



UNIVERSIDADE DE
COIMBRA



Paulo Miguel Matias Portugal

ESTUDO DE ARGAMASSAS SUBMETIDAS A AMBIENTES
QUIMICAMENTE AGRESSIVOS

Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, na área de Especialização
em Construções, orientada pelo Professor Doutor António José Barreto Tadeu e
pelo Doutor João António Soares de Almeida

Coimbra, 7 de Fevereiro de 2019



FCTUC DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

Paulo Miguel Matias Portugal

ESTUDO DE ARGAMASSAS SUBMETIDAS A AMBIENTES QUIMICAMENTE AGRESSIVOS

STUDY OF MORTARS SUBJECTED TO CHEMICALLY AGGRESSIVE ENVIRONMENTS

Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, na área de Especialização em Construções,
orientada pelo Professor Doutor António José Barreto Tadeu e pelo Doutor João António Soares de Almeida

Esta Dissertação é da exclusiva responsabilidade do seu autor.
O Departamento de Engenharia Civil da FCTUC declina qualquer
responsabilidade, legal ou outra, em relação a erros ou omissões
que possa conter.

Coimbra, 7 de Fevereiro de 2019

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer aos meus orientadores, Professor Doutor António José Barreto Tadeu e Doutor João António Soares de Almeida, por todo o apoio prestado, orientação, disponibilidade e dedicação ao longo destes meses de trabalho.

Agradeço à Lusomapei S.A., por ter potenciado e acompanhado o meu interesse pela realização deste trabalho, e também por todo o apoio prestado, disponibilidade de tempo para a realização dos provetes e por partilhar do interesse mútuo de aumentar o conhecimento nesta área tão específica. Em especial gostaria de agradecer ao Engenheiro Nelson Moreira por acreditar neste trabalho e pela força que me transmitiu para avançar, desde o primeiro momento.

Agradeço ao Itecons e a toda a sua equipa, que me recebeu e acolheu, em especial à Dr^a. Mónica Marques por todo o apoio prestado e excelência na realização de todos os ensaios e medições no Laboratório de Química, e à Doutora Gina Matias pelo apoio na realização de ensaios e medições no Laboratório de Argamassas.

Agradeço à Alice, pela paciência que teve ao longo deste período, por me incentivar a aceitar este desafio, e por estar sempre presente e disponível em todos os momentos. Aos meus filhos Mariana e José Miguel, agradeço a compreensão pelos jogos e brincadeiras de que abdiquei ao longo deste período, e agradeço a energia e força que me transmitem todos os dias e em todos os momentos. Aos meus pais, agradeço pela educação que me foi transmitida, pela oportunidade de estudar, e pelo exemplo de trabalho e esforço para alcançar os objetivos.

RESUMO

As infraestruturas de saneamento são essenciais ao normal funcionamento dos aglomerados urbanos, pois asseguram o transporte e garantem o tratamento das águas residuais geradas pela atividade humana. Verifica-se, contudo, que o ácido sulfúrico formado por ação biológica é responsável pela degradação precoce dos revestimentos interiores destas infraestruturas. As falhas decorrentes deste problema poderão ter impactes económicos e ambientais muito significativos, e representar um risco para a saúde pública.

Com este trabalho pretendeu-se implementar um teste de resistência ao ácido sulfúrico capaz de reproduzir, de forma acelerada, o tipo de anomalias observadas em revestimentos de sistemas de saneamento, como caixas de visita, condutas e órgãos de estações de tratamento de águas residuais (ETAR). Pretendeu-se, para além disso, realizar um estudo comparativo de várias argamassas, nomeadamente uma argamassa de referência e uma argamassa comercial com maior resistência aos ácidos, bem como um revestimento polimérico à base de resinas epoxídicas.

Os testes consistiram na imersão dos provetes em soluções de ácido sulfúrico concentrado em condições de agitação moderada por períodos de tempo variáveis, após os quais foram realizados ensaios para avaliar a resistência e o respetivo estado de degradação das várias soluções. As argamassas utilizadas foram produzidas nos laboratórios da Lusomapei. O estudo experimental foi conduzido nas instalações laboratoriais do Itecons.

Os resultados obtidos sugerem que, através do método de imersão em ácido sulfúrico concentrado, é possível reproduzir, de forma acelerada, o tipo de degradação observada em argamassas de revestimento de sistemas de saneamento, podendo o mesmo ser utilizado no estudo comparativo de argamassas. Como resultado do estudo comparativo efetuado, verificou-se que a argamassa Mapei Sewament 10 teve um comportamento superior ao da argamassa de referência. Verificou-se também que a pintura epoxídica transmite um grande acréscimo de resistência ao ácido sulfúrico, sendo contudo bastante sensível a defeitos superficiais.

Palavras-chave: Sistemas de saneamento, Argamassas de revestimento, Revestimento com epóxi, Resistência a ácidos

ABSTRACT

Sewer infrastructures are essential to the normal functioning of urban settlements, as they ensure transportation and guarantee the treatment of wastewater generated by human activity. However, the formation of sulfuric acid through biological action is one of the main mechanisms responsible for the early degradation of the inner coatings. The defects that may result from this problem have very relevant economic and environmental impacts, and can represent a risk to public health.

The aim of this work was to implement a sulfuric acid resistance test capable of reproducing, in an accelerated way, the type of anomalies observed in coatings of sewer systems, such as manholes, sewer trunk lines, conduits and waste water treatment plants. In addition, a comparative study of several mortars, such as a reference mortar and a commercial mortar with higher chemical resistance, as well as a polymer coating based on epoxy resins, were also carried out.

The tests consisted of immersing the sample pieces in concentrated sulfuric acid solutions under moderate agitation conditions for several periods of time, after which tests were carried out to evaluate the resistance and degradation state of the different solutions. The mortars used were produced in Lusomapei laboratories. The experimental study was conducted at Itecons laboratory facilities.

The results obtained suggest that, through the optimized immersion test method in concentrated sulfuric acid, it is possible to reproduce, in an accelerated way, the type of degradation observed in coating mortars of sewer systems, and it can be used in the comparative study of mortars. As a result of the comparative study, it was verified that the commercial mortar Mapei Sewament 10 was superior to the reference mortar. It was also verified that the epoxy paint transmits a great increase of resistance to sulfuric acid, being however very sensible to superficial defects.

Keywords: Sewer systems, Coating mortar, Epoxy coating, Acid resistance

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	ii
ABSTRACT	iii
ÍNDICE.....	iv
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Enquadramento	1
1.2. Objetivos.....	3
1.3. Estrutura da tese.....	4
2. ESTADO DA ARTE.....	5
2.1. Identificação do problema.....	5
2.2. Avaliação da durabilidade dos sistemas	5
2.3. Aspetos económicos e ambientais	7
3. MATERIAIS E MÉTODOS	9
3.1. Descrição dos produtos testados	9
3.1.1. Argamassa de referência realizada com cimento pozolânico tipo IV - REF	9
3.1.2. Argamassa de elevada resistência química Mapei Sewament 10 – SM10.....	11
3.1.3. Pintura epoxídica bicomponente anti-ácida Mapei Mapecoat I 24.....	13
3.2. Preparação de provetes	14
3.2.1. Amassadura das argamassas.....	15
3.2.1.1. Amassaduras da argamassa de referência REF	15
3.2.1.2. Amassaduras da argamassa de elevada resistência química SM10.....	16
3.2.2. Preparação dos provetes de argamassa.....	16
3.2.3. Cura dos provetes de argamassa.....	17
3.2.4. Pintura epoxídica dos provetes de argamassa	17
3.2.5. Criação de defeitos na pintura epoxídica dos provetes de argamassa.....	20
3.3. Ensaio de resistência ao ácido sulfúrico.....	21
3.4. Ensaio físicos e mecânicos	23
3.4.1. Medição de massa dos provetes	24
3.4.2. Preparação e corte dos provetes	24
3.4.3. Medição dimensional dos provetes após ensaio químico.	25
3.4.4. Medição de resistência à compressão dos provetes	25
3.4.5. Medição de espessura seca da pintura epóxi.....	26
4. OTIMIZAÇÃO DO TESTE DE RESISTÊNCIA AO ÁCIDO SULFÚRICO	27
4.1. Campanha experimental 1	27
4.2. Campanha experimental 2	29
4.3. Campanha experimental 3	32
5. ESTUDO COMPARATIVO DAS SOLUÇÕES DE REVESTIMENTO.....	35
5.1. Argamassas não revestidas	35
5.1.1. Variação dimensional dos provetes.....	36
5.1.2. Variação de massa dos provetes.....	37

