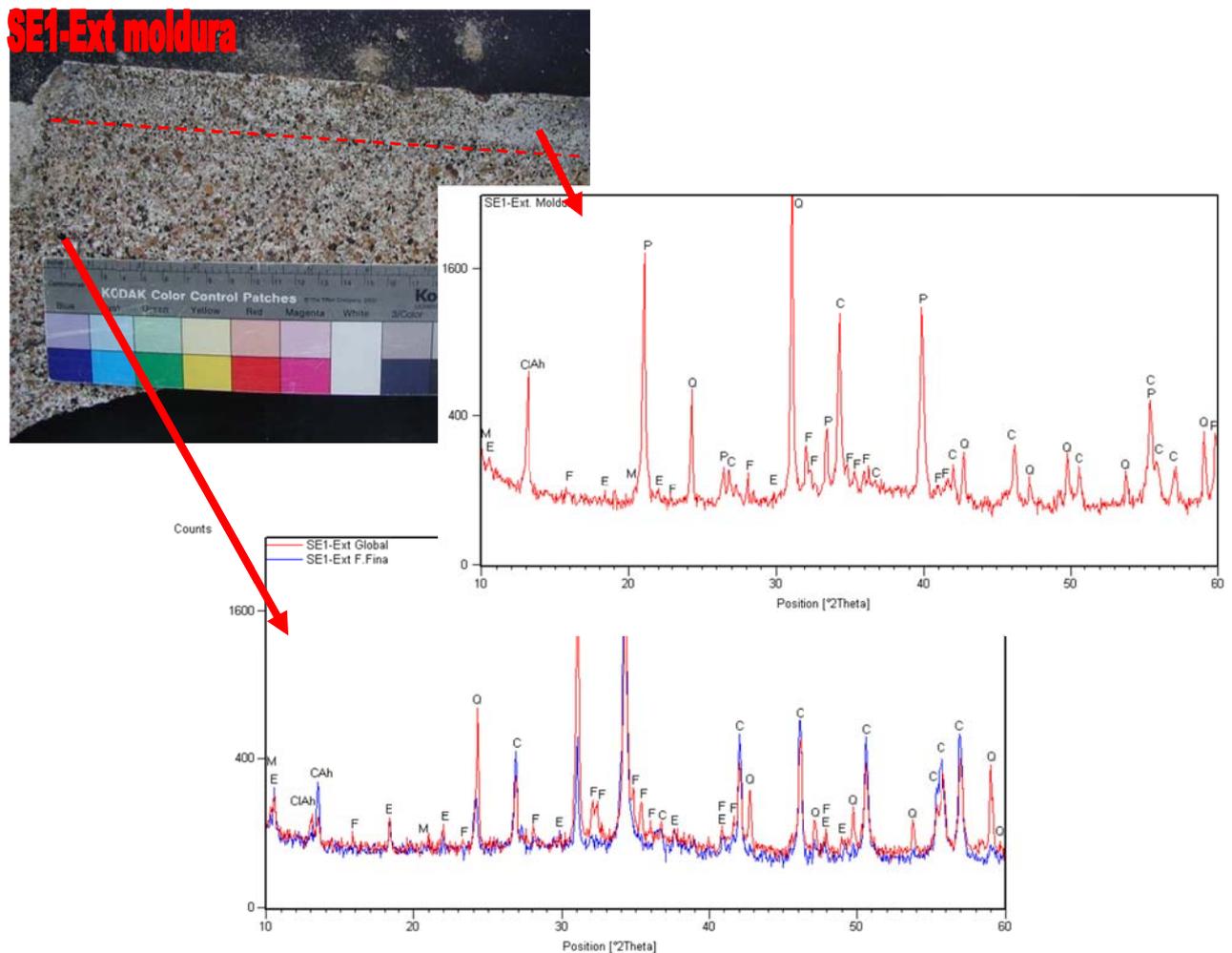


Figura 26 – Amostra SE1-Ext, argamassa de revestimento semelhante a uma marmorite. Notar a diferenciação mineralógica, indicada pelo difractograma, da área da moldura em relação à zona mais ao meio da marmorite, nomeadamente com elevada proporção de portlandite na moldura. Detectam-se também cloroaluminatos, compostos indicadores de degradação e que têm características higroscópicas. Notação: ClAh – Cloroaluminatos de cálcio hidratados; C – Calcite; P – Portlandite; CAh – Carboaluminatos de cálcio hidratados; F – Feldspatos; Q – Quartzo; P – Piroxenas; E – Etringite; M - Mica.

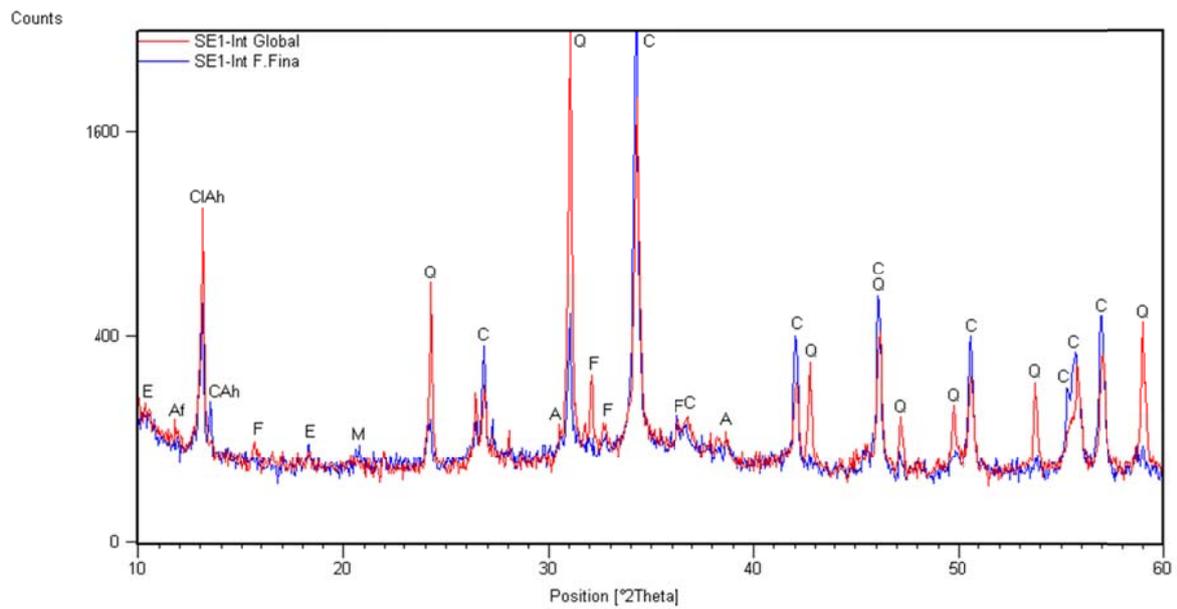
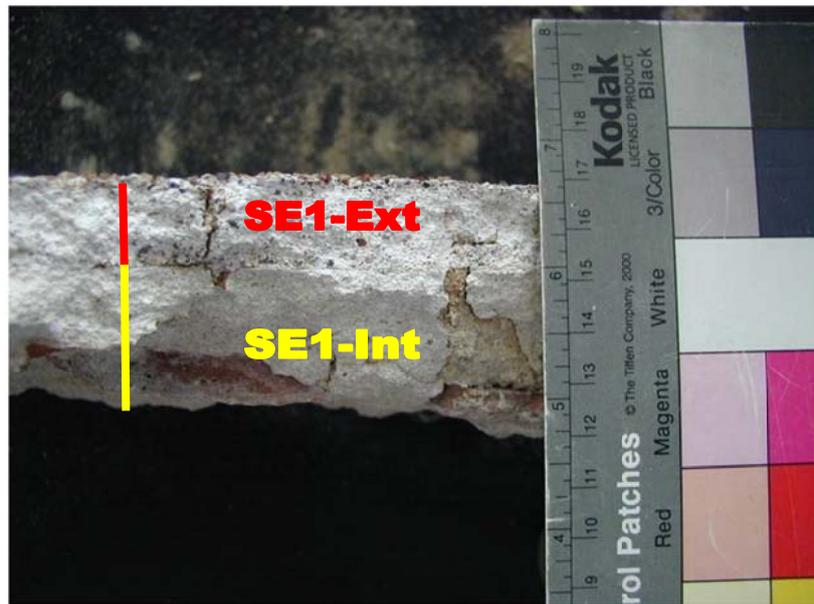


Figura 27 – Amostra SE1-Int, argamassa de reboco de cor branca. No difractograma detectam-se cloroaluminatos e etringite. Notação: CIAh – Cloroaluminatos de cálcio hidratados; C – Calcite; P – Portlandite; CAh – Carboaluminatos de cálcio hidratados; F – Feldspatos; Q – Quartzo; P – Piroxenas; E – Etringite; M – Mica; A - Anfíbolos.



Figura 28 – Amostra SE2, argamassa de reboco de cor branca. No difractograma nota-se que os produtos de alteração, tais como cloroaluminatos e etringite, não ocorrem ou estão em menor quantidade comparativamente à amostra SE1-Int. Notação: C – Calcite; F – Feldspatos; Q – Quartzo; A - Anfíbolos.

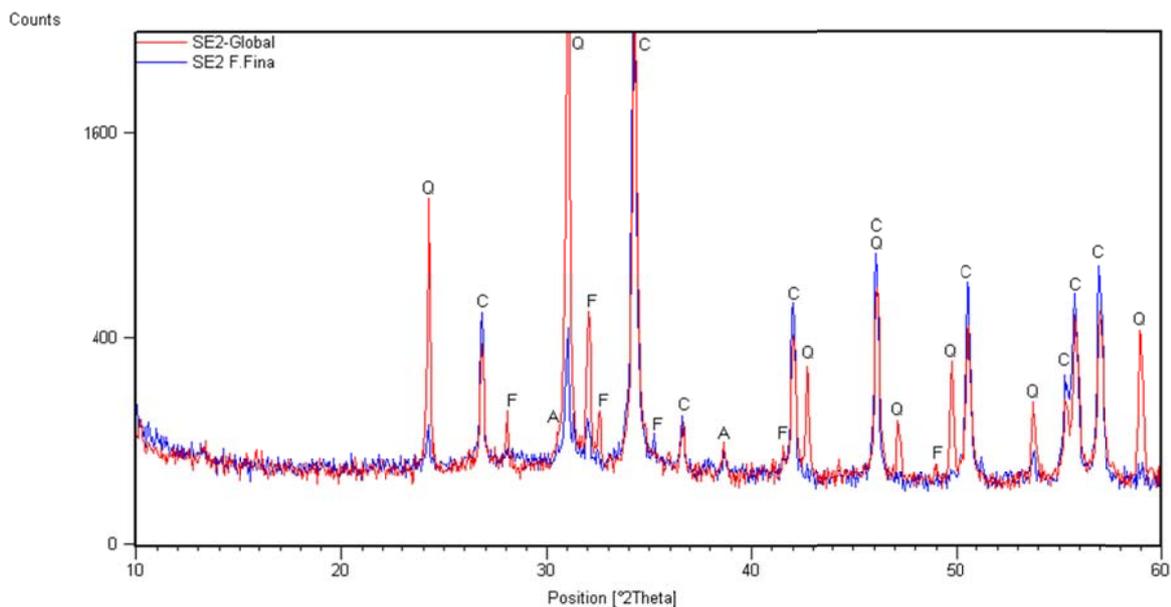




Figura 29 – Amostra SE4, argamassa de reboco e regularização de cor branca e barramento fino na cor tijolo.

Foram determinados os teores de resíduo insolúvel, sílica solúvel, sulfatos (SO_3^-), cloretos (Cl^-) e álcalis (K^+ e Na^+) das argamassas amostradas. Os resultados encontram-se no Quadro 3.

Quadro 3 – Teores de resíduo insolúvel, cloretos, sulfatos, sílica solúvel e álcalis (em %) nas argamassas externas da Igreja do Santíssimo Sacramento

Amostras	Resíduo insolúvel (RI)	Cl^-	SO_3	SiO_2 solúvel	Na_2O	K_2O
SE1-EXT 1	42,24	0,15	1,43	2,72	0,03	0,12
SE1-INT 1	37,08	1,00	0,49	3,96	0,03	0,10
SE2-1	43,41	0,01	0,15	0,55	0,04	0,27
SE 4-1	40,85	0,02	0,15	0,61	0,11	0,46

Constata-se que as amostras SE1-Ext e SE1-Int possuem os teores mais altos de sílica solúvel, normalmente um indiciador da presença de ligante hidráulico ou da alteração dos agregados siliciosos.

Verifica-se, que as amostras SE1-Ext e SE1-Int são as que apresentam os teores de cloretos e sulfatos mais elevados. Os sulfatos podem ter uma origem interna por oxidação de minerais sulfuretados no agregado ou quando o ligante é de cimento portland, ou origem externa quando sob a influência de ambiente marítimo ou poluição atmosférica. Os cloretos são habitualmente de origem externa, embora possam ser devidos ao emprego de areias de mar.

Os menores teores de álcalis foram obtidos nas amostras SE1-Ext e SE1-Int. De referir, que a origem dos álcalis nas argamassas é diversa, sendo elementos vulgares do cimento portland e de silicoaluminatos dos agregados, tais como feldspatos e micas.

A observação ao microscópio óptico da amostra SE1 sugere que na marmorite foi usada uma cal aérea, enquanto na moldura terá sido uma cal hidráulica ou uma cal aérea impermeabilizada com silicatos – Figuras 30 e 31.

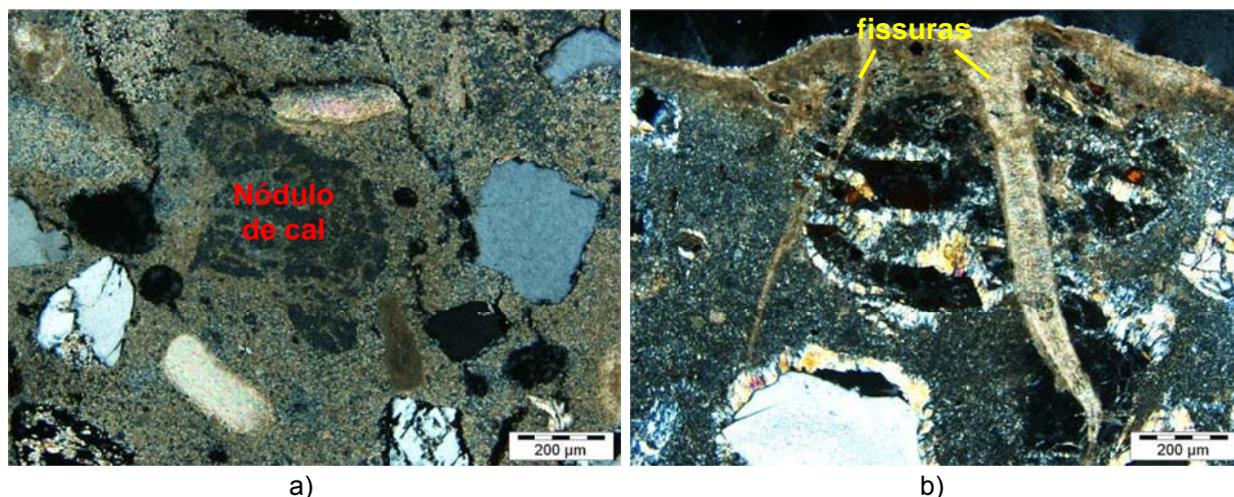
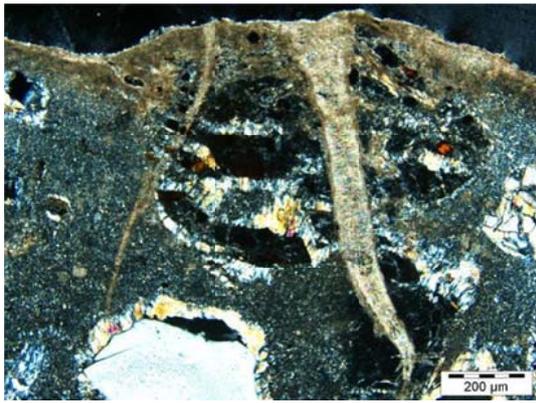


Figura 30 – Observação ao microscópio óptico de polarização (polarizadores cruzados) da amostra (a) SE1-Ext - zona central da marmorite e (b) SE1-Ext moldura. De assinalar a diferença de comportamento óptico da pasta, com carbonatação intensa em (a) e concentrada nas fissuras em (b). Na zona da moldura existem orlas de portlandite em torno dos agregados, e a pasta é mais compacta e menos nodular.