5.1.3.	Grau de corrosão de provetes na seção de corte.....	39
5.1.4.	Resistência à compressão dos provetes após imersão.....	41
5.2.	Argamassas revestidas com pintura epoxídica	45
5.2.1.	Variação de massa de provetes.....	46
5.2.2.	Análise visual dos defeitos superficiais dos provetes	47
5.2.3.	Medição da espessura seca da pintura epoxídica	51
6.	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	54
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	56
8.	ANEXOS	60
8.1.	Anexo A – Descrição das soluções de teste, medições de pH efetuadas e respetivas correções	A - 1
8.2.	Anexo B – Medições detalhadas de provetes após imersão	B - 1
8.3.	Anexo C – Registo fotográfico de provetes revestidos com pintura epóxi, após ensaios de imersão.	C - 1

1. INTRODUÇÃO

1.1. Enquadramento

Os sistemas de saneamento, onde se incluem, por exemplo, condutas de drenagem, caixas de visita e diversos órgãos responsáveis por operações de tratamento, são infraestruturas essenciais para o normal funcionamento dos aglomerados urbanos, garantindo o transporte e o tratamento das águas residuais geradas pela atividade humana. Reconhece-se, contudo, que os produtos de revestimento aplicados correntemente no interior destes sistemas são, em geral, muito suscetíveis à degradação, fruto da elevada agressividade do ambiente químico proporcionado pelas águas residuais, conduzindo, frequentemente, à necessidade de realizar intervenções de elevada complexidade.

Os efluentes residuais urbanos podem ter diversas origens (e.g. doméstica, industrial ou pluvial), variando significativamente na sua composição química e biológica. Ainda assim, uma das causas mais comuns da degradação dos sistemas de saneamento é a formação, no interior das condutas e órgãos, de ácidos fortes responsáveis pela dissolução de cargas minerais. De facto, o principal mecanismo de deterioração em infraestruturas de saneamento é o ataque por ácido sulfúrico, conforme esquematizado na Figura 1.1 [1]. Estes sistemas são suscetíveis à formação de gás sulfídrico (H_2S) proveniente da ação redutora de bactérias anaeróbicas (e.g. Desulfovibrio, Desulfobacter e Desulfomonas) sobre compostos orgânicos ou inorgânicos de enxofre presentes nas águas residuais. Os sistemas estão, adicionalmente, sujeitos à ação de bactérias aeróbicas (e.g. Thiobacillus thiooxidans e Thiobacillus concretivorus) que são responsáveis pela oxidação do H_2S em ácido sulfúrico (H_2SO_4), cujo valor de pH poderá rondar a unidade. Uma vez que essas bactérias necessitam da presença de oxigénio, a ação oxidante dessas bactérias costuma ocasionar corrosão mais intensa na parte superior de tubagens e órgãos. A corrosão produzida nos materiais caracteriza-se, geralmente, pelo desgaste da superfície e pelo aumento da porosidade, com um agravamento progressivo ao longo do tempo (Figura 1.2).

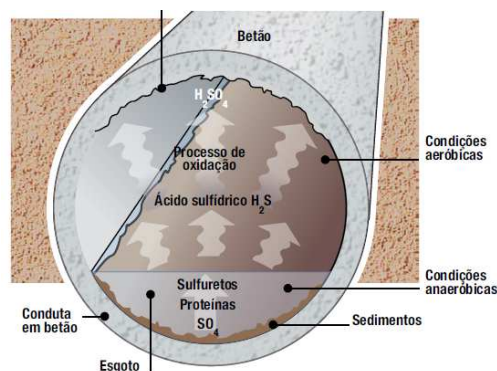


Figura 1.1 Esquema simplificado da formação de ácido sulfúrico num sistema de saneamento. Adaptado de caderno técnico “A reabilitação dos sistemas de saneamento”, Mapei, 2017 [1].



Figura 1.2 – Registo fotográfico evidenciando a degradação de (a) interior de caixa de visita de águas residuais e (b) interior de decantador de ETAR.

Acresce, ao problema identificado, o elevado desconhecimento sobre a efetiva resistência química dos materiais aplicados neste tipo de ambientes em resultado da inexistência de metodologias de ensaio devidamente validadas. De facto, não são conhecidos referenciais ou métodos de ensaio normalizados que permitam avaliar e comparar o desempenho de argamassas destinadas aos sistemas de saneamento. Torna-se, por isso, difícil estabelecer uma relação entre as características dos produtos existentes e a sua durabilidade quando aplicados em sistemas de saneamento sujeitos a condições ambientais muito agressivas.

De acordo com dados de 2014, Portugal possui cerca de 450 aglomerações de águas residuais urbanas que servem mais de 2 000 habitantes equivalentes, que geraram uma carga total de 12 035 660 habitantes equivalentes (Figura 1.3). Ainda de acordo com dados de 2016, divulgados pela Eurostat, no espaço da União Europeia existem cerca de 47 mil ETAR e, apenas na Alemanha, estima-se um gasto de cerca de 100 milhões de euros por ano na recuperação dos coletores de esgotos [2].

De acordo com o PEAASAR - Plano Estratégico de Abastecimento de Água e de Saneamento de Águas Residuais (2007-2013) [3], um dos principais problemas de natureza operacional por resolver é o elevado nível de envelhecimento precoce e de degradação de muitos sistemas, com grande número de avarias, implicando a necessidade de reparações e de interrupções de funcionamento, em consequência de ausência de estratégia de gestão patrimonial das infraestruturas.

A prevenção de falhas nos elementos construtivos que constituem os sistemas de saneamento, partindo da fase de construção até à manutenção das infraestruturas mais antigas, é fundamental para garantir a segurança sanitária das populações e a proteção dos ecossistemas envolventes, nomeadamente os solos, as águas superficiais e subterrâneas, a fauna e a flora. Por outro lado, o crescimento demográfico que se tem registado a nível global, sobretudo nos países em desenvolvimento, leva ao aumento das exigências impostas a este tipo de infraestruturas, sendo cada vez mais relevante a implementação de soluções que garantam uma resposta adequada ao aumento das zonas urbanas, que se apresentem viáveis do ponto de vista técnico e económico. De acordo com o PENSAAR 2020 - Uma nova Estratégia para o Setor de Abastecimento de Água e Saneamento de Águas Residuais [4], com base em análises multicritério tendo em vista a redução de colapsos estruturais dos coletores ou a ocorrência de inundações com água residual, são sugeridos como objetivos operacionais a substituição ou reabilitação de coletores em elevado estado de degradação, reabilitação de câmaras de visita, implementação de rotinas de limpeza de coletores, etc.

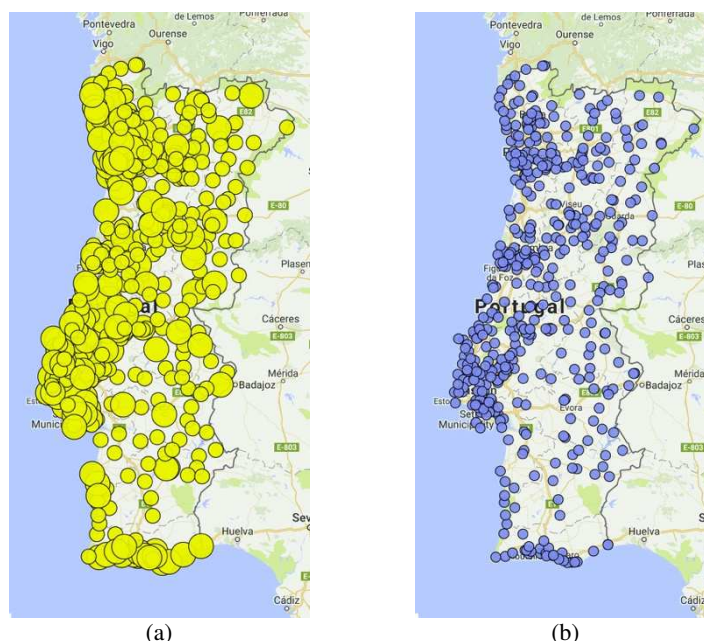


Figura 1.3 – Distribuição geográfica de (a) aglomerações de águas residuais urbanas e (b) respetivas estações de tratamento com mais de 2 000 habitantes equivalentes no território de Portugal (Adaptado de European Commission Urban Waste Water Website: Portugal. Disponível em URL: <http://uwwd.oieau.fr/Portugal/> (Acedido em janeiro de 2018).