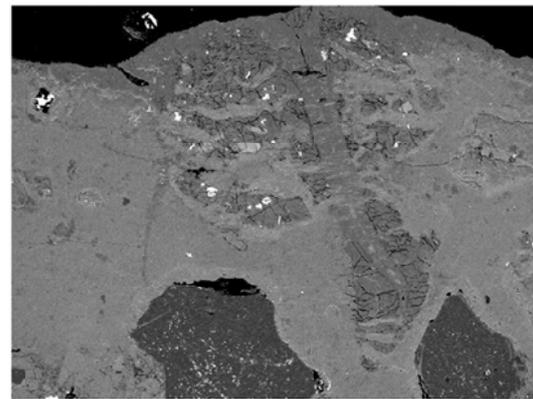
A análise elementar por EDS (Figura 31) revelou que a pasta na zona da moldura possui uma composição compatível com um ligante de cal aérea com provável adição de um composto à base de silicatos/siloxanos. Esta possível adição/impermeabilização da moldura da marmorite explica o fenómeno de não carbonatação da pasta nesta área da amostra e o alto teor de sílica solúvel obtido (Quadro 3).

Outra característica que se observou é o grau de alteração dos agregados, muitos possuem orlas de reacção com a pasta, principalmente nos feldspatos. A amostra SE1-Ext apresentou o maior grau de alteração de agregados (Figura 33), assim como o maior teor de potássio (Quadro 3), constituindo evidência de migração de álcalis dos agregados para a pasta. Nas argamassas históricas é comum encontrar minerais neoformados, quer pela reacção prolongada do agregado com a pasta, quer por ingresso de sais na argamassa.

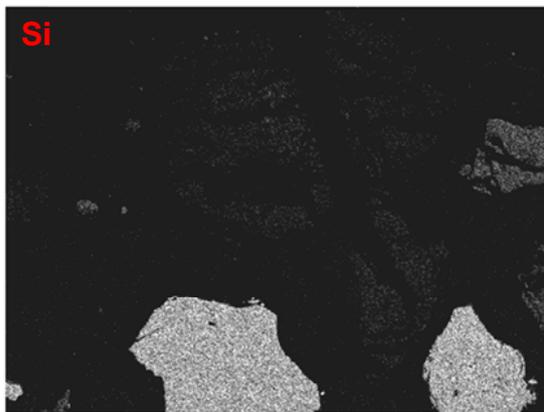
Na amostra SE1-Ext, que apresentou um alto teor de sulfatos (Quadro 3), observou-se ao microscópio uma elevada quantidade de poros preenchidos por etringite (Figura 34a e b), enquanto na amostra SE1-Int, que apresentou o teor mais elevado de cloretos (Quadro 3), se detectou a presença de poros preenchidos por halite (NaCl) (Figura 34c e d)



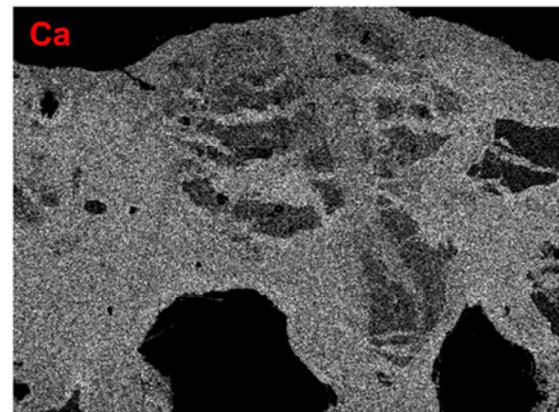
a)



b)



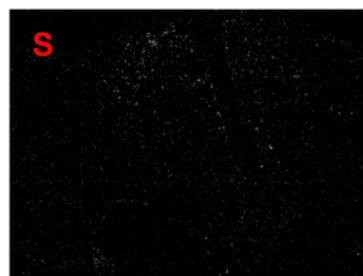
c)



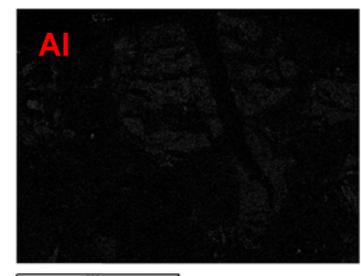
d)



e)



f)



g)

Figura 31 – Moldura na amostra SE1-Ext: a) imagem ao microscópio óptico de polarização, b) imagem ao MEV no modo de electrões retrodifundidos; c-f) Mapas de raios X.

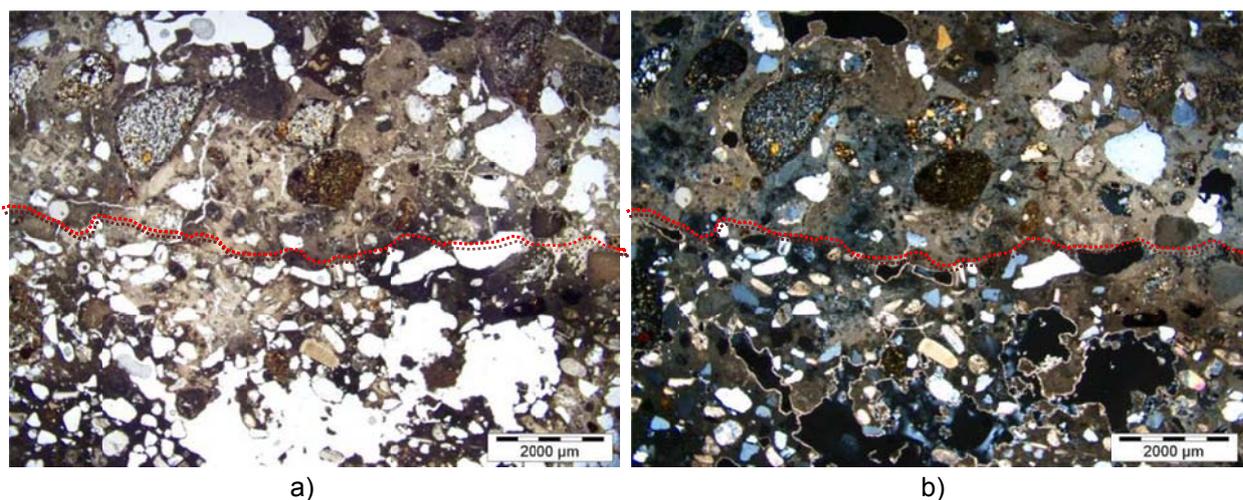


Figura 32 – Observação ao microscópio óptico de polarização do contacto (linha vermelha) entre as argamassas de revestimento tipo marmorite (SE1-Ext) e a de reboco (SE1-Int). É visível que a marmorite possui agregados mais grossos e menor porosidade que a argamassa de reboco (abaixo da linha vermelha): a) Imagem em polarizadores paralelos; b) Imagem com polarizadores cruzados.

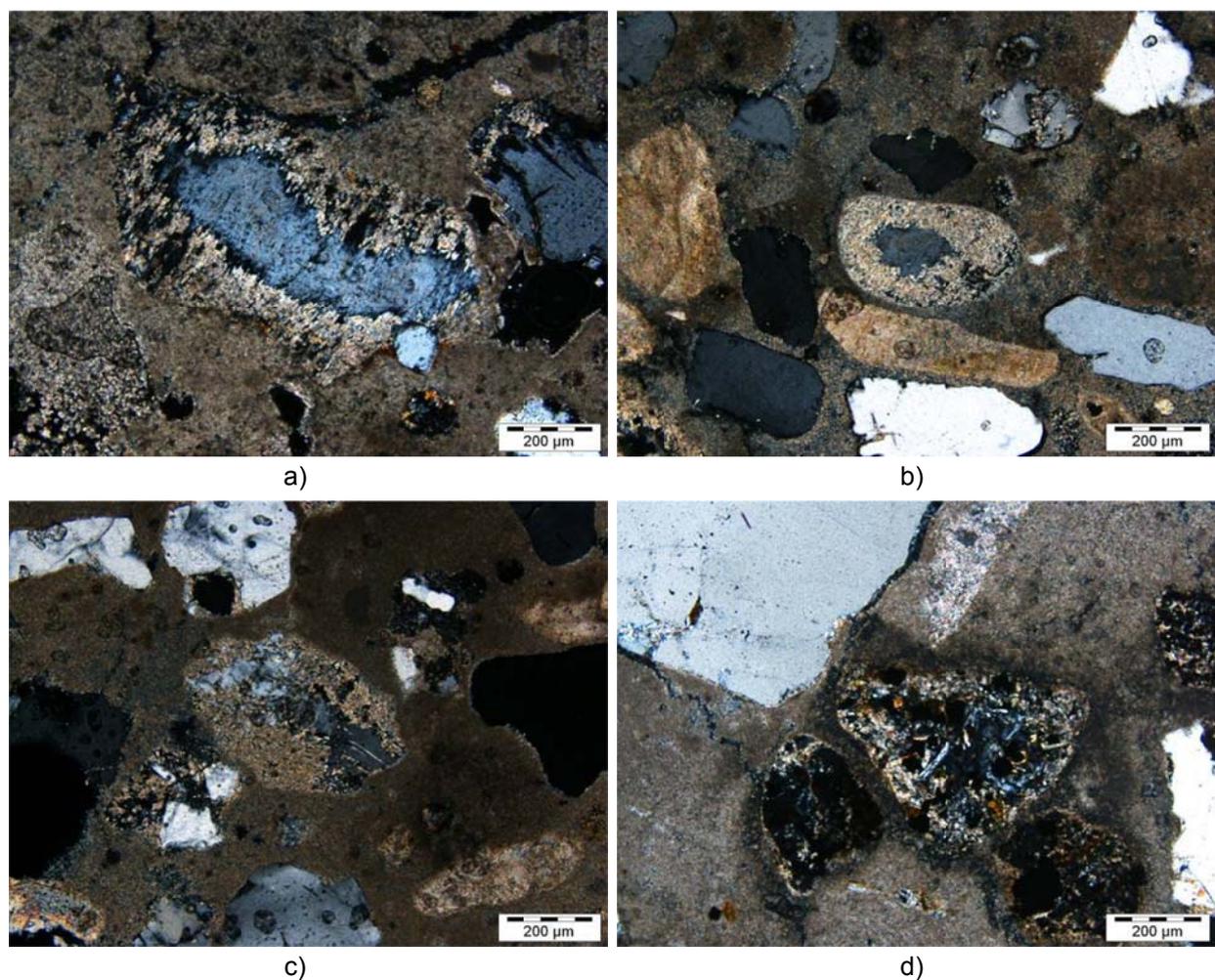


Figura 33 – Observação ao microscópio óptico de polarização (polarizadores cruzados) da amostra SE1-Ext, evidenciando a alteração de feldspatos por reacção com a pasta (centro das imagens a, b e c) e de fragmento de basalto com orla de reacção em d). As orlas de reacção apresentam composição predominantemente carbonática.

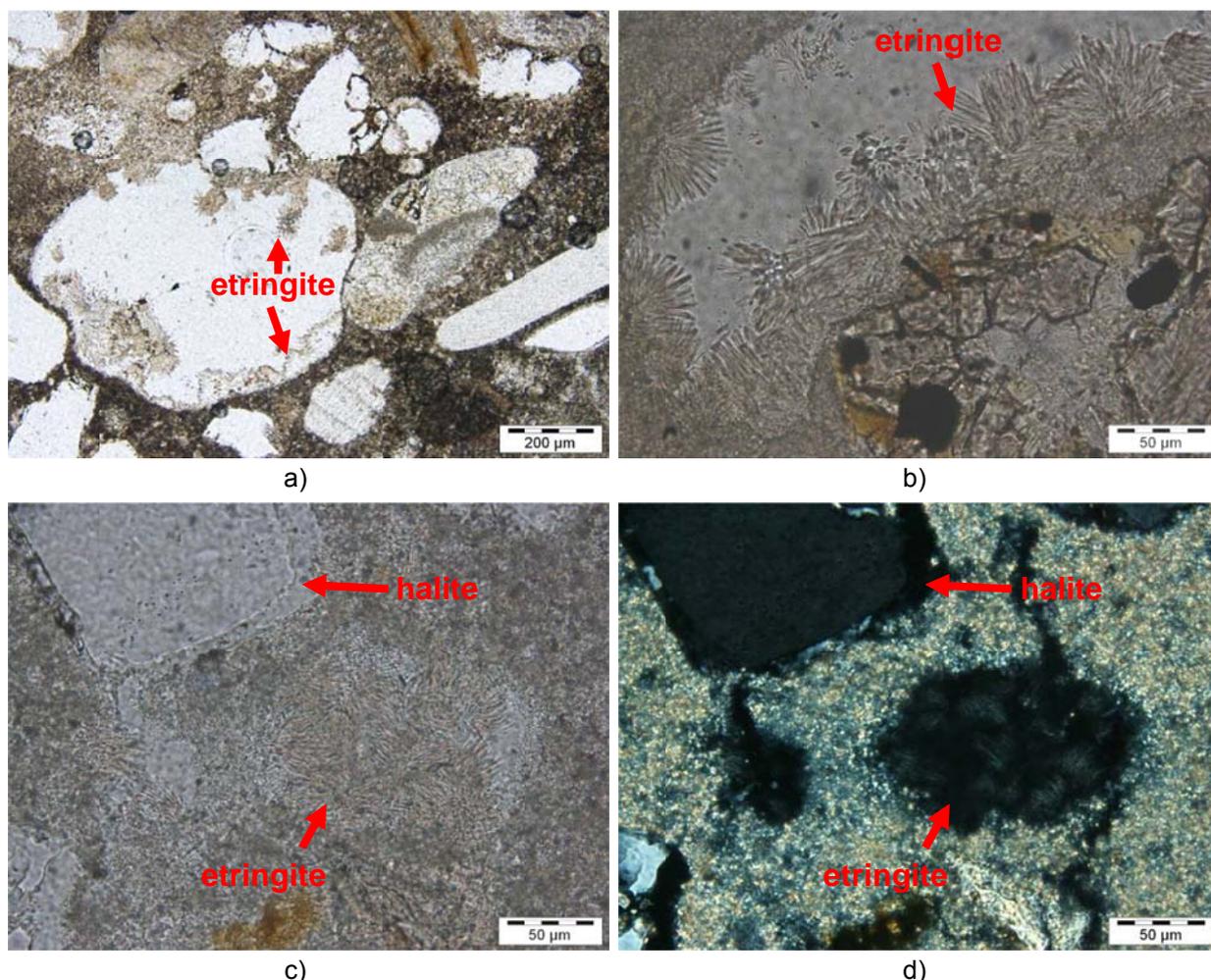


Figura 34 – Observação ao microscópio óptico de polarização evidenciando neoformação de etringite e halite em poros. Amostra SE1-Ext (a e b) e amostra SE1-Int (c e d). Polarizadores paralelos em a), b) e c) e cruzados em d).

5.3 - Villa Romana de Pisões, Beja

As argamassas da *Villa Romana de Pisões* foram retiradas de vários locais, a fim de se determinar a estratigrafia e perceber o grau de degradação/conservação dos materiais constituintes das argamassas. Para tal foram efectuadas observações de secções polidas à lupa binocular e de lâminas delgadas ao microscópio óptico de polarização.

Amostra P1 (Figura 35 e Figura 36)

Argamassa de juntas recolhida numa parede interna (parte baixa da parede virada a sudoeste, que estava completamente coberta da uma camada de terra) na sala das fornalhas do *caldarium* das termas. Apresenta um aspecto avermelhado devido à elevada inclusão de fragmentos e pó de tijolo (*cocciopesto*), além de grãos de cal de grande dimensão (que indiciam que o ligante seja de cal aérea calcítica) e alguns grãos de agregados escuros (provavelmente fragmentos de rocha granitóide) e quartzosos. A incorporação de fragmentos cerâmicos é uma característica comum às argamassas do Período Romano, particularmente nas construções que estariam em contacto permanente com a água, como cisternas, tanques, pontes, etc. A adição de fragmentos de cerâmica parece ter tido como objectivo aumentar a hidraulicidade das argamassas, tornando-as mais impermeáveis à água.

Amostra P2 (Figura 37 e Figura 38)

Argamassa de juntas, com boa resistência mecânica, recolhida numa parede externa da sala das fornalhas do *caldarium* (parede virada a nordeste, em que era visível uma espessa camada de alteração biológica na superfície externa). A argamassa apresenta uma cor clara de tom esverdeado devido à elevada presença de agregados verdes (aparentemente xisto verde). São visíveis alguns nódulos brancos de cal, que indicam ter como ligante a cal aérea calcítica, além de outros agregados mais avermelhados que parecem ser fragmentos de tijolo, e também agregados mais escuros (provavelmente fragmentos de rocha granitóide).

Amostra P3 (Figura 39 e Figura 40)

Argamassa de reboco, recolhida num muro exterior caído na proximidade do *caldarium*, de aspecto argiloso e com fraca resistência mecânica. Apresenta alguma microfissuração e são visíveis alguns nódulos brancos de cal (diâmetro < 5 mm). Os agregados são variados quanto à cor e mineralogia (quartzosos, xistosos, tijolo, etc.).

Amostra P6 (Figura 41 e Figura 42)

Argamassa de revestimento da parede externa da *natatio* (lado sul) com a superfície externa com alteração biológica. Apresenta boa resistência mecânica, superior à das amostras precedentes. Observam-se grãos brancos de cal e agregados escuros, verdes (tipo xisto verde) e vermelhos (tijolo).

Amostra P8 (Figura 43 e Figura 44)

Argamassa de reboco extraída duma parede interna do mausoléu (parede sudoeste). Apresenta um aspecto muito argiloso, com uma pasta castanha com nódulos de cal e uma grande e variada quantidade de agregados, nomeadamente de tijolo, quartzo/quartzito, xisto verde e pretos (rochas granitóides) e fragmentos de conchas. Apresenta boa resistência embora mais fraca que a da amostra P7.

Amostra PB1 (Figura 45 e Figura 46)

Argamassa de revestimento com fraca resistência mecânica retirada na parte central (lado este) da barragem situada próximo da *villa*. Apresenta agregados variados quer na cor como na dimensão, embora com predominância de agregados xistosos cinza-amarelados. A pasta é de coloração clara e aparenta ter pequenos fragmentos de tijolo disseminados. Em outras zonas do revestimento da barragem foram detectados e recolhidos alguns nódulos brancos de cal de grande dimensão (< 30 mm de diâmetro), que sugerem que a pasta de cal foi aplicada mal dispersa no agregado, o que pode justificar a sua fraca resistência mecânica.



Figura 35 – Aspectos da observação macroscópica da amostra P1

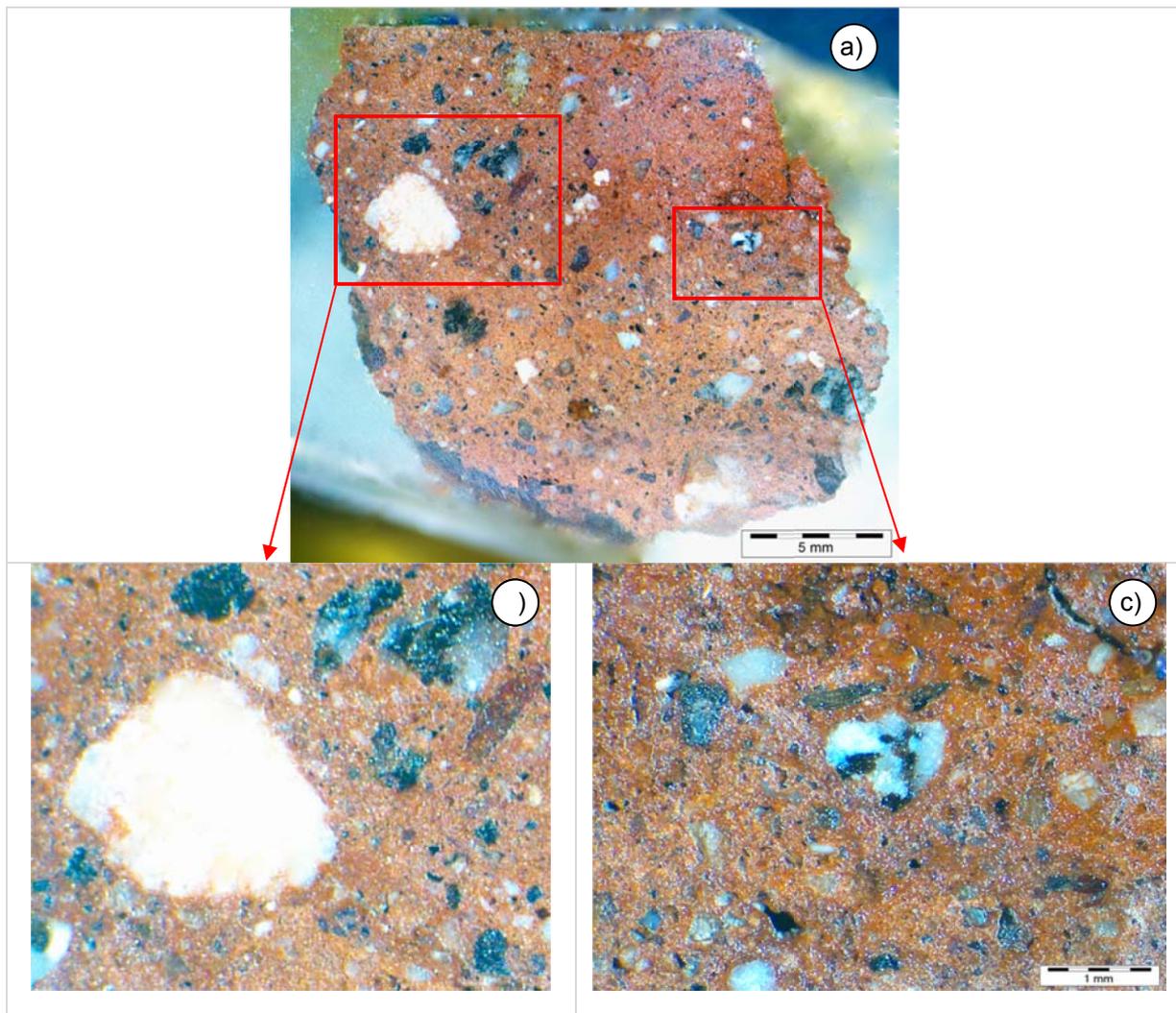


Figura 36 – Observação estratigráfica da amostra de revestimento P1 à lupa binocular: a) Aspecto geral; b),c) Pormenores das zonas assinaladas na imagem (a) onde são visíveis os agregados escuros e os nódulos de cal.



Figura 37 – Aspectos da observação macroscópica da amostra P2

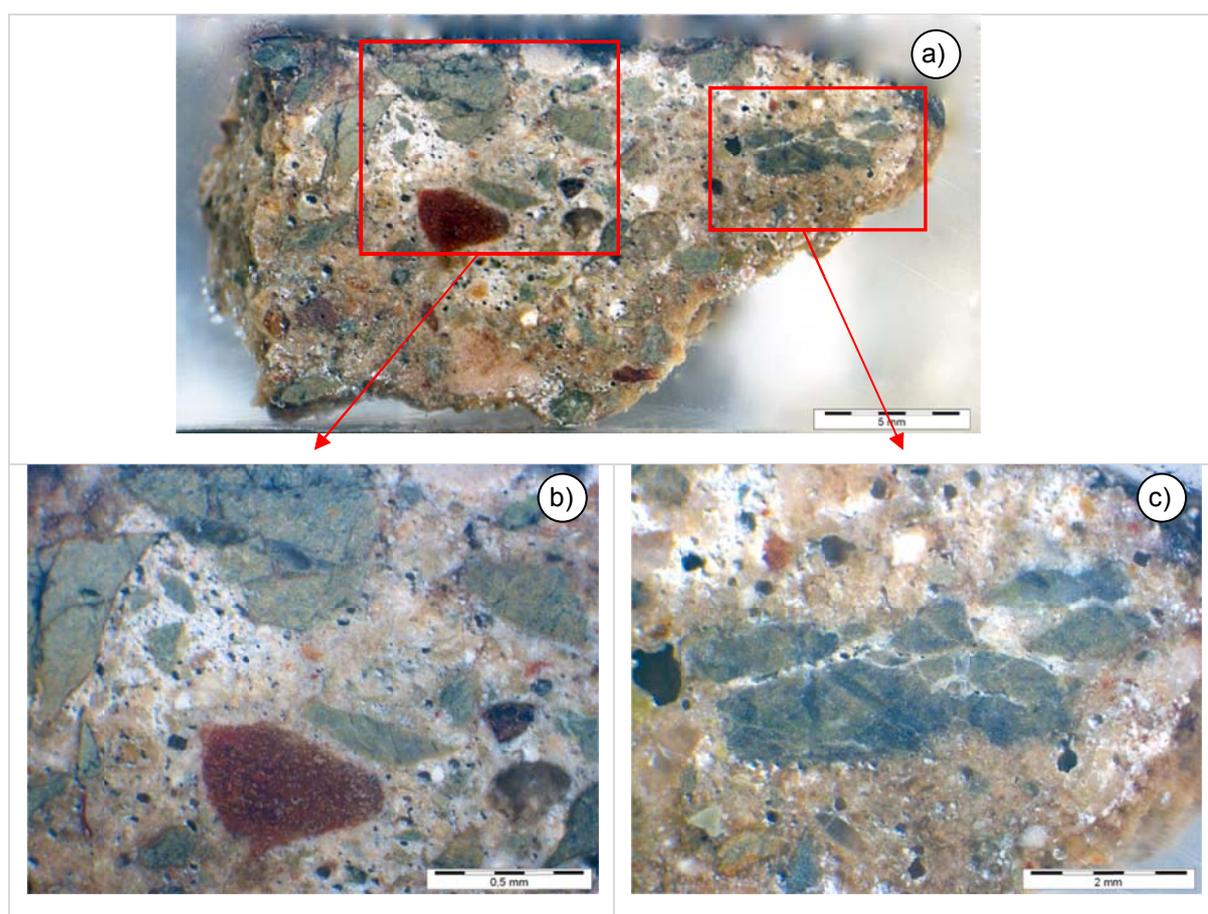


Figura 38 – Observação estratigráfica da amostra de revestimento P2 à lupa binocular a) Aspecto geral; b), c) Pormenores da zona assinalada na imagem (a) onde são visíveis os agregados verdes e vermelhos.

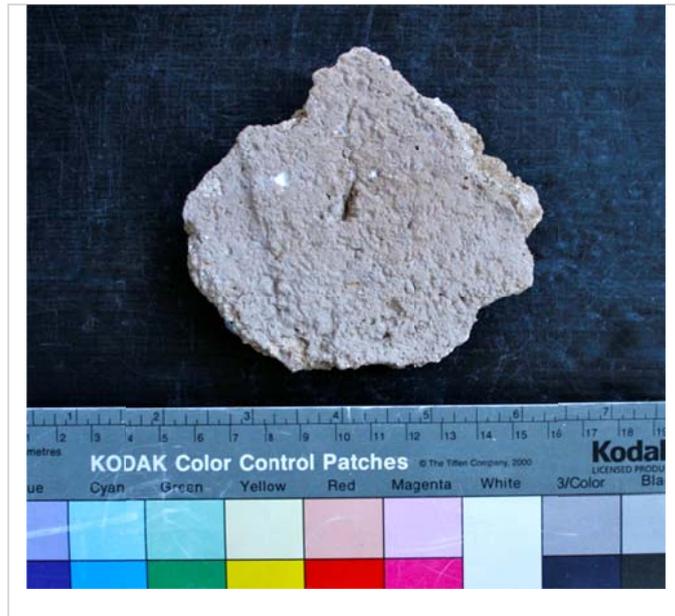


Figura 39 – Aspectos da observação macroscópica da amostra de P3

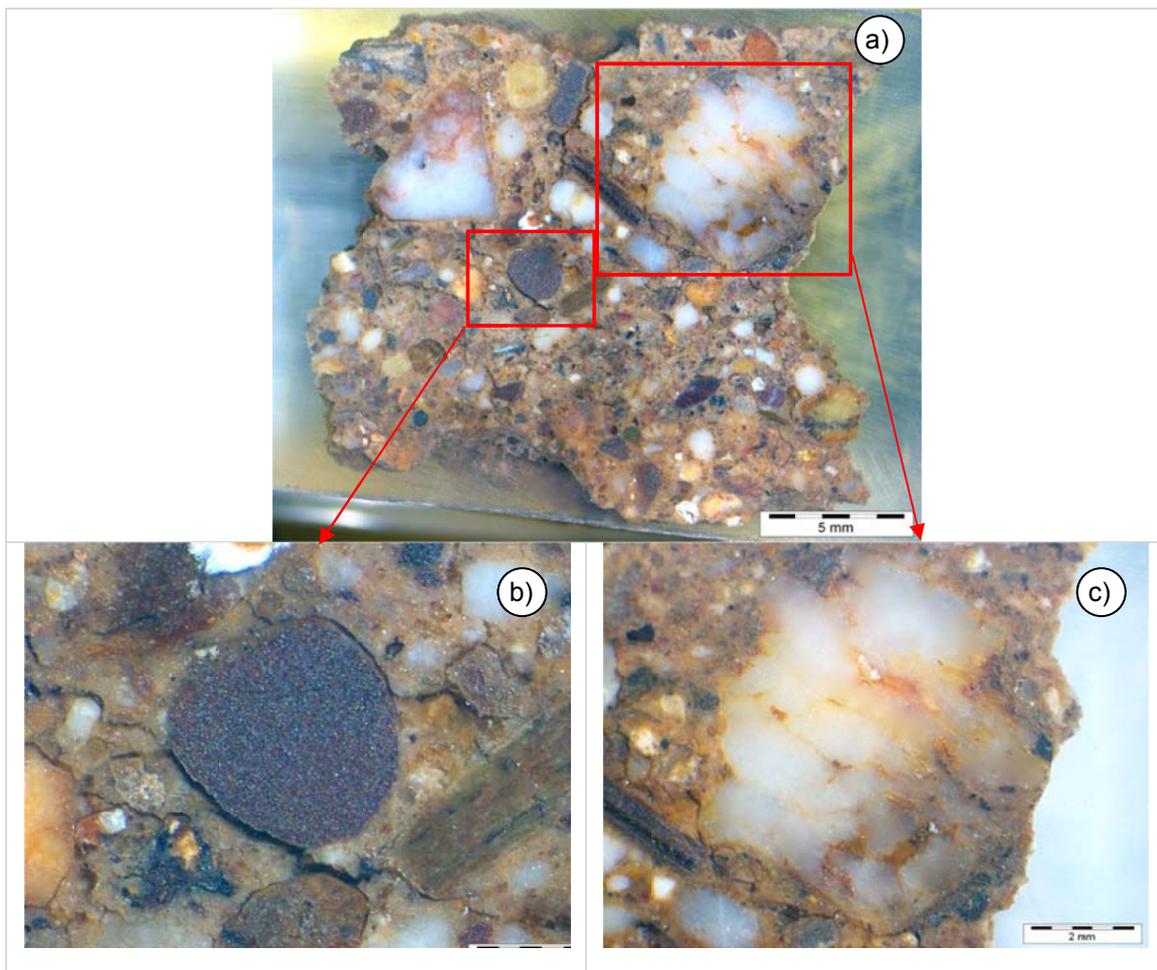


Figura 40 – Observação estratigráfica da amostra de revestimento P3 à lupa binocular: a) Aspecto geral; b),c) Pormenores da zona assinalada na imagem (a) onde é visível um agregado rolado escuro (b) e um agregado silicioso do tipo quartzito (c).