1.2. Objetivos

Tendo bem presente o problema descrito no enquadramento, no que respeita à degradação precoce dos revestimentos das infraestruturas de saneamento que asseguram o transporte e garantem o tratamento das águas residuais geradas pela atividade humana, pretendeu-se com este trabalho implementar um teste de resistência ao ácido sulfúrico capaz de reproduzir, de forma acelerada, o tipo de anomalias observadas em revestimentos de sistemas de saneamento, como caixas de visita, condutas e órgãos de estações de tratamento de águas residuais (ETAR). Pretendeu-se, também, realizar um estudo comparativo de várias argamassas, nomeadamente uma argamassa de referência e uma argamassa comercial com maior resistência aos ácidos, bem como um revestimento polimérico à base de resinas epoxídicas. Foi também alvo de análise a importância da ocorrência de pontos frágeis decorrentes da incorreta aplicação do revestimento epóxi, pelo que foi realizada a simulação de defeitos na pintura para verificar o seu efeito na durabilidade da solução.

As argamassas utilizadas foram produzidas nos laboratórios da Lusomapei, a partir de um produto de referência e de um produto com elevada resistência química. O estudo experimental foi conduzido nas instalações laboratoriais do Itecons, recorrendo a equipamento calibrado e, sempre que possível, a metodologias de ensaios normalizadas. Os testes consistiram na imersão dos provetes em soluções de ácido sulfúrico concentrado em condições de agitação moderada por períodos de tempo variáveis, após os quais foram realizados ensaios para avaliar a resistência e o respetivo estado de degradação das várias soluções.

1.3. Estrutura da tese

Esta tese encontra-se dividida em cinco capítulos principais. No primeiro capítulo é feito um enquadramento do tema, nomeadamente no que respeita ao problema de resistência química que afeta extensivamente os sistemas de saneamento. Descrevem-se, ainda, de forma sumária, os principais objetivos do trabalho e a estrutura da tese. No capítulo seguinte apresenta-se uma extensa revisão de estudos relacionados com o problema identificado, procurando aferir as principais causas da degradação, bem como as principais estratégias que têm sido analisadas com o intuito de responder a este problema. No capítulo “Materiais e Métodos” descreve-se com rigor as metodologias adotadas, as condições de estudo empregues na persecução dos ensaios, bem como os materiais estudados. No capítulo “Otimização do teste de resistência ao ácido sulfúrico” descrevem-se todos os trabalhos realizados para a correta definição, implementação e otimização da metodologia de realização dos ensaios de degradação química por imersão em ácido. No capítulo “Estudo comparativo das soluções de revestimento” apresentam-se e analisam-se os resultados obtidos para diferentes argamassas, com e sem revestimento epóxi, após imersão em condições ácidas. No capítulo “Considerações finais” são apresentadas considerações globais sobre o conteúdo da dissertação.

2. ESTADO DA ARTE

2.1. Identificação do problema

O crescimento demográfico e o aumento da densidade populacional nas cidades exigem medidas extraordinárias que garantam o bom estado de funcionamento dos sistemas de saneamento, sendo cada vez mais relevante a implementação de soluções que proporcionem uma elevada durabilidade das redes e órgãos dedicados ao transporte e tratamento de águas residuais. Devido ao elevado nível de envelhecimento e de degradação de muitos sistemas de saneamento urbano, em consequência da ausência de estratégias adequadas de gestão patrimonial das infraestruturas, são, frequentemente, registadas falhas nos sistemas, com implicações graves em termos ambientais e de saúde pública. Esta reflexão é apresentada no PEAASAR [3], tendo sido referido o elevado nível de envelhecimento precoce de muitos sistemas, com grande número de avarias e implicando a necessidade de interrupções de funcionamento, como um dos principais problemas de natureza operacional por resolver. De acordo com uma pesquisa desenvolvida por Kaminsky e Javernick-Will [5], existem cerca de 40 fatores que contribuem para a sustentabilidade dos sistemas de saneamento, onde se incluem fatores de ordem económica, organizacional, intelectual, motivacional, tecnológica e outros. Do ponto de vista tecnológico, um dos principais fatores é a qualidade dos materiais utilizados nos sistemas de saneamento. Ainda de acordo com o PENSAAR 2020 [4], tendo em vista a redução de colapsos estruturais dos coletores ou a ocorrência de inundações com água residual, são sugeridos como objetivos operacionais a substituição ou reabilitação de coletores em elevado estado de degradação, reabilitação de câmaras de visita, implementação de rotinas de limpeza de coletores, etc.

2.2. Avaliação da durabilidade dos sistemas

Têm vindo a ser desenvolvidos diversos modelos para previsão do tempo de vida útil dos sistemas de saneamento, importantes para estabelecer uma análise do seu desempenho, para a manutenção, reabilitação, ou até para fornecer informações importantes em fase de projeto [6-8]. Marzouk e Othman [9], por exemplo, desenvolveram modelos para o planeamento de sistemas de saneamento sustentáveis, recorrendo a modelação BIM (Building Information Modeling), BPM (Building Performance Modeling) e outros tipos de simulação computacional. Os modelos desenvolvidos permitiram identificar uma metodologia para melhorar a sustentabilidade dos sistemas. Foi também desenvolvida, por estes autores, uma ferramenta de simulação para monitorização do desempenho e condições do sistema. Esta ferramenta permite identificar falhas e orientar o operador para a solução de reabilitação mais adequada. Vieira e Baptista [10] identificaram os indicadores de desempenho para melhoria dos serviços de saneamento básico, fundamentados nas exigências das diretivas europeias e, consequentemente, no PEAASAR. Estes indicadores incluem aspetos como a quantificação da reabilitação de coletores e ramais de ligação e de colapsos estruturais em coletores.

No sentido de prever a degradação destes sistemas, foram desenvolvidos, por alguns autores, modelos de simulação da degradação do betão induzida por ataque químico e biológico. Yuan et al. [11] propuseram um modelo para simular os processos de degradação do betão em contacto com sulfureto de hidrogénio no estado gasoso e com bactérias agressivas pela

oxidação de compostos de enxofre, (SOB, do inglês *Sulfur Oxidizing Bacteria*), considerando que o processo de degradação consiste em 3 etapas: (i) neutralização da superfície do betão, criando condições para as SOB se desenvolverem; (ii) produção de ácido sulfúrico pelas SOB na superfície do betão; e (iii) reação química entre o ácido sulfúrico e os produtos resultantes da hidratação do cimento. O modelo desenvolvido permitiu prever a profundidade de degradação e a evolução da composição dos elementos sólidos, tendo sido validado por comparação com resultados experimentais.

Grengg et al. [12] estabeleceram uma relação entre a distribuição microbiológica na superfície de betão degradado, proveniente de sistemas de saneamento, com as suas características químicas, mineralógicas e macroestruturais. Verificaram, a partir de amostras recolhidas com uma profundidade de corrosão de 4 cm, que existe uma relação direta entre a atividade microbiológica e a deposição de ferro. Segundo este estudo, a presença de ferro potencia a produção de H_2SO_4 em camadas interiores e deterioradas do betão e em condições anaeróbias. Neste sentido, propuseram um modelo de previsão segundo o qual a produção de ácido induzida pela atividade biológica é um fator fundamental para a corrosão do betão. Previamente, os mesmos autores tinham já identificado como principais compostos presentes num betão proveniente de um sistema de saneamento, sulfureto de hidrogénio e sulfatos em concentrações elevadas, indicadores da presença de SOB.

O'Connell et al. [13] efetuaram uma revisão bibliográfica acerca da degradação do betão induzida pelo ataque bioquímico que ocorre nos sistemas de saneamento e verificaram que a maioria dos estudos realizados neste âmbito podem ser agrupados em 3 conjuntos: estudos acerca dos processos biológicos associados à corrosão dos sistemas de saneamento, com ênfase sobre o papel das bactérias responsáveis pela redução e oxidação de sulfatos; estudos acerca dos efeitos químicos dos sulfatos e do ácido sulfúrico no betão e estudos laboratoriais acerca do efeito de micro-organismos no betão. Verificaram também que, apesar de os ensaios químicos, por si só, não serem representativos dos efeitos do ataque biológico no betão, permitem compreender o tipo de patologias que podem surgir. Por outro lado, o aparato experimental necessário para simular as condições de exposição aos agentes biológicos e químicos pode revelar-se demasiado complexo e oneroso. No que respeita à corrosão induzida no betão por efluentes residuais, verifica-se existir muito pouca informação disponível acerca de métodos que permitam estimar a degradação provocada em condições reais.