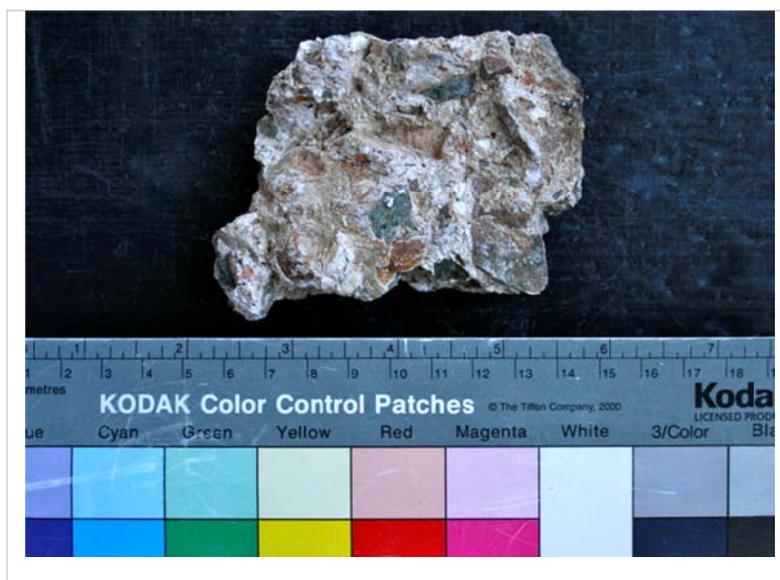


Figura 41 – Aspectos da observação macroscópica da amostra de P6.

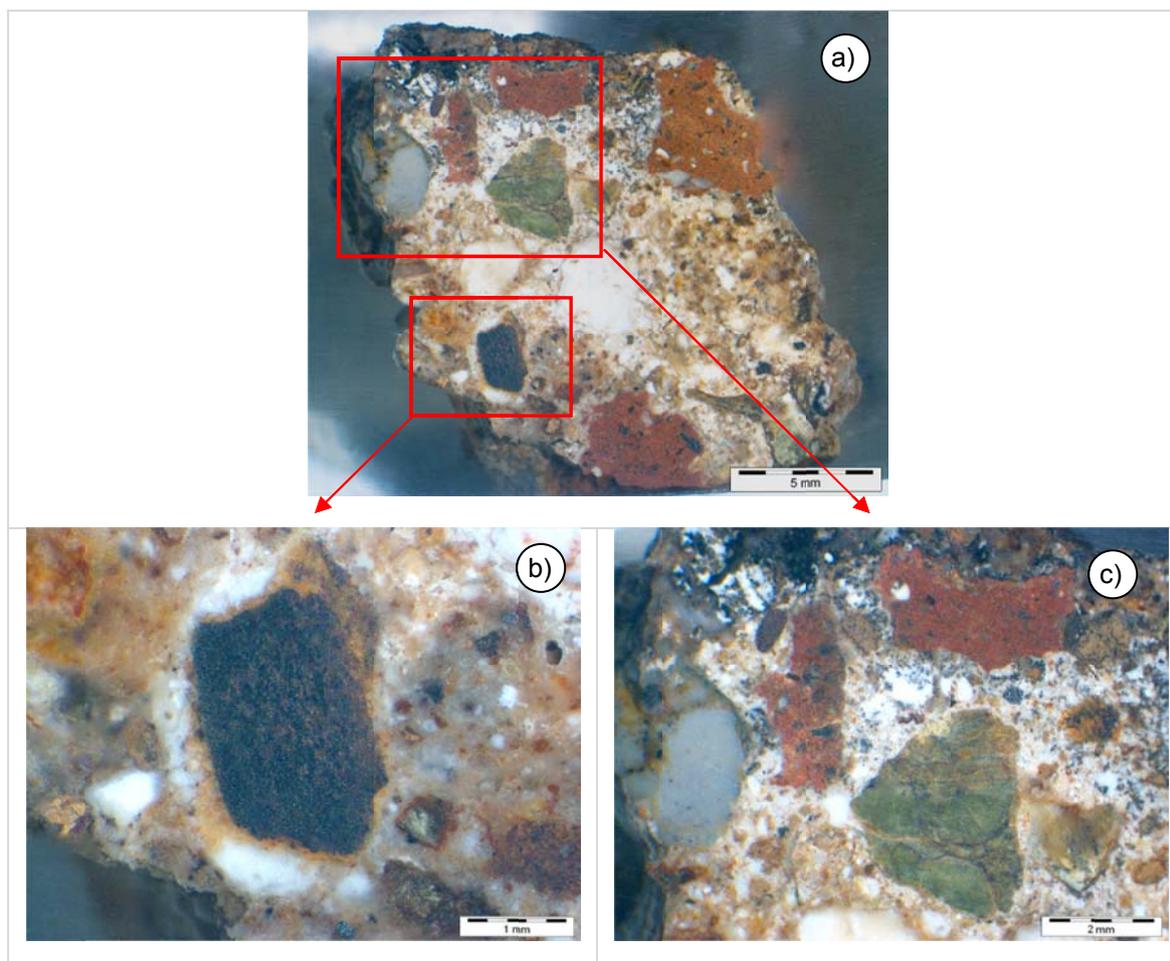


Figura 42 – Observação estratigráfica da amostra de revestimento P6 à lupa binocular: a) Aspecto geral; b) Pormenor da zona assinalada na imagem (a) onde é visível um agregado escuro com uma orla de reacção acastanhada; c) Pormenor onde são visíveis agregados vermelhos (tijolo), verdes (tipo xisto) e claros (quartzo).



Figura 43 – Aspectos da observação macroscópica da amostra de P8.

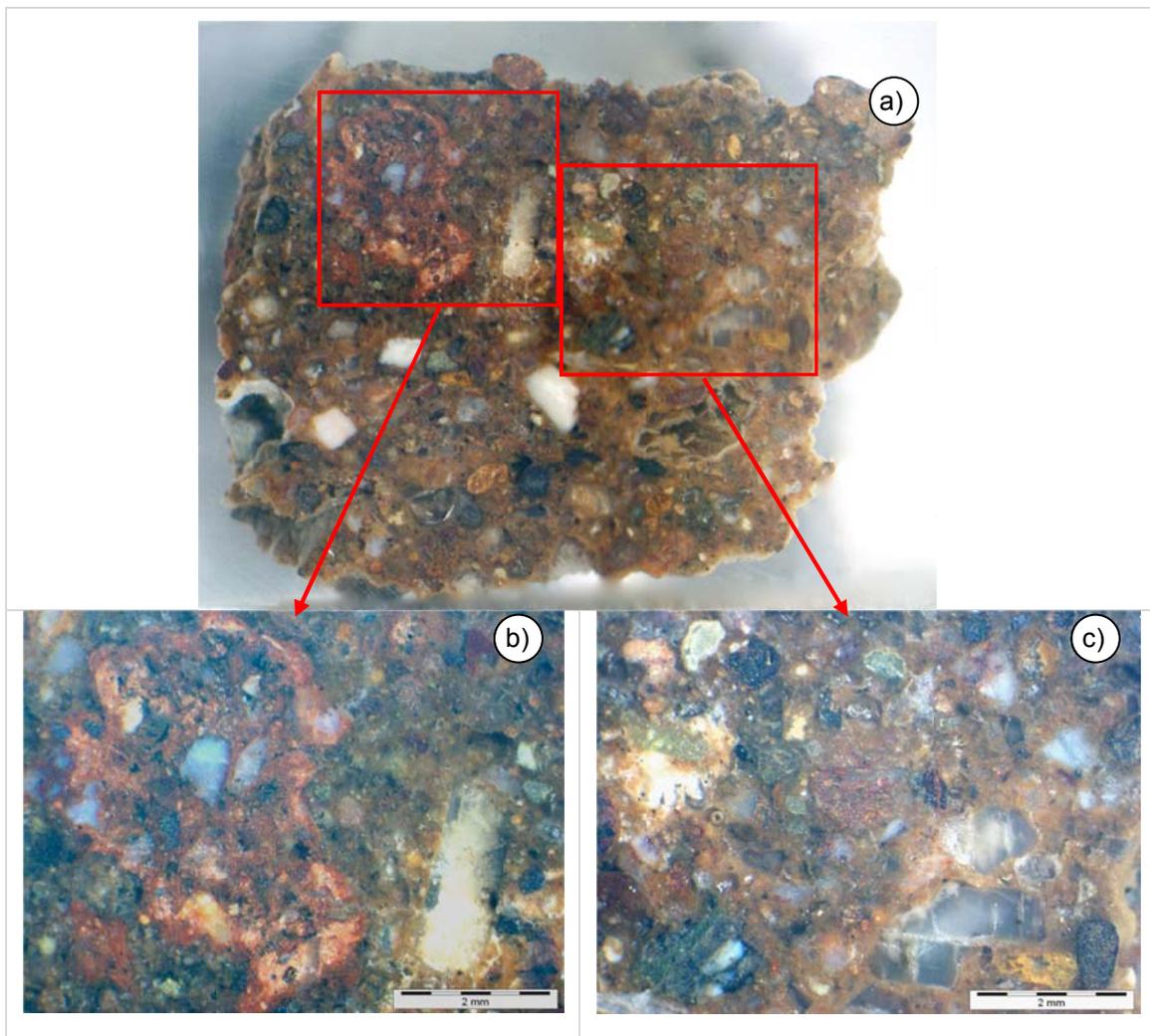


Figura 44 – Observação estratigráfica da amostra de revestimento P8 à lupa binocular: a) Aspecto geral; b) Pormenor da zona assinalada na imagem (a) onde é visível um grande agregado de tijolo, mas nota-se também a variabilidade de outros tipos de agregado; c) Outro pormenor da argamassa onde ocorrem agregados de quartzo e xisto.



Figura 45 – Aspectos da observação macroscópica da amostra de PB1.

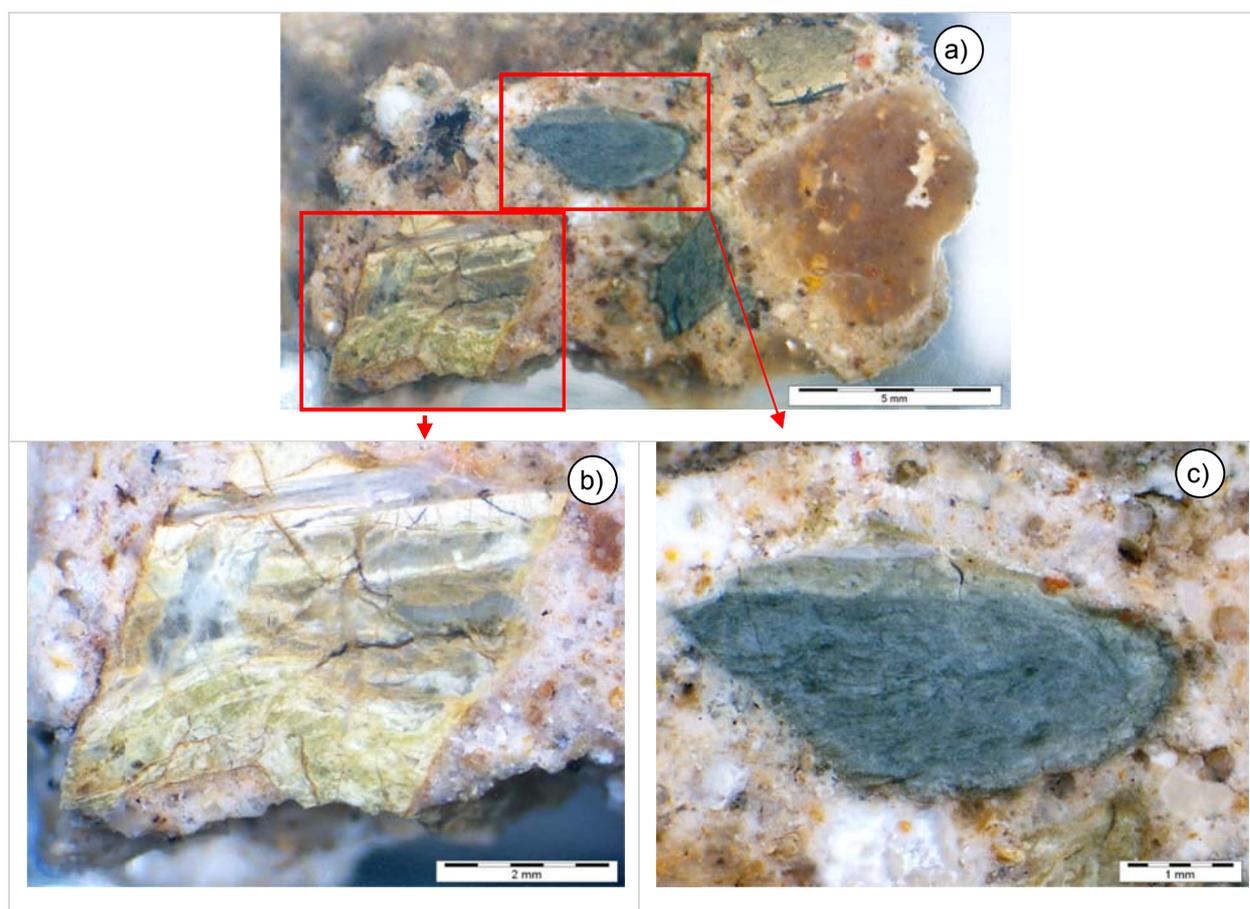


Figura 46 – Observação estratigráfica da amostra de revestimento PB1 à lupa binocular: a) Aspecto geral; b) Pormenor da zona assinalada na imagem (a) onde é visível um agregado amarelado (xisto alterado); c) Outro pormenor da argamassa onde pode-se ver um agregado cinza-verde (tipo xisto).

Das amostras ensaiadas a P6 é a que apresenta maior coesão e resistência mecânica, provavelmente em resultado do desenvolvimento das reacções pozolânicas entre os agregados e o

ligante, como evidenciado pela Figura 42. Comparativamente à amostra P3, nota-se na P6 uma menor presença de agregados quartzosos e de cal. O tipo de agregados predominantes são agregados xistosos de cor verde, ricos em serpentinas, de grande dimensão, provenientes de rochas ígneas ácidas muito alteradas (Figura 47a) para serpentinas. Na Figura 47c é ainda possível observar a rocha original de cor branca no centro, que foi parcialmente alterada, provavelmente, em resultado da reacção em ambiente básico com a cal. Detectam-se também sinais evidentes de reacções pozolânicas, nomeadamente devido ao emprego de agregados cerâmicos (tijolo), que reagiram com a cal o que levou à formação de auréolas castanhas em torno dos agregados e em microfissuras na pasta de cal – Figura 47c. Foram observados pelo menos dois tipos de tijolo, provavelmente semelhantes aos da amostra P3. Observou-se ainda a presença de anfíbolos (azul em luz polarizada – Figura 47e), no interior dos agregados de xisto de cor verde, o que corrobora a hipótese dos agregados serem de origem aluvionar. A presença de anfíbolos nos agregados foi o aspecto que mais ressaltou da análise petrográfica. De acordo com a carta geológica de Beja e a geologia do Sul de Portugal, a origem mais provável destes agregados é na zona do próxima da *villa* junto ao Rio Guadiana.

As observações das lâminas delgadas, que mostram a presença de reacções químicas na interface da matriz-fragmentos cerâmicos (Bakolas *et al*, 1998) são consistentes com a presença de compostos hidráulicos, nomeadamente carboaluminatos de cálcio hidratado detectados por DRX.

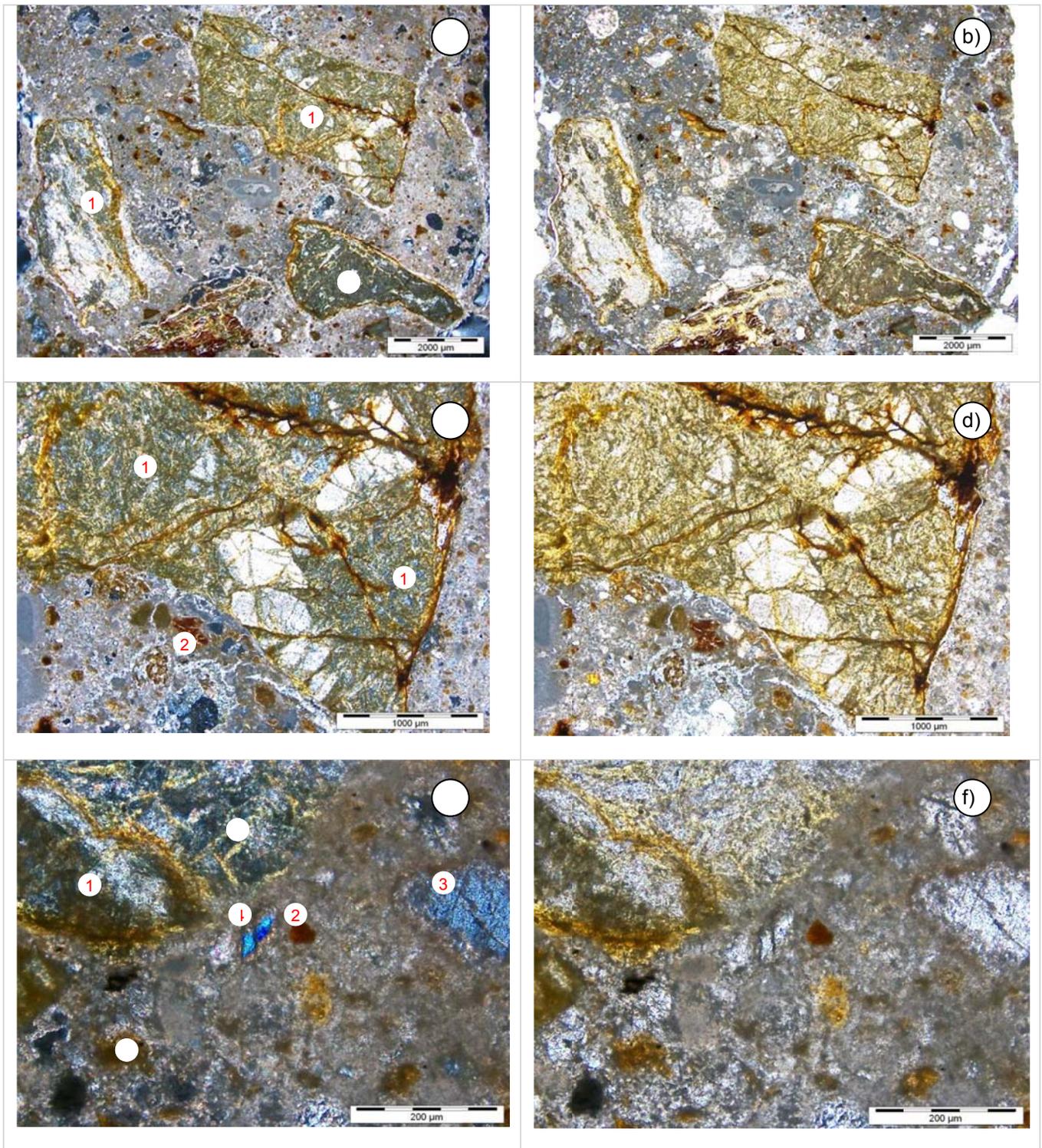


Figura 47 – Observação da argamassa P6 em lâmina delgada ao microscópio petrográfico, em polarizadores paralelos (b, d, f) e cruzados (a, c, e): Notação: 1. rocha ígnea ácida muito alterada; 2. fragmentos cerâmicos – tijolo; 3. filossilicatos; 4. anfíbola.

5.4 - Forte de Nossa Senhora da Luz, Cascais

As argamassas do Forte de Nossa Senhora da Luz, tal como as do Forte de Santa Marta, evidenciam o mesmo cuidado na construção, característico de obras com fins militares, integrando um dos exemplos de monumentos resistentes à acção agressiva dos ambientes marinhos.

As referências das amostras analisadas por microscopia óptica encontram-se no quadro 4.

Quadro 4 – Referência das amostras do Forte de Nossa Senhora da Luz

Referenciação	Zona de recolha/NºPlanta
NSL-BS5	Baluarte Sul/PA.52
NSL-BN6	Baluarte Norte/ PA.65
NSL-BN7	
NSL-MS8	Muralha Sul
NSL-MS9	

A observação petrográfica das argamassas do Forte de N^a. Sr.^a da Luz revelou que as principais fases neoformadas correspondem à hidromagnesite ($4\text{MgCO}_3 \cdot \text{Mg}(\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$), gesso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), etringite ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$) e cloroaluminato de cálcio hidratado ($\text{Ca}_4\text{Al}_2\text{O}_6\text{Cl}_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$), estando a primeira texturalmente associada aos nódulos de cal (Figura 48). Este facto pressupõe a utilização no ligante de cal dolomítica.

Quer o ião sulfato como o ião cloreto estão presentes em abundância no ambiente marítimo (Figura 49). Estes sais em solução difundem-se pela argamassa permeável, reagindo com os aluminatos de cálcio provenientes das reacções de dissolução dos agregados no ambiente alcalino da pasta de cal, e precipitam em fases minerais dentro de poros ou vazios disponíveis. A presença dos diferentes sais foi confirmada através da análise de superfície de fractura ao MEV (Figura 50).

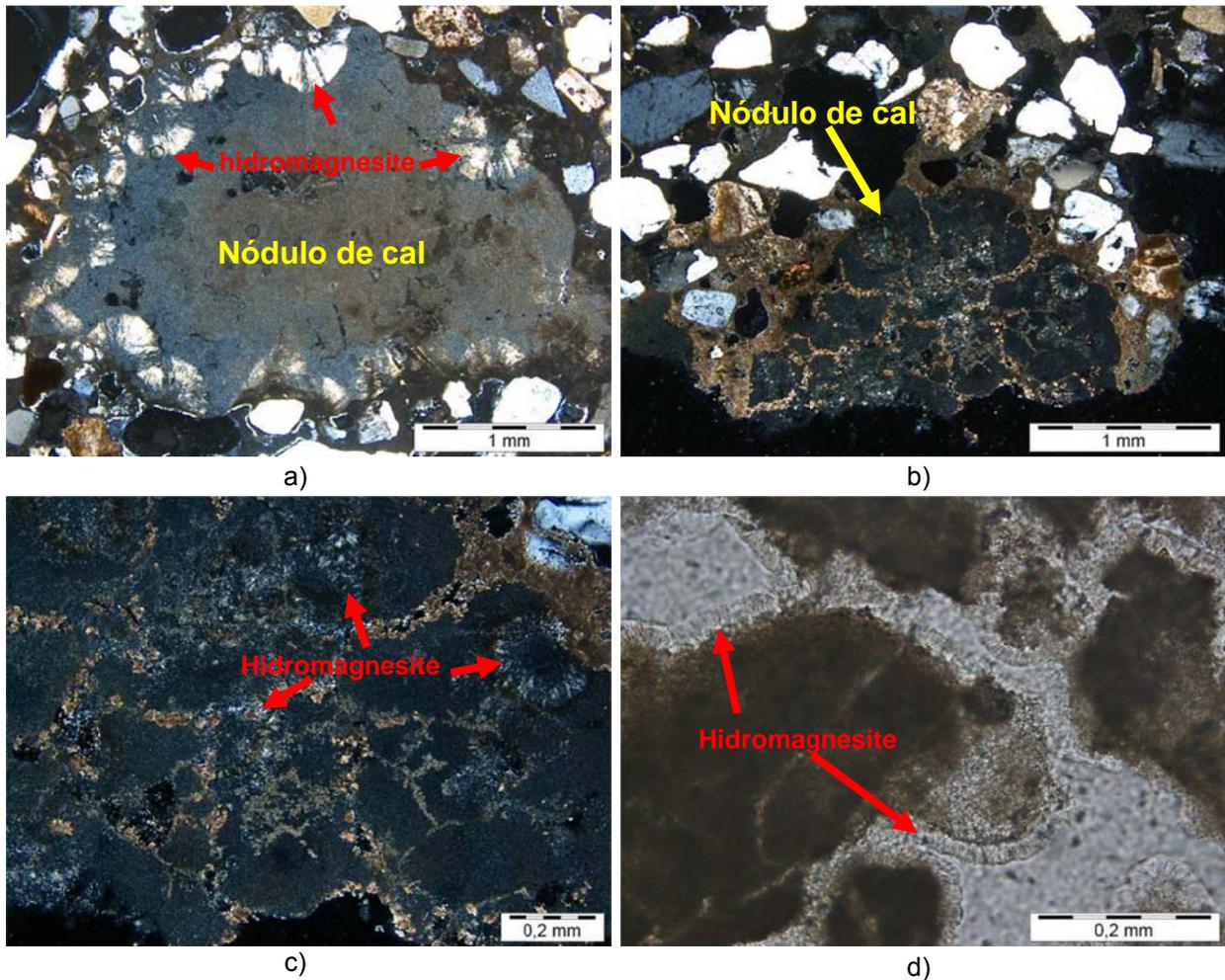


Figura 48 – Observação da argamassa do baluarte sul (BS5) do Forte de Nossa Senhora da Luz em lâmina delgada ao microscópio petrográfico. Notar a cristalização maciça de hidromagnesite associado a nódulos de cal em a) e b). Em c) e d) pormenor da imagem (b), mostrando detalhes de hidromagnesite. Em d) polarizadores paralelos, em a), b) e c) polarizadores cruzados.

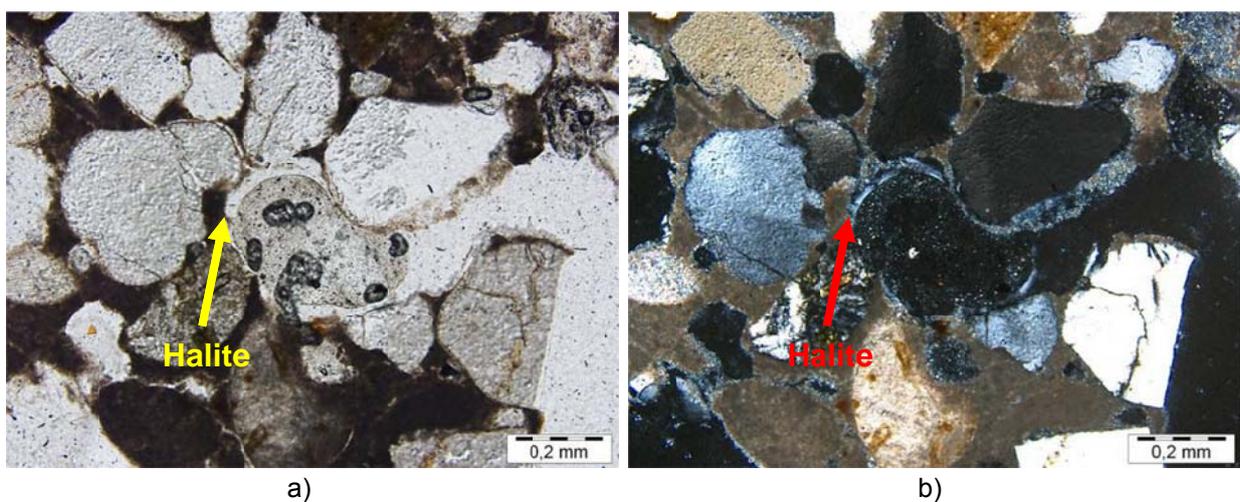


Figura 49 – Observação da argamassa do baluarte sul (BS5) do Forte de Nossa Senhora da Luz em lâmina delgada ao microscópio petrográfico. É visível a cristalização de halite (NaCl) num vazio irregular. Em a) polarizadores paralelos, em b) polarizadores cruzados.