O efeito da exposição de betões e argamassas aos agentes de degradação mais comuns dos sistemas de saneamento foi estudado, do ponto de vista experimental, em condições laboratoriais, por vários autores [14]. Miyamoto et al. [15] expuseram um betão comum a três tipos diferentes de ácido: ácido clorídrico, ácido nítrico e ácido sulfúrico e mediram a quantidade de compostos resultantes da reação destes com o betão (geralmente cloreto de cálcio e gesso). Belie et al. [16] desenvolveram um estudo semelhante, avaliando o efeito da imersão cíclica em soluções ácidas e posterior abrasão. Verificaram que a origem do agregado tem uma forte influência na resistência do betão, sendo os agregados calcários os que apresentam melhor desempenho, e também que o método construtivo dos elementos de betão implica variações na relação água/cimento e conseqüente absorção de água e suscetibilidade à degradação. Magdy et al. [17] estudaram a degradação induzida pelo ataque químico da amónia e sais de amónia em betões com diferentes tipos de cimento. Verificaram que o cimento do tipo HSC (cimento com escórias de alto forno) apresenta, ao contrário dos restantes tipos, uma resistência elevada ao ataque químico pela amónia.

No setor da construção, os revestimentos são os principais responsáveis pela durabilidade global da construção, pelo que o seu desempenho enquanto elemento protetor do conjunto da solução construtiva tem consequências diretas do ponto de vista económico e ambiental. A resistência de betões e argamassas ao ataque por sulfatos tem sido tratada. De facto, os sulfatos presentes nas águas residuais que circulam no interior dos sistemas de saneamento podem reagir com a matriz cimentícia dando origem à formação de etringite secundária que, devido ao aumento de volume, é responsável pela criação de fortes pressões internas, provocando delaminações, fissurações e destacamentos na superfície. A ação do ácido sulfúrico, por sua vez, excede amplamente os efeitos produzidos pela presença de sulfatos, sendo mesmo responsável pela corrosão da matriz cimentícia [18].

2.3. Aspetos económicos e ambientais

Em termos económicos, importa destacar a extensão das redes de drenagem e o número de órgãos envolvidos no transporte e tratamento de águas residuais urbanas tanto a nível nacional como internacional, cujo bom estado de funcionamento depende de intervenções periódicas para fins de manutenção e reabilitação. Só na Alemanha, estima-se um gasto de cerca de 100 milhões de euros por ano na recuperação dos coletores de esgotos [2].

Este mesmo problema existe nos Estados Unidos da América, sendo que em 1996, unicamente no condado de Los Angeles foram gastos 520 milhões de dólares na reabilitação de sistemas de esgotos. Em 2002 estimou-se que seria necessário gastar 390 mil milhões de dólares ao longo dos 20 anos seguintes e em todo o país, para manter as infraestruturas de saneamento existentes em funcionamento. [19]

Em termos ambientais, as falhas nas estruturas que constituem as redes dos sistemas de saneamento poderão ter consequências nefastas, porque afetam todos os elementos dos ecossistemas existentes. A libertação dos produtos que circulam no interior destes sistemas para o meio ambiente, sem tratamento prévio, podem levar à contaminação de solos e águas superficiais e subterrâneas, afetando de forma direta e indireta a fauna e flora existentes, bem como por em risco a saúde pública.

Considerando as atuais exigências deste mercado, têm sido elaborados diversos estudos acerca de argamassas de revestimento e elementos construtivos de base cimentícia que têm em vista, não só o desenvolvimento de soluções inovadoras e eficientes, mas também que reflitam, de algum modo, as preocupações ambientais emergentes [20-21]. Do ponto de vista da identificação de soluções para a minimização/mitigação dos efeitos da exposição ao ataque bioquímico que ocorre no betão exposto a águas residuais têm sido elaborados alguns estudos, nomeadamente em termos da composição dos betões [22-25]. A eficácia do tratamento do betão com compostos anti-microbiológicos, tais como fibras poliméricas, nanopartículas de óxidos de zinco e prata, dióxido de titânio e bactericidas também tem sido analisada por alguns autores [26-29].

Estão já disponíveis outro tipo de soluções comerciais [30], no entanto existe pouca informação acerca da sua eficácia, nomeadamente revestimentos termoplásticos ancorados, com folha aderente de PVC, revestimentos cimentícios resistentes a ácidos, revestimentos

líquidos poliméricos para proteção do betão, revestimentos tubulares curados in situ, revestimentos tubulares deformados, folhas termoplásticas segmentadas, entre outros.

No que diz respeito aos revestimentos poliméricos à base de resinas epoxídicas, a sua resistência química é uma vantagem importante para a utilização em sistemas de saneamento. No entanto, para que estes sistemas tenham uma elevada durabilidade, é necessário cumprir vários pré-requisitos muito exigentes, que por vezes são difíceis de garantir numa obra, nomeadamente uma mão-de-obra qualificada, uma superfície de aplicação adequadamente preparada, um baixo teor de humidade do suporte, e uma adequada pormenorização, entre outros [31]. Caso algumas destas condições não sejam seguidas, poderão ocorrer defeitos nos revestimentos que podem acelerar a sua degradação.

Denota-se a necessidade de estabelecer um ensaio sistemático que permita reproduzir, de forma acelerada, a degradação provocada pelo ácido sulfúrico formado no interior dos sistemas de saneamento. Este ensaio deverá ser simples de executar e permitir comparar a prestação de argamassas técnicas e outros revestimentos destinados a este tipo de aplicações.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Numa fase inicial, foram realizados estudos com o objetivo de otimizar uma metodologia que permitisse recriar, em laboratório, condições propensas para o desenvolvimento do mesmo tipo de anomalias observadas nos revestimentos dos sistemas de saneamento em condições reais. Esta metodologia foi, posteriormente, aplicada no envelhecimento de provetes de diferentes soluções técnicas, com o objetivo de avaliar a evolução do estado de degradação das mesmas ao longo do tempo. Apresentam-se no Quadro 3.1 as soluções que foram objeto de estudo.

Quadro 3.1: Soluções técnicas ensaiadas

Referência	Descrição da solução
REF	Argamassa de referência realizada com cimento pozolânico tipo IV, por ser mais resistente em ambientes agressivos
SM10	Argamassa de elevada resistência química Mapei Sewament 10
REF+EPOXI	Argamassa de referência revestida com pintura epoxídica bicomponente anti-ácida Mapei Mapecoat I 24
SM10+EPOXI	Argamassa de elevada resistência química Mapei Sewament 10 revestida com pintura epoxídica bicomponente anti-ácida Mapei Mapecoat I 24
REF+EPOXI+DEFEITOS	Argamassa de referência revestida com pintura epoxídica bicomponente anti-ácida Mapei Mapecoat I 24, com defeitos induzidos na pintura
SM10+EPOXI+DEFEITOS	Argamassa de elevada resistência química Mapei Sewament 10 revestida com pintura epoxídica bicomponente anti-ácida Mapei Mapecoat I 24, com defeitos induzidos na pintura

Descrevem-se de seguida os produtos testados, a preparação de provetes e os métodos aplicados nos ensaios químicos e físicos.

3.1. Descrição dos produtos testados

3.1.1. Argamassa de referência realizada com cimento pozolânico tipo IV - REF

Como argamassa de referência para o presente estudo, optou-se por uma argamassa realizada com cimento tipo IV, chamado cimento pozolânico de acordo com a norma EN 197-1 e produzida em conformidade com a EN 196-1 (2006) [32].

A argamassa foi realizada com areia normalizada CEN (Comité Europeu de Normalização), de origem francesa, conforme figura 3.1.



Figura 3.1 – Areia normalizada CEN.

Trata-se de uma areia normalizada natural, siliciosa, com grão arredondado e com percentagem de sílica superior a 98%. A sua distribuição granulométrica é apresentada no quadro 3.2.