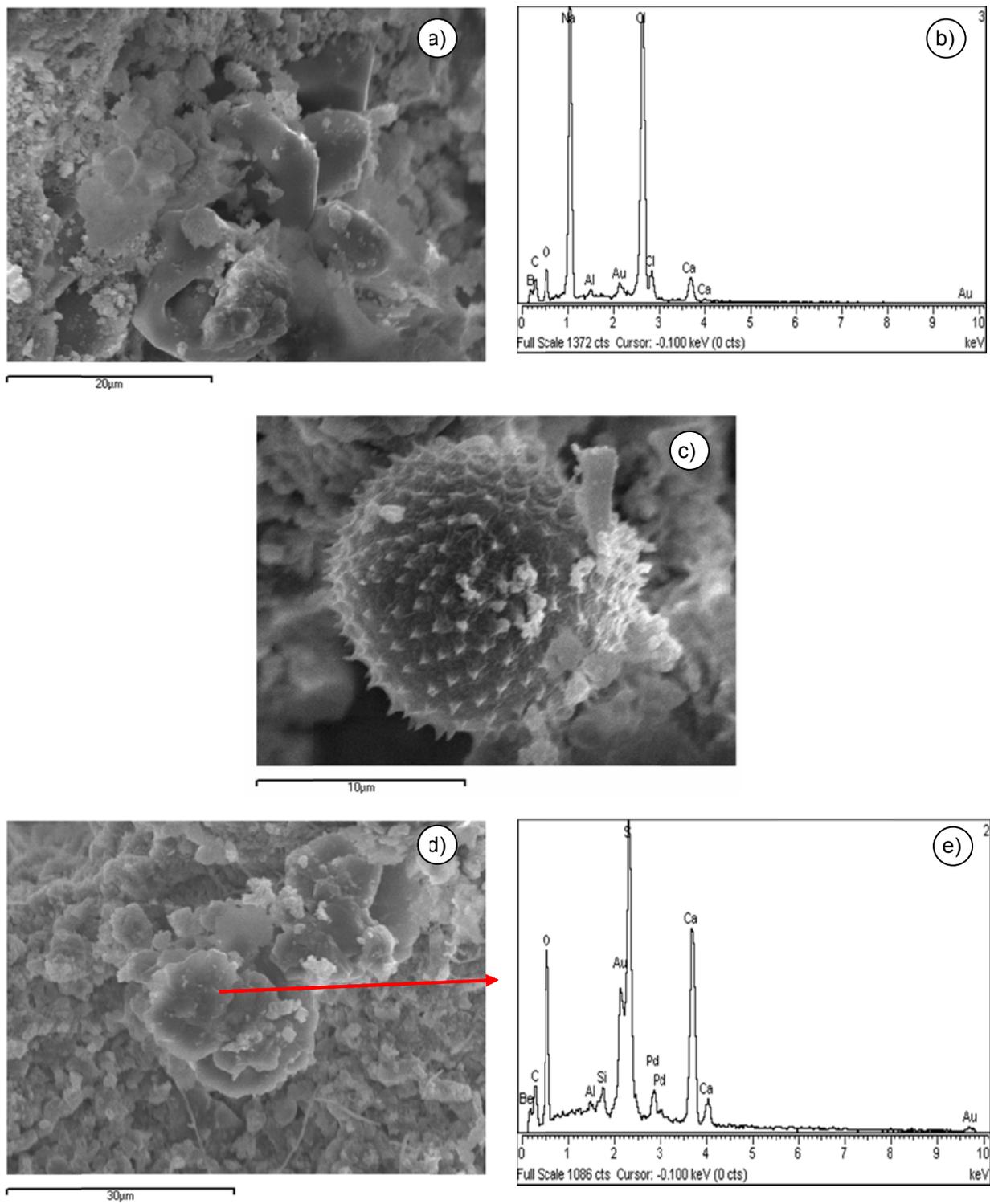


Figura 50 – Imagens ao MEV de superfícies de fractura da argamassa do baluarte sul (BS5); a) Pormenor de halite e respectivo espectro EDS em b); c) Esporo de fungo; d) Formações de gesso e respectivo espectro EDS em e).

5.5 - Horto do Paço das Alcáçovas

As amostras para ensaios foram recolhidas da zona do horto (Figura 51). Antes preparar os provetes para os vários ensaios programados, as amostras foram fotografadas – Figura 52 a 54 – tendo-se seleccionado os provetes para os vários ensaios de caracterização (Quadro 5).

Quadro 5 – Identificação e referenciação das amostras do Horto do Paço das Alcáçovas.

Identificação	Referenciação
Argamassa de suporte dos embrechados	Argamassa
Fragmentos pétreos rosados	Quartzito rosa
Fragmentos pétreos brancos	Calcite
Fragmentos pétreos verdes	Mármore
Fragmentos vermelho-esverdeado	Resíduos metalúrgicos
Fragmentos negros	Minério negro



Figura 51 – Imagem do local de extracção do revestimento de embrechados numa parede na zona do horto.



Figura 52 – Pormenores da argamassa de suporte dos embrechados, sendo visíveis conchas, fragmentos vítreos e de cerâmica.



a)



b)



c)



d)



e)

Figura 53 – Pormenores de materiais dos embrechados, nomeadamente fragmentos pétreos de cor rosada (a), branca (b), verde (c), negra (d) e de origem metalúrgica de cor verde/avermelhada (e).



Figura 54 – Pormenores de materiais cerâmicos de diferente origem e natureza usados nos embrechados.

A caracterização argamassa inclui a realização de ensaios microestruturais, mineralógicos e químicos, nomeadamente com o objectivo de se calcular o traço e avaliar o estado de conservação.

Para caracterização por difracção de raios X (DRX) da argamassa, prepararam-se dois tipos de amostras ou fracções. Uma das fracções, que corresponde à argamassa tal qual, é denominada de global. Esta é obtida pela moagem da argamassa já desagregada, de modo a que todas as partículas assumam um tamanho suficiente para passarem num peneiro de malha 106 μm . A outra fracção, que é mais concentrada no ligante, é denominada de fracção fina e resultou do material fino que se soltou da amostra durante a desagregação, e que também passou no peneiro de malha 106 μm . Para a análise por DRX as amostras das outras camadas foram moídas até granulometria inferior a 106 μm .

Para identificação/confirmação da natureza dos materiais foram efectuados ainda o tratamento com ácido clorídrico na amostra de calcite e a DRX das amostras de minério negro e escórias metalúrgicas.

Para a análise química da argamassa foram utilizadas a fracção global da DRX e uma outra em que o material se encontrava apenas desagregado. A fracção global foi atacada com ácido nítrico (HNO₃) diluído (1:50) e a fracção desagregada com ácido clorídrico (HCl) diluído (1:3).

Todas as amostras depois de preparadas conforme indicado foram secas a 40 °C durante pelo menos 12 horas, com excepção das argamassas para análise química que foram secas à temperatura de 105 °C.

Efectuaram-se os registos difractométricos das amostras preparadas como anteriormente descrito, tendo-se utilizado a radiação K α do cobalto produzida por uma unidade de raios X, nas seguintes condições de ensaio: varrimento entre 3 e 74° 2 θ ; velocidade de varrimento de 0.05° 2 θ /s; tensão e corrente de filamento, respectivamente, de 35 kV e 45 mA. Nas Figura 55 a 57 apresentam-se os registos difractométricos obtidos.

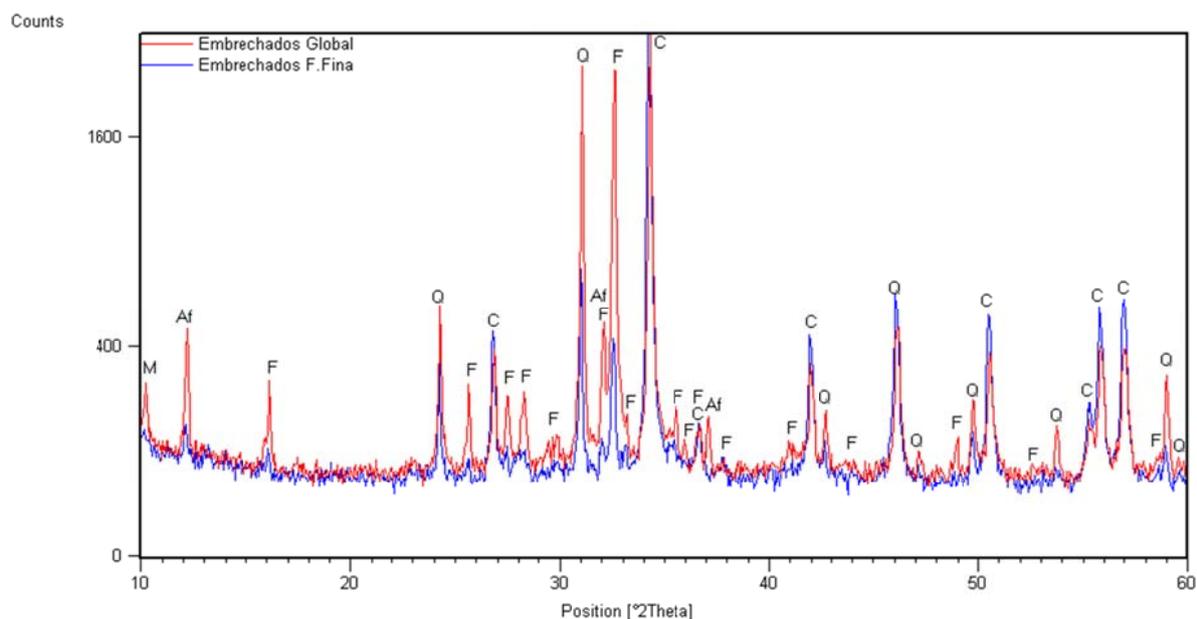


Figura 55 – Registos difractométricos da argamassa, Global (vermelho) e Fracção Fina (azul). Notação: M – Mica; Af – Anfíbola; F – Feldspatos; Q – Quartzo; C – Calcite.

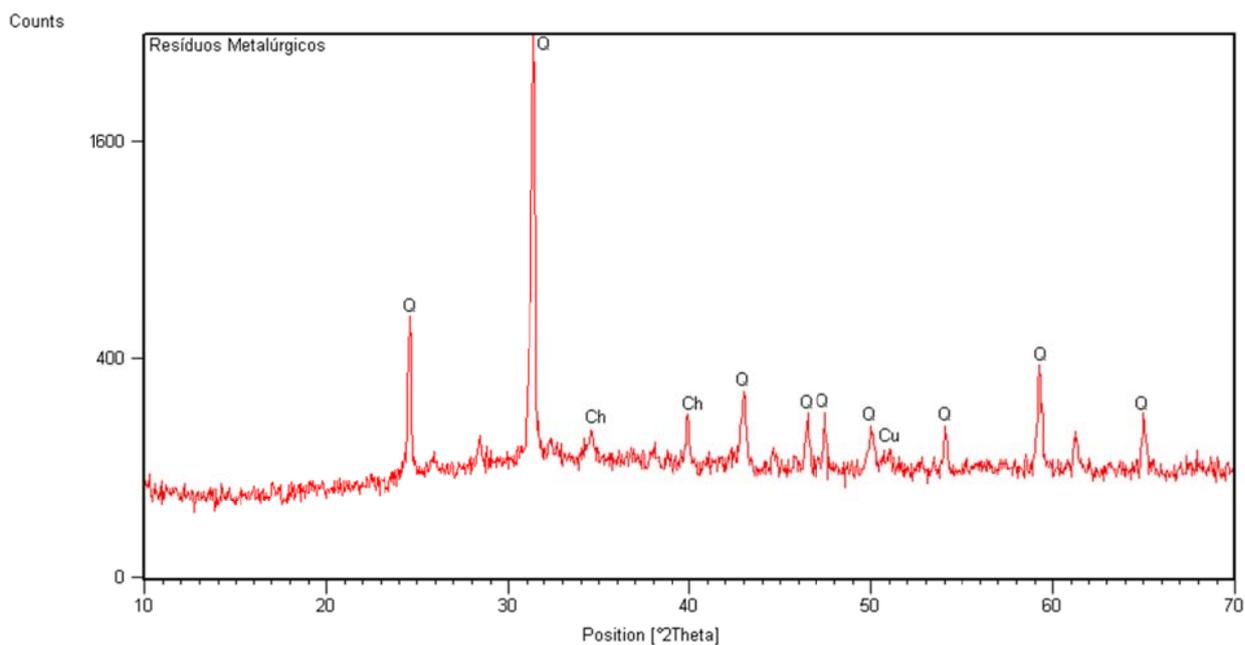


Figura 56 – Registo difractométrico dos resíduos metalúrgicos. Notação: Q – Quartzo; Ch – Calcopirite; Cu – Cobre.

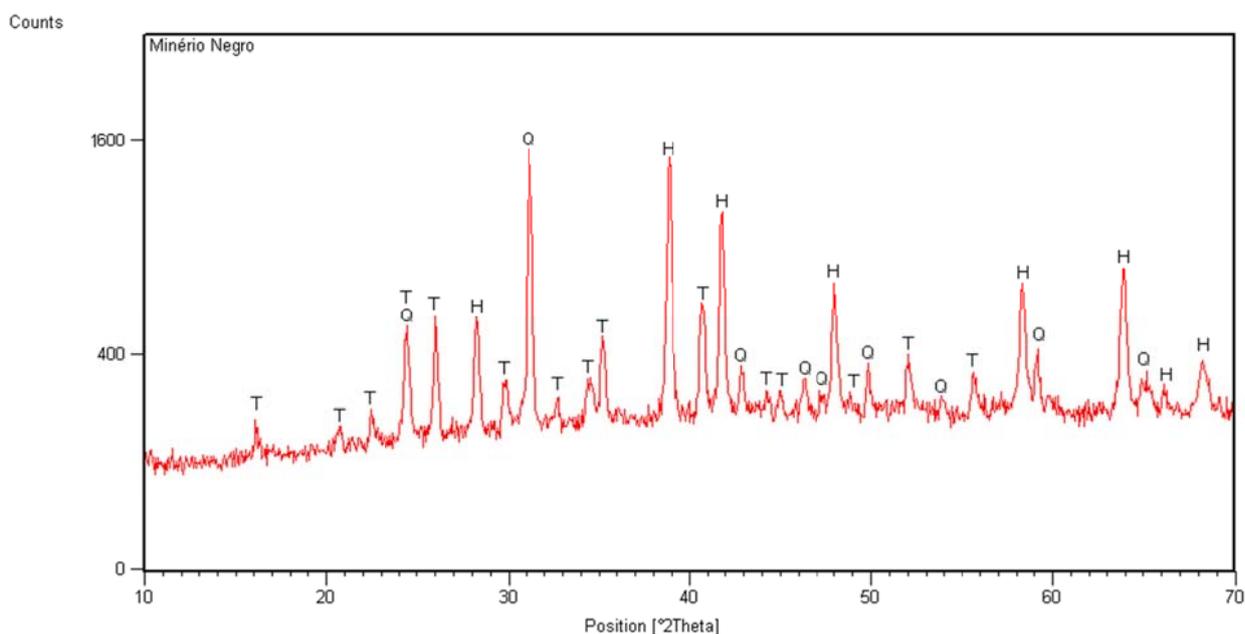


Figura 57 – Registo difractométrico do minério negro. Notação: T – Turmalina; Q – Quartzo; H – Hematite.

Quadro 6 – Composição mineralógica qualitativa das amostras.