Quadro 3.2 Distribuição granulométrica da areia normalizada CEN

Abertura dos peneiros com malha quadrada (mm)	2,00	1,60	1,00	0,50	0,16	0,08
Resíduos acumulados (%)	0	7 ± 5	33 ± 5	67 ± 5	87 ± 5	99 ± 1

A composição da argamassa REF corresponde a um traço em massa de 1:3:0,5, correspondendo assim a 1 parte de cimento, 3 partes de areia, 0,5 partes de água, ou seja: 450 gramas de cimento, 1350 gramas de areia normalizada e 225 gramas de água.

Optou-se pela utilização do cimento pozolânico CEM IV/A (V) 32,5R SR, da Secil [33 e 34], que é um cimento de alta resistência química utilizado no fabrico de betões e argamassas sujeitos a ambientes agressivos e em obras com exigências específicas de durabilidade. A composição do Produto (Núcleo Cimento) é a seguinte: 65% a 89% Clínquer Portland, 11% a 35% Cinzas Volantes e 0% a 5% Outros Constituintes. De acordo com o fabricante, trata-se de um cimento de cor cinzenta, com baixo calor de hidratação e de muito elevada resistência a ataques químicos. Tem um desenvolvimento de resistências mais rápido que um cimento do mesmo tipo e da classe 32,5N. Este cimento é especialmente indicado para fundações diretas e indiretas, túneis, depósitos e outros elementos em ambiente agressivo (águas ricas em sais prejudiciais); obras em ambientes marítimos; pavimentos industriais e superfícies sujeitas a ataques químicos (óleos, águas ácidas); betões para pavimentos rodoviários; obras de betão em grande massa, tais como barragens, encontros, etc.

A escolha de um cimento tipo IV foi alvo de ponderação, no âmbito deste trabalho. Analisando o espectro atual e dos últimos 10 anos do betão utilizado em Portugal, verificamos que, para a sua produção, o tipo de cimento mais utilizado tem sido o CEM II/A-L 42,5. Em grande parte das obras, especialmente onde é necessário atingir elevadas classes de exposição ambiental, são normalmente utilizadas em central adições de vários tipos, como cinzas volantes. Deste modo, e de acordo com a norma NP EN 206-1 (2007) [35] e a especificação do LNEC E-464 (2016) [36], é possível transformar o cimento tipo II num ligante equivalente tipo IV. Assim, com a utilização do cimento tipo IV, conseguimos não só aproximar-nos do tipo de ligante mais utilizado correntemente na tipologia de obras de saneamento, como

também ter uma argamassa de referência com um comportamento melhorado no que diz respeito ao comportamento em ambientes agressivos, alvo deste estudo.

3.1.2. Argamassa de elevada resistência química Mapei Sewament 10 – SM10

No presente trabalho foi utilizada uma argamassa de elevada resistência química, produzida pela Mapei – Sewament 10 [37], que faz parte de uma família de produtos específicos e dedicados à reabilitação e proteção de sistemas de esgotos, apresentados no Quadro 3.3.

Quadro 3.3 – Produtos Mapei da gama Sewament

Sewament 10	Argamassa cimentícia monocomponente fibro-reforçada de presa normal para a reparação e proteção de sistemas de esgotos
Sewament 40	Argamassa cimentícia monocomponente fibro-reforçada de presa e endurecimento rápido
Sewament 100	Argamassa cimentícia bicomponente fibro-reforçada de presa normal
Sewament 1	Adesivo cimentício de elevadas prestações, de presa rápida, deslizamento nulo e elevada resistência química, para o assentamento de revestimentos cerâmicos em estações de tratamento e esgotos
Sewament 2	Argamassa cimentícia de elevadas prestações para a betumação de revestimentos cerâmicos em sistemas de saneamento e condutas de esgotos (largura da junta até 15 mm)

Dentro desta gama, optou-se neste trabalho por estudar a argamassa Sewament 10, devido ao facto de ser aquela que tem um maior volume de vendas em Portugal, tendo por isso relevância acrescida para a realidade do mercado nacional. Como exemplos de aplicação, vejam-se os revestimentos de um decantador de uma ETAR e de uma caixa de visita com Sewament 10 (Figuras 3.2 e 3.3).



Figura 3.2 - Revestimento de decantador de uma ETAR com Sewament 10.



Figura 3.3 - Revestimento de interior de uma caixa de visita com Sewament 10.

O Sewament 10 é uma argamassa cimentícia mono-componente fibro-reforçada para a reparação e proteção de sistemas de esgotos. Como campos de aplicação usuais para esta argamassa, podemos referir a reparação do betão degradado em estações de tratamento de águas residuais urbanas, a reparação e proteção de betão realizado em obra ou pré-fabricado, em redes de esgotos e em estações de tratamento de águas residuais.

Sewament 10 é uma argamassa pré-misturada em pó, composta por ligantes hidráulicos especiais, nomeadamente cimento Portland e óxido de cálcio, inertes de quartzo selecionados, aditivos especiais e fibras sintéticas. Após a mistura com água, Sewament 10 transforma-se numa argamassa de consistência tixotrópica, fácil de trabalhar, quer manualmente, quer por projeção com máquina, por pelo menos 45 minutos à temperatura de +23°C. Sewament 10 pode ser aplicado em espessuras entre 10 e 20 mm por camada. Espessuras maiores devem ser executadas em mais demãos.

Segundo a documentação técnica da Mapei, Sewament 10 tem uma resistência superior à agressão química produzida pelo ácido sulfúrico. A resistência à agressão química desta argamassa, foi analisada pelo Departamento de Microbiologia do Instituto de Botânica da Universidade de Hamburgo [38], que submeteu Sewament 10 a condições de agressividade oito vezes superiores em relação aquelas que, geralmente, se verificam nos sistemas de esgotos de uma grande cidade industrial. Os testes acelerados, que duraram nove meses, foram executados em câmaras biológicas capazes de reproduzir as condições de acidez, fruto da inoculação de bactérias (*Thiobacillus thiooxidans*, *Thiobacillus neaplitanus*, *Thiobacillus novellus*, *Thiobacillus intermedius*) isoladas de um sistema de tratamento de esgotos muito corroído.

Sewament 10 responde aos princípios definidos na NP EN 1504-9 (2009) [39] e aos requisitos mínimos definidos pela NP EN 1504-3 (2006) [40] (Reparação estrutural e não estrutural) para argamassas estruturais da classe R3. Apresentam-se no Quadro 3.4 as características prestacionais da mesma, tal como são descritas pelo fabricante.

Quadro 3.4 Características prestacionais da argamassa Mapei Sewament 10

Características	Prestação do produto
Massa volúmica da mistura (kg/m ³)	2.000 ÷ 2.200
pH da mistura	> 12
Tempo de trabalhabilidade	60' (a +5°C), 45' (a +23°C), 30' (a +30°C)
Resistência à compressão (+23°C e 50% H.R.) (N/mm ²)	35 (após 28 dias)
Resistência à flexão (+23°C e 50% H.R.) (N/mm ²)	> 6 (após 28 dias)
Resistência à compressão (+10°C e 90% H.R.) (N/mm ²)	> 15 (após 7 dias)
Resistência à flexão a (+10°C e 90% H.R.) (N/mm ²)	> 4 (após 7 dias)
Tempo para a colocação em exercício	10 dias (a +5°C), 7 dias (a +10°C), 3 dias (a +20°C)
Aderência direta ao betão a (+23°C e 50% H.R.) (N/mm ²)	
- Aplicação manual sobre suporte tratado com SEWAMENT 3 PRIMER	> 1,5 (após 28 dias)
- Aplicação por projeção sobre suporte não tratado com SEWAMENT 3 PRIMER	> 1,5 (após 28 dias)
Consumo (kg/m ²)	cerca de 18,5 (por cm de espessura)

3.1.3. Pintura epoxídica bicomponente anti-ácida Mapei Mapecoat I 24

Foi também alvo de estudo um revestimento polimérico de elevada resistência química, Mapecoat I 24 [41], pintura epoxídica bicomponente para o revestimento antiácido de superfícies em betão, aplicado em provetes realizados com a argamassa de referência e com a argamassa de elevada resistência química, de acordo com o Quadro 3.5.