Compostos cristalinos identificados	Argamassa		Resíduos metalúrgicos	Minério negro
	Global	F. Fina		
Quartzo (SiO ₂)	++/+++	+	+++/++++	++/+++
Feldspatos – plagioclase ((Na,Ca)AlSi ₃ O ₈)	++/+++	+	-	-
Mica (KAl ₂ Si ₃ AlO ₁₀ (OH) ₂)	+	Vtg	-	-
Anfíbolos (NaCa ₂ (Mg,Fe) ₄ Al ₃ Si ₆ O ₂₂ (OH,F) ₂)	+ / ++	Vtg	-	-
Calcite (CaCO ₃)	++/+++	+++	-	-
Calcopirite (CuFeS ₂)	-	-	+	-
Cobre (Cu)	-	-	Vtg	-
Turmalina – escorlite (NaFe ²⁺ ₃ Al ₆ Si ₆ O ₁₈ (BO ₃) ₃ (OH) ₄)	-	-	-	++
Hematite (Fe ₂ O ₃).	-	-	-	++/+++

Notação utilizada:

++++ - composto predominante
 ++ - proporção média
 Vtg - vestígios

+++ - proporção elevada
 + - proporção fraca
 ? - dúvida na presença

Face aos resultados obtidos para a composição mineralógica das diferentes amostras pode concluir-se o seguinte:

- a argamassa de suporte dos embrechados é uma argamassas de cal calcítica rica em areia de natureza granitóide;
- a amostra de resíduos metalúrgicos, sendo essencialmente constituída por quartzo e minerais de cobre (calcopirite e cobre metálico), associado a que o difractograma apresenta um fundo elevado característico da presença de ferro na amostra, parece confirmar que se trata dum minério, provavelmente processado, rico em cobre e ferro;
- a amostra de minério negro, essencialmente constituída por quartzo, hematite e escorlite, indicia que se trate dum material mineral natural tipo turmalina negra, mineral que se encontra normalmente associado a granito e pegmatitos graníticos.

Com o objectivo de se detectarem outros compostos provenientes de reacções de degradação ou a eventual utilização dum ligante hidráulico, realizou-se um ataque com ácido nítrico (1:50) na argamassa (moída a uma granulometria inferior a 106 µm e seca a 105 °C), tendo-se efectuado a determinação do teor de álcalis por espectrofotometria de absorção atómica, a determinação de cloretos por potenciometria, a determinação de sulfatos pelo método gravimétrico e de sílica solúvel pelo método do óxido de polietileno (NP EN 196-2, secção 13.3.1, 1996). Os resultados obtidos apresentam-se no Quadro 7.

Quadro 7 – Teores (em %) de álcalis, sulfatos, cloretos, sílica solúvel e resíduo insolúvel da argamassa

Sódio (Na ₂ O)	Potássio (K ₂ O)	Cloretos (Cl)	Sulfatos (SO ₃)	Sílica solúvel (SiO ₂)	Resíduo Insolúvel
0,01	0,04	0,01	0,15	0,52	51,8

Os baixos teores de álcalis e sílica solúvel obtidos confirmam que o ligante não é de carácter hidráulico. Igualmente os baixos teores de SO₃ e cloretos indicam a inexistência de contaminação por sais de sulfatos e de cloretos.

No Quadro 8 apresenta-se a composição simplificada da argamassa, calculada com base no método de "Jedrzejewska" (Jedrzejewska, 1960) para argamassas de cal antigas, o qual considera três tipos de constituintes: "areia" (correspondente ao resíduo insolúvel do ataque ácido), "carbonatos" e "fracção solúvel" em ácido (compostos solúveis em ácido sem formação de dióxido de carbono).

Quadro 8 – Composição simplificada da argamassa (% em massa)

Identificação	Areia ⁽¹⁾	Carbonatos ⁽²⁾	Fracção Solúvel ⁽³⁾
Argamassa	52	43	5

(1) – Resíduo insolúvel em ácido nítrico, RI

(2) – Calculado a partir dos teores de CaCO₃ por ATG

(3) – Fracção Solúvel = 100 – Σ(RI + Carbonatos)

O valor de fracção solúvel obtido (Quadro 8) é consentâneo com a inexistência nas argamassas de compostos de carácter pozolânico e/ou a utilização dum ligante hidráulico.

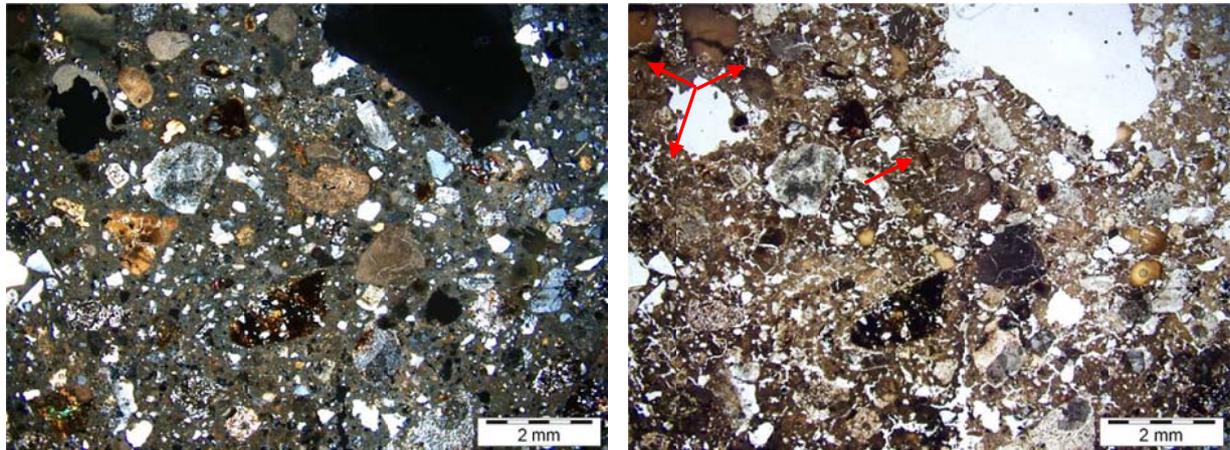
As observações de lâminas delgadas da argamassa e de alguns materiais pétreos foram efectuadas utilizando um microscópio de polarização da marca Olympus BX60 com sistema de vídeo para aquisição de imagens.

Relativamente à argamassa, a observação evidenciou uma pasta totalmente carbonatada com distribuição heterogénea em termos de cor, sendo mais escura nas zonas mais ricas em micronódulos de cal (Figura 58), com composição carbonática micrítica. Observa-se ainda presença de intensa fissuração associada aos nódulos e micronódulos de cal e também interligando vazios (Figura 59).

Os agregados da argamassa apresentam uma distribuição granulométrica bimodal, sendo constituídos por partículas de textura subangulosa, com esfericidade baixa e distribuição homogénea. As partículas são maioritariamente constituídas por grãos de rocha tonalítica/granodiorítica¹, nota-se biotite alterada, rara microclina, feldspato gráfico (Figura 60a) e alteração local de plagioclase em epídoto (Figura 60b) e sericite (Figura 60c), e também com forte impregnação com hidróxidos e

¹ Rocha plutónica com componentes essenciais quartzo, plagioclase, biotite e/ou hornblenda.

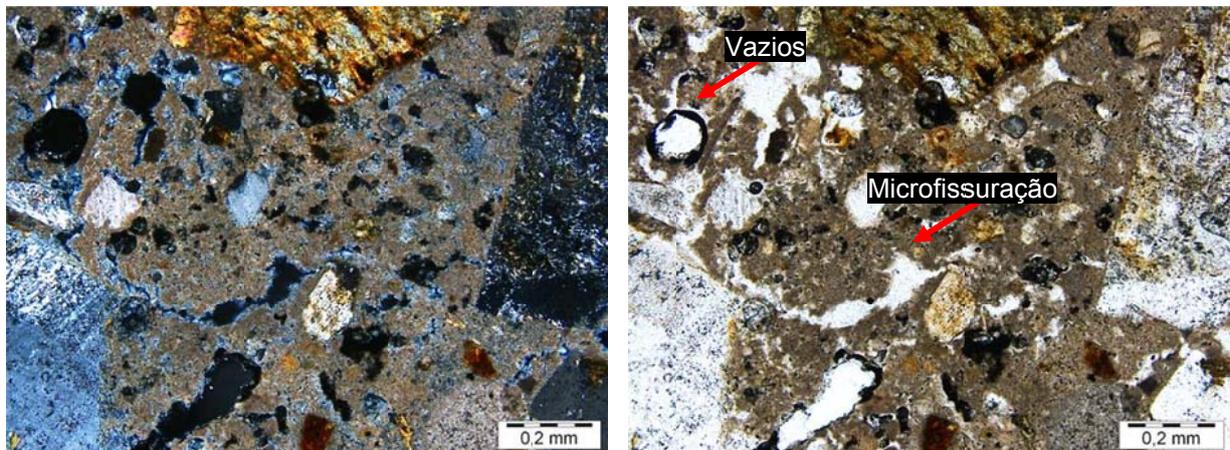
óxidos de ferro (Figura 60d). Ocorrem ainda grãos de quartzo monocristalino, e alguns fragmentos de cherte e de cerâmica (Figura 61), além de fragmentos vegetais (madeira - Figura 62).



a)

b)

Figura 58 – Imagem ao microscópio petrográfico da argamassa de suporte dos embrechados, sendo visíveis zonas mais escuras no ligante (setas) onde existe maior concentração de micronódulos de cal: a) Imagem com nicóis cruzados (NX); b) Imagem com os nicóis paralelos (N//).



a)

b)

Figura 59 – Imagem ao microscópio petrográfico da argamassa de suporte dos embrechados, sendo visíveis vazios e microfissuras na pasta de cal: a) Imagem com nicóis cruzados (NX); b) Imagem com os nicóis paralelos (N//).

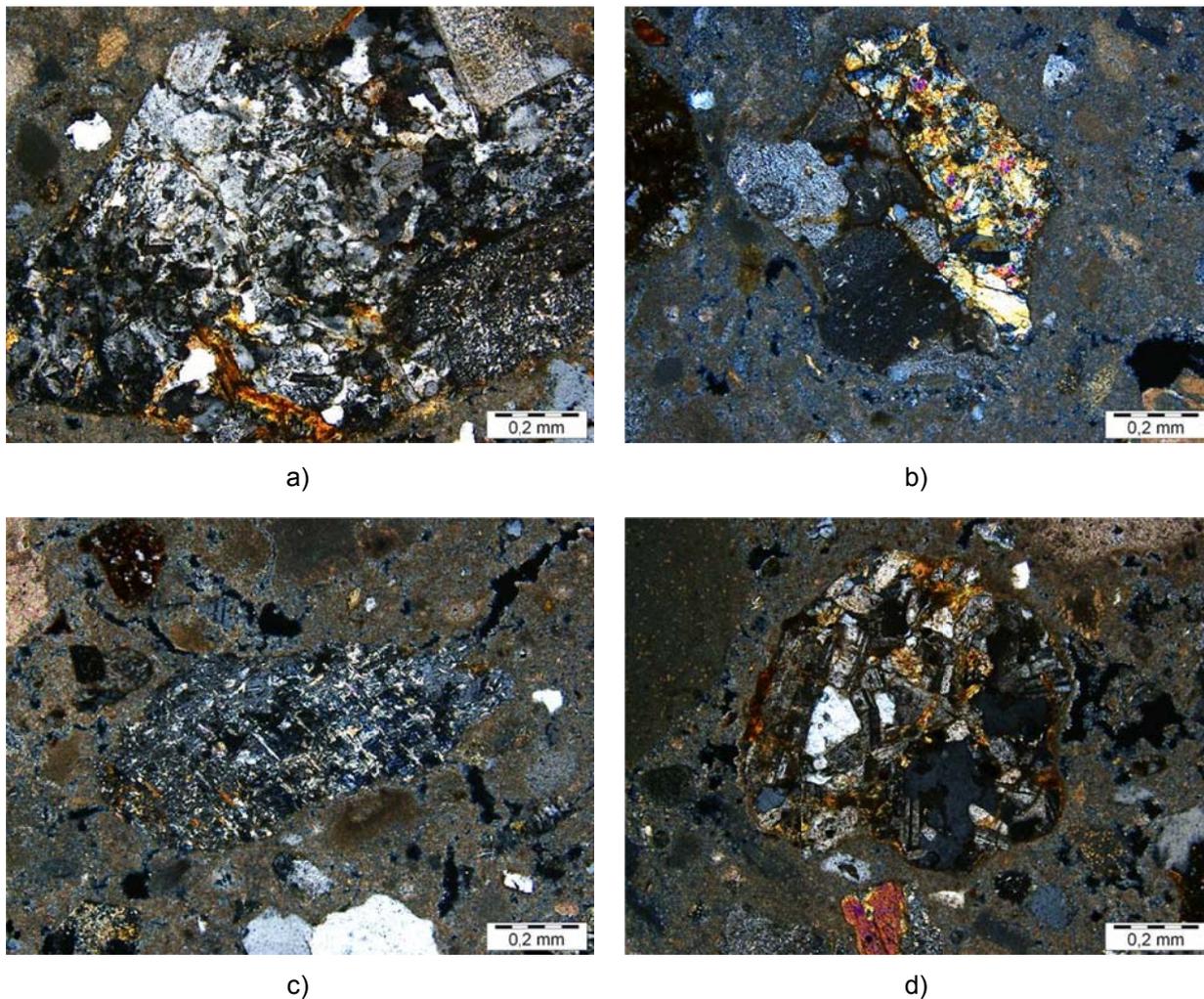


Figura 60 – Imagens ao microscópio petrográfico da argamassa de suporte onde são visíveis (a) grão de feldspato gráfico (NX); b) Feldspato alterado para epidoto (NX); c) Feldspato alterado para sericite (NX); d) Fragmento de tonalito/granodiorito com impregnações por hidróxidos de ferro.

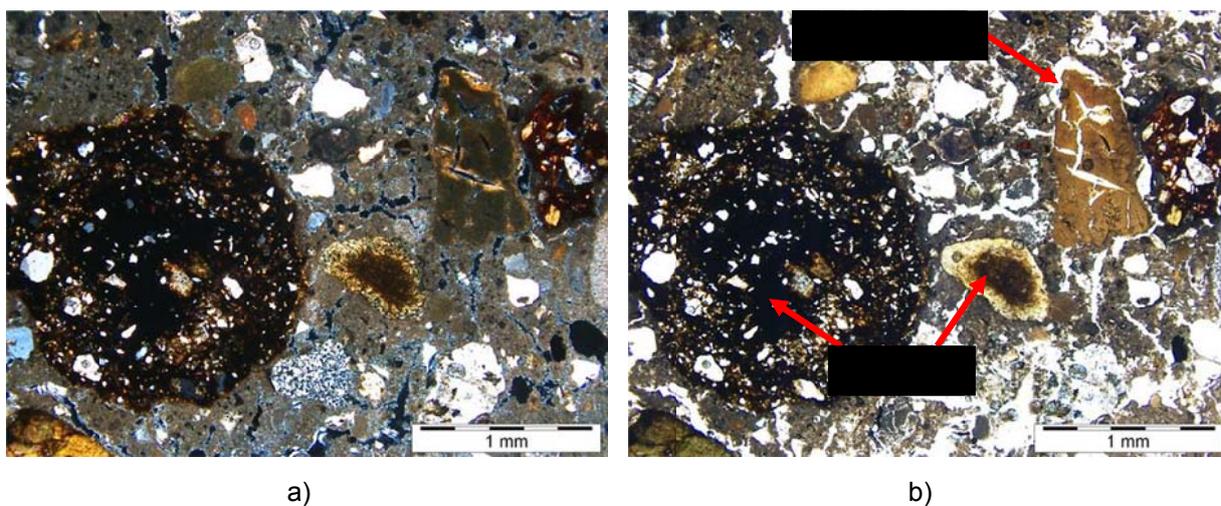


Figura 61 – Imagens ao microscópio petrográfico da argamassa de suporte onde são visíveis grãos cerâmicos de diferentes reactividades, evidenciadas pela orla de reacção: a) Imagem em NX; b) Imagem em N//.