Quadro 3.5 - Soluções técnicas ensaiadas com pintura epóxi

Referência	Descrição da solução
REF+EPOXI	Argamassa de referência revestida com pintura epoxídica bicomponente anti-ácida Mapei Mapecoat I 24
SM10+EPOXI	Argamassa de elevada resistência química Mapei Sewament 10 revestida com pintura epoxídica bicomponente anti-ácida Mapei Mapecoat I 24

Como campos de aplicação do Mapecoat I 24, podemos identificar a proteção de pavimentos, reservatórios e condutas em betão que se destinam ao contacto com agentes químicos agressivos, tais como ácidos, lixiviados e hidrocarbonetos. Como exemplos de aplicação deste produto, vejam-se os revestimentos do interior de uma caixa de visita e de um elemento de transporte de efluentes de uma ETAR (Figura 3.4).



Figura 3.4 - Revestimento de (a) interior de caixa de visita e de (b) elemento de uma ETAR com Mapecoat I 24.

O Mapecoat I 24 é uma pintura bicomponente, à base de resinas epoxídicas e pigmentos especiais, com elevado poder de cobertura. A sua preparação é realizada através da mistura das 2 partes, vertendo o componente B (endurecedor) no componente A (resina), e misturando com berbequim de baixo número de rotações, até atingir uma homogeneidade completa. Mapecoat I 24 aplica-se a rolo, pincel ou por projeção airless em 2 demãos, sendo necessário aguardar 6 a 24 horas entre demãos, dependendo das condições ambientais. Mapecoat I 24 é transitável após 24 horas, e atinge o seu endurecimento completo após 3 dias. O consumo aconselhável é de 350 a 600 gramas por metro quadrado por demão, pelo que nas 2 demãos previstas, o consumo total estará entre 700 a 1200 gramas por metro quadrado, ao que corresponde uma espessura seca entre 0,54mm e 0,92mm.

Mapecoat I 24 responde aos princípios definidos na NP EN 1504-9 [39] e aos requisitos mínimos definidos pela NP EN 1504-2 (2006) [42] (Revestimento), segundo os princípios PI (Proteção contra ingresso), MC (Controlo de humidade), IR (Aumento da resistividade por limitação do teor de humidade), PR (Resistência física, melhoria da superfície) e RC (Resistência aos produtos químicos).

3.2. Preparação de provetes

A preparação dos provetes foi realizada no laboratório da Lusomapei, localizado em Anadia, utilizando, entre outros, os seguintes materiais e equipamentos: balança, misturador, cronómetro, espátulas, moldes, compactador normalizado, medidor de humidade e equipamento de lixagem (Figura 3.5).

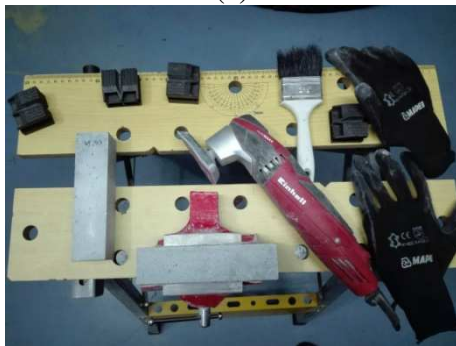




(c)



(d)



(e)

Figura 3.5 – Registo fotográfico de alguns materiais e equipamentos utilizados na preparação dos provetes: (a) Misturador utilizado para a realização das amassaduras; (b) Compactador normalizado; (c) Moldes (40 mm x 40 mm x 160 mm); (d) Aparelho de medição de humidade; (e) Multi-ferramenta equipado com lixadora.

3.2.1. Amassadura das argamassas

Os provetes da argamassa de referência REF foram executados de acordo com a NP EN 196-1 (2006) [32]. Para execução dos provetes da argamassa SM10 foi necessário fazer uma adaptação da norma NP EN 196-1 (2006), visto que para a preparação deste tipo de argamassas apenas é necessário adicionar água. Tal adaptação incidiu nos tempos de funcionamento da misturadora.

Os materiais e equipamentos utilizados na realização das amassaduras das argamassas foram iguais para os 2 tipos de argamassas.

3.2.1.1. Amassaduras da argamassa de referência REF

Conforme descrito anteriormente, a argamassa de referência apresenta a seguinte composição, de acordo com a NP EN 196-1 (2006): 450 gramas de cimento tipo IV, 1.350 gramas de areia normalizada e 225 gramas de água.

As amassaduras foram realizadas de acordo com o seguinte procedimento, especificado na NP EN 196-1, 2006 [32]:

1. Após pesagem de todos os materiais, foi colocada a água e o cimento no recipiente do misturador, tendo o cuidado de evitar perdas de material;

2. Foi colocado de imediato o misturador em funcionamento, durante 30 segundos, na velocidade lenta (140 ± 5 rotações por minuto);
3. Ao longo dos seguintes 30 segundos, adicionou-se a areia normalizada de forma constante;
4. Parou-se o misturador, mudou-se para movimento rápido (285 ± 5 rotações por minuto) e voltou-se a ligar por 30 segundos;
5. Parou-se o misturador durante 90 segundos, retirou-se, com a ajuda de uma espátula, toda a argamassa aderente às paredes e ao fundo do recipiente, envolvendo-a na restante argamassa;
6. Colocou-se novamente o misturador em funcionamento na velocidade rápida (285 ± 5 rotações por minuto), agora por 60 segundos.

3.2.1.2. Amassaduras da argamassa de elevada resistência química SM10

Relativamente à quantidade de água de amassadura do Mapei Sewament 10, a ficha técnica refere um intervalo entre 14 % e 15 % em massa. Deste modo, optou-se por realizar a mistura com 14,5 % de água, ou seja 2000 gramas de Mapei Sewament 10 e 290 gramas de água.

Para a realização das amassaduras respeitou-se o seguinte procedimento, de acordo com a NP EN 196-1, 2006 [32], adaptado no que se refere ao tempo do misturador:

1. Após pesagem de todos os materiais, colocou-se a água e o Mapei Sewament 10 no recipiente, tendo o cuidado de evitar perdas de material;
2. Colocou-se de imediato o misturador em funcionamento, durante 60 segundos, na velocidade lenta (140 ± 5 rotações por minuto);
3. Parou-se o misturador, mudou-se para movimento rápido (285 ± 5 rotações por minuto) e voltou-se a ligar por 30 segundos;
4. Parou-se o misturador durante 90 segundos, retirou-se, com a ajuda de uma espátula, toda a argamassa aderente às paredes e ao fundo do recipiente e envolvendo-a na restante argamassa;
5. Colocou-se novamente o misturador em funcionamento na velocidade rápida, agora por 60 segundos.

3.2.2. Preparação dos provetes de argamassa

Quando se realizou a preparação dos provetes, pretendeu-se que, após a cura, todos apresentassem uma geometria idêntica (a forma do molde), garantindo, desta forma, que os resultados dos vários ensaios fossem comparáveis entre si. Por outro lado, esta operação foi executada imediatamente a seguir à realização da amassadura.

Para a preparação dos provetes de argamassa, foram utilizados moldes prismáticos, de 40 mm x 40 mm x 160 mm, originando cada molde três provetes. Durante o processo de moldagem a argamassa foi compactada, utilizando para o efeito um compactador.

O procedimento seguido para moldagem e compactação foi o seguinte (NP EN 196-1, 2006) [32]:

1. Encheu-se o molde numa primeira camada, com uma colher conveniente, e usando a espátula maior, mantida verticalmente com os seus bordos em contacto com a parte superior da prolonga, fazendo-a passar uma vez para trás e outra para a frente em cada compartimento do molde;
2. Compactou-se a primeira camada com 60 pancadas do compactador;

3. Encheu-se uma segunda camada e nivelou-se com a espátula pequena;
4. Compactou-se de novo com 60 pancadas;
5. Retirou-se a prolonga e o molde com cuidado de cima do compactador e retirou-se o excesso de argamassa do molde utilizando a régua metálica plana com movimentos de cisalhamento;
6. Aplicou-se um vidro sobre os moldes e colocou-se os moldes dentro de um saco de plástico, tendo no seu interior um papel humedecido;
7. Após 24 horas, procedeu-se à desmoldagem dos provetes e efetuou-se a respetiva identificação.

A título de exemplo, apresenta-se na Figura 3.6 o registo fotográfico de 3 provetes após compactação.



Figura 3.6 – Aspeto dos provetes após compactação.

3.2.3. Cura dos provetes de argamassa

A cura dos provetes foi efetuada no laboratório da Lusomapei.

Os provetes de argamassa foram curados por imersão em água, por 28 dias, numa tina colocada no laboratório da Lusomapei, que tem condições ambientais controladas (temperatura de ± 23 °C e humidade relativa de ± 50 %).