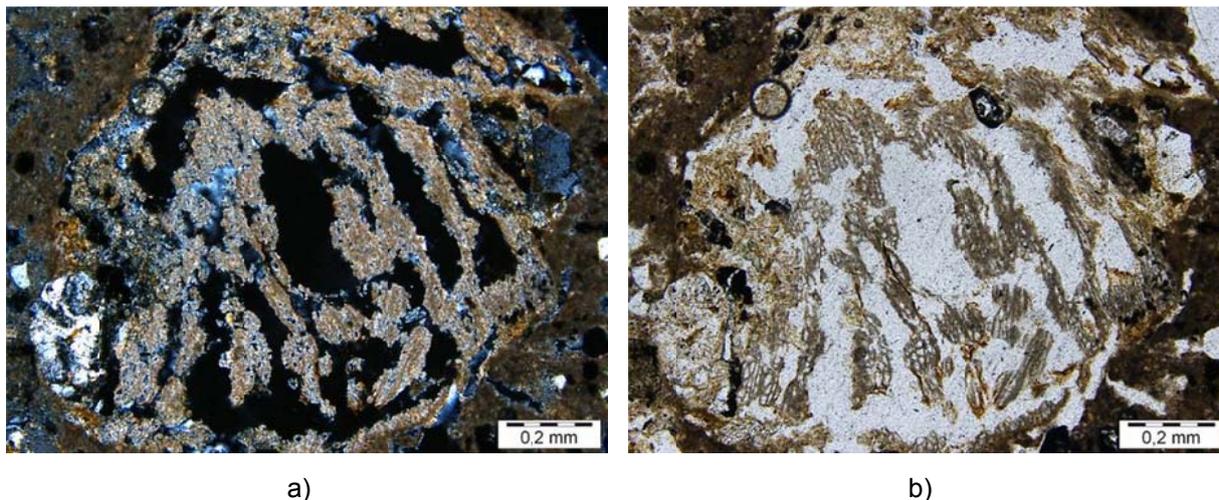


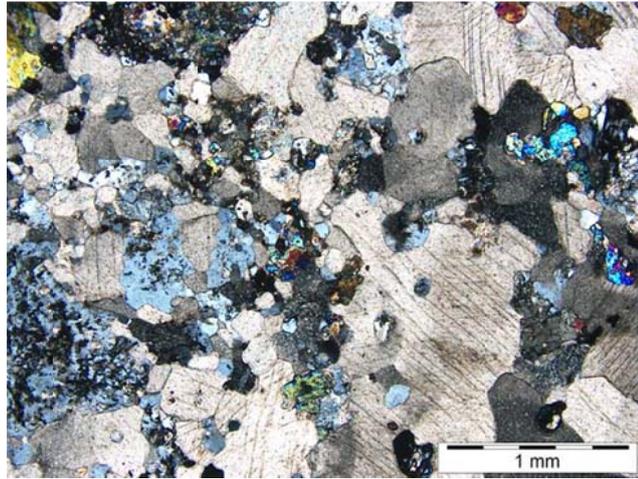
Figura 62 – Imagens ao microscópio petrográfico da argamassa de suporte onde é visível um fragmento de madeira: a) Imagem em NX; b) Imagem em N//.

Observaram-se ainda ao microscópio petrográfico alguns dos materiais constituintes dos embrechados, nomeadamente mármore verde e quartzito rosa. O mármore confirmou-se ser um material de origem metamórfica, de aspecto são e sem microfissuras, provavelmente um mármore impuro composto por carbonatos, quartzo, dióxido, tremolite e esfena – Figura 63.

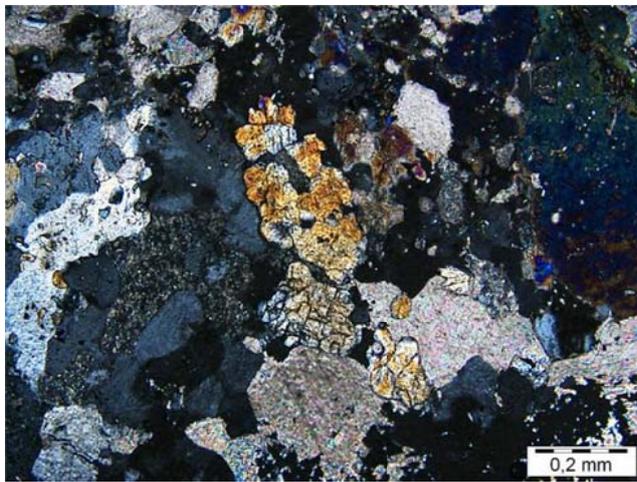
A observação do material pétreo rosa confirmou que se trata dum quartzito, com a característica textura granoblástica dos grãos de quartzo – Figura 64.

Em complemento à análise por DRX do minério negro, procedeu-se à observação ao MEV/EDS em superfície polida duma amostra para confirmar a natureza química do material – Figura 65. A análise por EDS (mapas de raios X) confirmou que se trata dum material constituído essencialmente por ferro, silício e alumínio, o que confirma o resultado da DRX que apontava para um material de natureza mineral, provavelmente uma turmalina do tipo escorlite².

² A composição química média da escorlite é: 2,18 % sódio; 15,37% alumínio; 15,91% ferro; 16,0% silício; 3,08% boro; 0,38% hidrogénio; 47,08% oxigénio [<http://webmineral.com/data/Schorl.shtml>].



a)



b)



c)

Figura 63 – Imagens ao microscópio petrográfico do mármore verde: a) Imagem em NX; b) Pormenor mostrando ao centro cristais prismáticos de piroxena (Imagem em NX); c) Idem mas com N//.

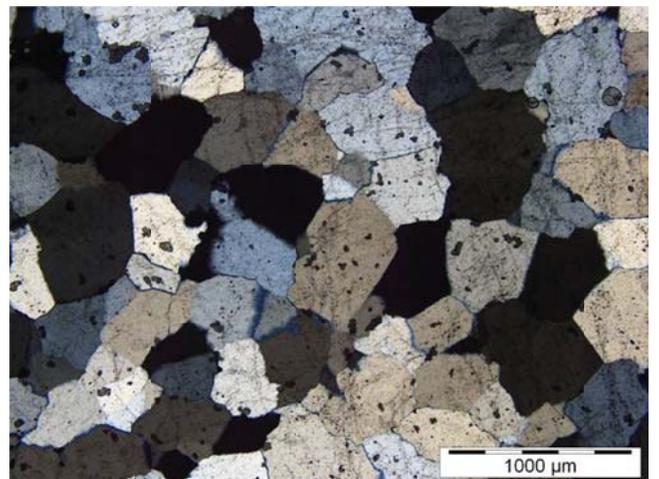
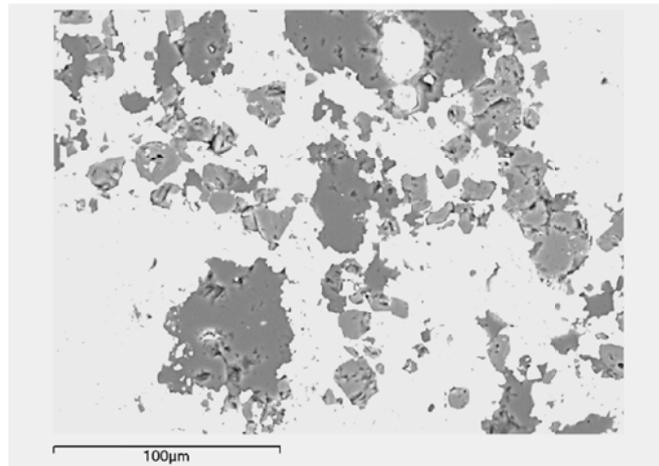


Figura 64 – Imagens em NX ao microscópio petrográfico do quartzito rosa



a)

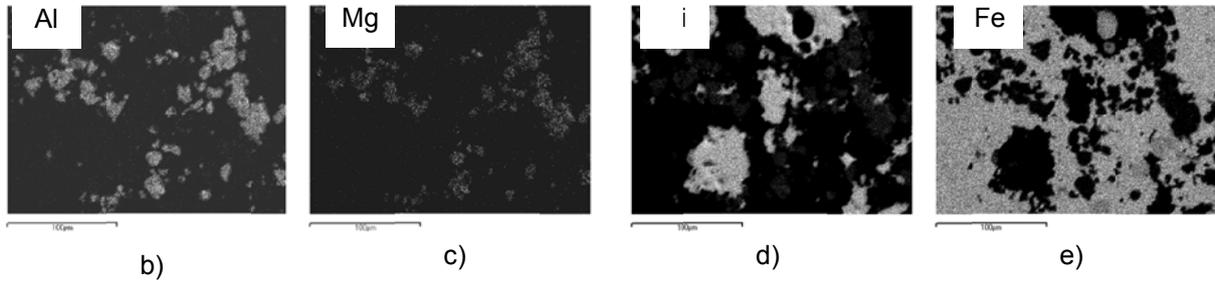


Figura 65 – a) Imagem ao MEV no modo de electrões retrodifundidos do minério negro; b, c, d, e) Mapas de raios X dos elementos alumínio (Al), magnésio (Mg), silício (Si) e ferro (Fe).

6 - CONCLUSÕES

As observações microestruturais que constituíram grande parte deste trabalho, sob a forma de estudo de casos, foram um complemento imprescindível para a caracterização dos materiais e do seu desempenho.

Dos resultados dos ensaios realizados podem extrair-se as seguintes conclusões principais:

- Como se constatou no caso das Pontes Criz I e Criz II as reacções álcalis-sílica (RAS) dependem do acesso de água ao betão. As zonas dos pilares, que estavam sob influência directa da água, foram as mais degradadas por esta reacção expansiva. Além do ligante, alguns minerais presentes nos agregados, tais como os feldspatos, biotite e clorite, são uma fonte importante de álcalis. Aqueles minerais quando alterados, seja naturalmente seja por reacções com o meio alcalino do ligante, libertam os iões Na^+ , Ca^+ e K^+ para solução intersticial, o que contribui para o favorecimento da RAS.
- A formação de etringite é um fenómeno vulgar do processo de cura do betão. Esta pode cristalizar-se nos microporos da pasta ou nos outros vazios sem causar expansão, como foi dado observar no caso da Ponte da Borralha, ou cristalizar-se em quantidade e provocar pressão por cristalização, abrindo microfissuras, como no caso das Pontes Criz I e Criz II.
- As argamassas antigas analisadas possuem textura nodular, como resquício dos nódulos de cal adicionados ao ligante. Esta textura configura testemunho do tipo de cal utilizada.
- Os agregados observados nas argamassas antigas possuem comumente uma orla de reacção com a pasta. Isso foi especialmente evidente na presença de agregados de origem vulcânica ou de cerâmica, pois esses materiais apresentam um carácter pozolânico, originando compostos que contribuem para o aumento da resistência das argamassas.
- A quantidade de poros na pasta de argamassas antigas não é o factor principal para a entrada de soluções do meio externo, mas se aliada a uma alta permeabilidade, aumenta fortemente a entrada de fluidos. No caso das argamassas do Forte de Santa Marta verificou-se existir uma elevada densidade de poros, porém, grande parte deles não intercomunicados, além de uma baixa microporosidade, contribuindo para uma pasta compacta, o que poderá ter contribuído para a resistência desta argamassa contra as agressões do ambiente marítimo.
- Este trabalho permitiu aprofundar os conhecimentos acerca da identificação microscópica de fases e minerais expansivos. No que se refere às argamassas antigas, foi possível analisar argamassas de diversos períodos e em diversas condições de exposição, permitindo ampliar os conhecimentos sobre as técnicas antigas de preparação de argamassas.

Lisboa, LNEC, Novembro de 2011

VISTOS

A Chefe do Núcleo de Materiais Metálicos



Maria Manuela Salta
Investigadora Coordenadora

AUTORIAS



Priscila Melo Leal Menezes
Geóloga

O Director do Departamento de Materiais



Arlindo Gonçalves
Investigador Coordenador



António Santos Silva
Investigador Auxiliar



Ana Paula Menezes
Técnico Superior

Agradecimentos

Ao Prof. José Mirão da Universidade de Évora, ao Dr. Giovanni Borsoi do Núcleo de Revestimentos e Isolamentos do Departamento de Edifícios e aos colegas Lina Nunes, Dora Soares, Susana Couto e Fátima Menezes do Núcleo de Materiais Metálicos do Departamento de Materiais do LNEC.

BIBLIOGRAFIA

- ASTM C1293 - 08b Standard Test Method for Determination of Length Change of Concrete Due to Alkali-Silica Reaction
- BORSOI, G., Santos Silva, A., 2010. Caracterização química, mineralógica e microestrutural das argamassas da *Villa Romana de Pisões*, Beja. Relatório LNEC, Departamento de Materiais, Núcleo de materiais Metálicos, Laboratório Nacional de Engenharia Civil.
- FERNANDES, M. I. G.; 2005. Caracterização Petrográfica, Química e Física de Agregados Granfíticos em Betões. Estudo de Casos de Obra; Tese de Doutoramento, Faculdade de Ciências da Universidade do Porto.
- GONÇALVES, A.; BRAGA REIS, M. O.; 1998. Sulphate attack of Concrete; Session 7A – Durability; 12th European RMC Congress – ERMCO; Lisboa.
- GONÇALVES, 2007. Aplicação da Petrografia no Estudo do Betão e da Alterabilidade dos Materiais Pétreos em Meio Alcalino. Estágio Curricular para obtenção da Licenciatura em Engenharia Geológica realizado no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Departamento de Materiais – Núcleo de Materiais Metálicos (DM-NMM).
- IGESPAR - Instituto de Gestão do Património Arquitectónico e Arqueológico, 2010. Reabilitação e adaptação do antigo convento do santíssimo Sacramento. Página electrónica IGESPAR, I.P., http://www.igespar.pt/media/uploads/intervencoes/intervencoesjan2010/convento_sacramento/siteMAconventosacramentoJAN10.pdf
- Barros, M. R.; Boiça, J. M. F.; Ramalho, M. M. M., 2001. As fortificações marítimas da costa de Cascais. Lisboa: 2001.
- Jedrzejewska, H., 1960. *Old Mortars in Poland: A New Method of Investigation*, Studies in Conservation, Vol. 5, nº 4, pp. 132-138.
- NP EN 196-2 (secção 13.3.1), 1996. *Métodos de ensaio de cimentos. Parte 2: Análise química de cimentos*, Instituto Português da Qualidade, pp. 32.
- SILVA MATOS, R. M., 2008. *Do Observantissimo Mosteyro Chamado do Sacramento de Religiosas de Sam Domingos – Monografia Histórica e Artística do Convento e Igreja do Santíssimo Sacramento, Rua do Sacramento a Alcântara, 43-51 (Lisboa)*, (século XVII – século XX), Ministério dos Negócios Estrangeiros, p. 95, 2008
- Soares, D., 2006. Degradação do betão por reacções sulfáticas de origem interna. Influência das adições minerais na inibição da reacção. Relatório de Estágio LNEC/ Universidade de Évora.
- Santos Silva, A., 2005, “Degradação do betão por reacções álcalis-silica. Utilização de cinzas volantes e metacaulino para a sua prevenção”, Tese Doutoramento, LNEC/U. Minho, 2005, 339 p.