3.2.4. Pintura epoxídica dos provetes de argamassa

Como previamente apresentado (Quadro 3.1), alguns dos provetes foram pintados com uma pintura epóxi, Mapei Mapecoat I 24.

Tratando-se de um produto de base epoxídica, tem como característica uma quase nula permeabilidade ao vapor de água e, por isso, uma baixa resistência a teores de humidade no suporte, pelo que tem como regra de aplicação um grau de humidade máximo de 4% no suporte.

Para cumprirmos com estes requisitos, após a cura por 28 dias, procedeu-se à retirada dos provetes de água e à sua secagem ao ar, através da colocação no laboratório da Lusomapei (temperatura de ± 23 °C e humidade relativa de ± 50 %) por mais 28 dias.

Antes de se proceder à pintura, foram realizadas medições com um medidor de humidade de encosto, em todos os provetes.

Para este efeito, foi utilizado um aparelho da marca Gann Hydromette Compact B. Trata-se de um equipamento capaz de medir os teores de humidade de suportes de base cimentícia, de forma não destrutiva, tendo um raio de ação entre os 20 mm e 40 mm de espessura.

As medições permitiram confirmar que o grau de humidade dos provetes estava abaixo dos 4%, tendo sido obtido um valor máximo de aproximadamente 3%.

Verificou-se também, em ensaios prévios, que a presença de óleo descofrante na superfície dos provetes, decorrente do método normalizado de realização dos provetes de argamassa, podia reduzir drasticamente a aderência do revestimento à argamassa, pondo em causa a realização do ensaio.

Esta mesma questão é de extrema importância quando se avalia as condições de aplicabilidade deste tipo de produtos em obra, dando grande ênfase a uma correta preparação do suporte.

Assim, com o objetivo de remover o óleo descofrante, foram realizadas 2 tarefas:

1. após a retirada de imersão, procedeu-se a uma lavagem e escovagem enérgica dos provetes;
2. passados 15 dias da retirada de imersão, precedeu-se à lixagem superficial dos provetes, com equipamento ligeiro, utilizando lixas de grão 60 e 80.

Mesmo com a realização dos provetes com o equipamento adequado, e com uma correta compactação das argamassas, verifica-se sempre a existência de alguns poros na superfície dos provetes. Estes poros podem atingir uma profundidade e diâmetro de cerca de 2mm a 3mm. (Figura 3.7). Este tipo de poros não permite uma correta aplicação da pintura epoxídica, tendo em conta que a sua espessura correta poderá rondar os 0,5 mm, pelo que existe o real risco de os poros não serem totalmente preenchidos e protegidos.

Para evitar este problema, e à semelhança do que é aconselhável realizar numa aplicação em obra, procedemos à aplicação de uma argamassa cimentícia, unicamente para colmatar os poros dos provetes. Para este fim foi utilizada a argamassa Mapei Planitop 100 [43], argamassa fina de presa rápida, para a reparação e regularização de betão. Trata-se de uma argamassa adequada à reparação de superfícies cimentícias porosas, à base de ligantes cimentícios especiais, agregados selecionados de grão fino, aditivos e polímeros. Para garantir um correto preenchimento dos poros, esta argamassa foi aplicada com espátula metálica e com espátula de borracha, sendo que a espátula de borracha tem também a função de remover a argamassa fresca da superfície do provete (Figura 3.8).



Figura 3.7 – Porosidade superficial nos provetes.



Figura 3.8 – Provetes após lixagem e colmatação da porosidade superficial.

Após estas tarefas de preparação dos provetes, e garantindo sempre 7 dias para a secagem da argamassa de colmatação, procedeu-se à pintura integral dos provetes. Tendo em conta a pequena dimensão dos provetes, a pintura foi realizada com trincha. Os provetes foram colocados com os seus lados maiores na vertical, ficando sempre uma face assente na mesa. A tinta foi espalhada de modo a que em todas as faces dos provetes fossem aplicadas no mínimo 2 demãos de tinta.

Na aplicação percebeu-se que não era possível deixar uma grande quantidade de tinta por demão. Verificou-se também que, mesmo com os cuidados com a preparação do suporte, após a 1ª demão, na tinta seca eram perfeitamente visíveis alguns poros abertos (Figura 3.9). Este facto reforça a importância da aplicação da pintura no mínimo de 2 demãos, tal como aconselhado na respetiva ficha técnica.

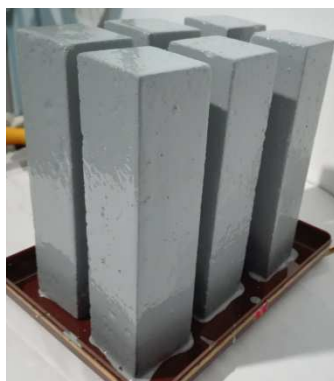


Figura 3.9 – Provetes após 1ª demão de pintura epoxídica.

Após a conclusão da aplicação da pintura epóxi (Figura 3.10), os provetes foram curados por 7 dias.

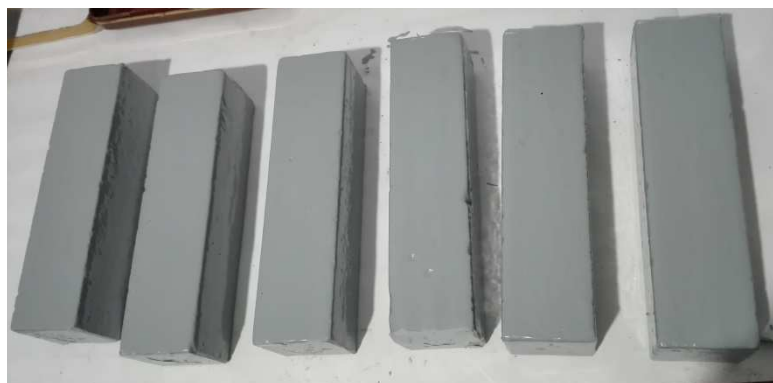


Figura 3.10 – Provetes após aplicação da 2ª demão de pintura epoxídica.

3.2.5. Criação de defeitos na pintura epoxídica dos provetes de argamassa

As vantagens da elevada resistência química da pintura epoxídica só se traduzem numa maior durabilidade da estrutura, na ausência de pontos frágeis decorrentes da sua aplicação. De facto, uma correta aplicação de uma pintura epoxídica necessita de vários cuidados de preparação do suporte, de uma mão-de-obra qualificada e especializada, e de corretas condições e meios de aplicação, algo que em obra nem sempre se consegue garantir. Tendo em consideração estes aspetos, optou-se por simular alguns defeitos na pintura, de modo a que fosse possível analisar o seu efeito na durabilidade da solução completa.

Os defeitos foram produzidos através das furações realizadas com um berbequim equipado com uma broca com 2 mm de diâmetro, perfurando a pintura até chegar à argamassa. Foram realizados furos em todas as faces dos provetes, sendo que em algumas das faces maiores foram realizados 2 furos por face (Figura 3.11).



Figura 3.11 – Provetes com defeitos induzidos com berbequim equipado com broca de 2 mm.

3.3. Ensaios de resistência ao ácido sulfúrico

Estes ensaios consistiram na imersão de provetes em soluções de ácido sulfúrico concentrado, em condições de agitação moderada durante períodos de tempo bem definidos. A otimização das condições de ensaio, com vista à definição de uma metodologia, foi objeto de estudo da presente tese, apresentado no ponto 4.

Assim, numa fase inicial, foram realizados ensaios de imersão de provetes com 40 mm x 40 mm x 17 mm (com e sem pintura epóxi), 30 mm x 30 mm x 30 mm e 80 mm x 40 mm x 40mm em soluções de ácido sulfúrico com $\text{pH} = 0$ (durante 14 dias) e $\text{pH} = 1$ (durante 70 dias). Estes ensaios de otimização seguiram alguns pressupostos do relatório de ensaio de resistência de argamassas à corrosão por ácido sulfúrico apresentado pelo Departamento de Microbiologia do Instituto de Botânica da Universidade de Hamburgo [44]. Assim, seguiu-se as indicações do relatório da Universidade de Hamburgo no que respeita à relação entre área superficial dos provetes e o volume da solução ácida, que deveria ser sempre 20 m^{-1} . Seguiu-se, igualmente, as indicações deste relatório no que respeita aos valores de pH e períodos de imersão máximos.

Com vista à definição do modo de preparação das soluções de ácido sulfúrico com $\text{pH} = 0$ e $\text{pH} = 1$, foram efetuados estudos de diluição de um ácido sulfúrico concentrado (95-97% PA CHEM-LAB, CL0261) com medição de pH ao longo do tempo. As medições de pH das soluções foram realizadas utilizando um medidor de pH digital Selecta PH-2006 PH Meter, calibrado, com capacidade para medir o pH numa escala de -2 a 18. Antes e após cada leitura de pH , o eléctrodo foi verificado contra soluções tampão de compra.

Acontece que o pH destas soluções de teste, quando em contacto com os provetes de argamassa, alcalinos, vai aumentando. Por esta razão, foi necessário perceber a taxa de alteração do valor do pH , de modo a estabelecer um procedimento de intervenção com vista à correção do valor de pH das soluções de teste no decorrer dos ensaios. Ao longo de todos os ensaios, foi definida uma variação máxima de uma décima no valor de pH . As correções de pH foram realizadas através do acréscimo de ácido sulfúrico puro, retirando o mesmo volume de solução de teste do recipiente de ensaio, com o auxílio de pipetas volumétricas, de forma a manter a mesma relação entre o volume de solução de teste e a área de superfície dos

provetes. No Anexo A apresentam-se as quantidades exatas de solução de teste, as medições de pH efetuadas e respetivas correções.

Os resultados dos estudos de otimização da metodologia do ensaio de resistência química são descritos no capítulo 4.

Numa fase posterior, recorrendo à metodologia otimizada, foram realizados ensaios comparativos da resistência e respetivo estado de degradação de várias soluções de revestimento, resultados apresentados no capítulo 5 da presente tese. Estes ensaios foram realizados através da imersão de provetes com 160 mm x 40 mm x 40 mm numa solução de ácido sulfúrico com $\text{pH} = 0$ por períodos de tempo consecutivos iguais a 7, 14 e 21 dias. Note-se que o estudo comparativo não incluiu a imersão dos provetes em solução de ácido sulfúrico com $\text{pH} = 1$ durante 70 dias, tendo em conta que a degradação nestas condições se revelou menos agressiva do que a imersão em solução de ácido sulfúrico com $\text{pH} 0$ por 14 dias (resultados apresentados no capítulo 4).

Para a realização dos estudos descritos foi fundamental selecionar materiais com elevada resistência ao ácido sulfúrico concentrado. Para o efeito foram utilizados recipientes de polipropileno, o mesmo material em que é fornecido o ácido sulfúrico comercial.

Verificou-se, também a necessidade de trabalhar com recipientes fechados, de modo a evitar perdas de volume do ácido por evaporação, responsáveis pela alteração do pH e da relação entre o volume de solução ácida e a área de superfície do provete.

De modo a evitar o contacto dos provetes com o fundo dos recipientes e a criar espaço necessário ao movimento dos magnetos do agitador, foram utilizadas telas de polietileno com grampeamentos, também usadas como revestimento em sistemas de saneamento. Este grampeamento serviu de apoio pontual para os provetes (Figura 3.12).



Figura 3.12 – Caixa em polipropileno com fundo em tela grampeada de polietileno de alta densidade.

De modo a garantir uma homogeneidade da solução no decorrer dos testes, a solução foi mantida em agitação contínua. Para o efeito, foram utilizados 2 tipos de agitadores: agitadores individuais Selecta Agimatic – E, para os ensaios prévios com caixas mais pequenas; e placa de agitação IKA RO 15 para os ensaios de resistência química, em que era necessário ter

várias pontos em agitação simultânea (Figura 3.13). Esta placa tem 15 posições de agitação, permitindo trabalhar com um máximo de 15 magnetos.

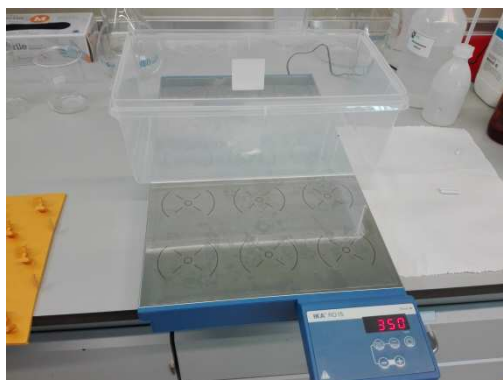


Figura 3.13 – Placa de agitação Ika Ro 15.

Todos os ensaios de resistência química foram efetuados nos laboratórios de química do Itecons. Por questões de segurança, todos os ensaios químicos foram realizados em hotte resistente a ácidos concentrados.

3.4. Ensaios físicos e mecânicos

No final de cada ensaio químico, os provetes de argamassa foram alvo de ensaios físicos e mecânicos, com o objetivo de avaliar a variação dimensional, a variação de massa, o grau de corrosão na seção de corte e a resistência à compressão.

No caso dos provetes revestidos com pintura epoxídica bicomponente anti-ácida, terminados os períodos de imersão, os mesmos foram avaliados em termos de variação de massa, grau de corrosão e de espessura seca da pintura.

Os provetes de argamassa não revestidos foram sujeitos a ensaios diferentes dos provetes de argamassa revestidos com epóxi.

Ensaios realizados com os provetes de argamassa não revestidos:

1. Medição de massa dos provetes antes e após a imersão;
2. Medição de dimensões após imersão e medição de profundidade de ataque químico;
3. Avaliação de resistência à compressão.

Ensaios realizados com os provetes de argamassa revestidos com pintura epóxi, com e sem defeito:

1. Medição de massa dos provetes antes e após a imersão;
2. Análise visual dos defeitos superficiais;
3. Medição da espessura seca da pintura epóxi.

Descrevem-se de seguida todos os ensaios efetuados.

3.4.1. Medição de massa dos provetes

A massa de todos os provetes foi medida antes e após os ensaios de imersão em água e em solução ácida com pH 0.

Os provetes de argamassa não revestidos foram curados por imersão em água, até ao início do ensaio químico. Deste modo a pesagem antes do ensaio e após o ensaio foi efetuada do mesmo modo:

Os provetes foram retirados da água ou da solução ácida, secos superficialmente com papel absorvente, e colocados imediatamente na balança.

No caso dos provetes revestidos com epóxi, a pesagem inicial foi realizada com os provetes secos, sendo que para a pesagem final foi utilizado o mesmo método antes descrito, os provetes foram secos com papel absorvente imediatamente antes da pesagem.

Para este efeito foi utilizada uma balança digital Mettler Toledo, calibrada e com resolução de 2 casas decimais. (Figura 3.14)



Figura 3.14 – Medição de massa realizada com balança digital Mettler Toledo.

3.4.2. Preparação e corte dos provetes

Após o final do ensaio químico, os provetes de argamassa foram colocados durante 2 dias numa câmara climática com temperatura de 20°C e humidade de 60%.

No início do 2º dia, os provetes com dimensões iniciais 160 mm x 40 mm x 40 mm foram cortados com serra circular de mesa, arrefecida a água. Durante o resto do dia, antes do ensaio à compressão, os provetes voltaram à câmara climática, de modo a obter uma secagem superficial da água utilizada no processo de corte.

O objetivo principal do corte foi a obtenção de 3 provetes com uma altura de 40 mm, sendo que as outras 2 dimensões eram já diferentes dos 40 mm iniciais, fruto do ataque químico sofrido.

O corte permitiu também a medição do grau de corrosão na seção de corte.

3.4.3. Medição dimensional dos provetes após ensaio químico.

Após o corte dos provetes, foram realizadas as medições exteriores após ensaio químico (L3 e L4). Estas medições foram efetuadas com paquímetro digital calibrado MITUTOYO.

No caso dos provetes de argamassa de elevada resistência química, após o corte, foi possível verificar que alguns provetes apresentavam uma zona perimetral com aspeto e resistência diferentes do seu núcleo. Deste modo, nestes provetes foi também realizada uma medição do núcleo da argamassa (L1 e L2).

As medições foram realizadas nos 2 eixos perpendiculares dos provetes, e nas 2 faces (Figura 3.15).

Com base nestas medições, obteve-se a variação dimensional exterior dos provetes e o grau de corrosão na seção de corte.

A variação dimensional corresponde à diferença entre a dimensão inicial (40 mm x 40 mm) e a medição exterior efetuada (L3 x L4).

O grau de corrosão corresponde a metade da diferença entre a dimensão inicial (40 mm x 40 mm) e a dimensão do núcleo dos provetes (L1 x L2).

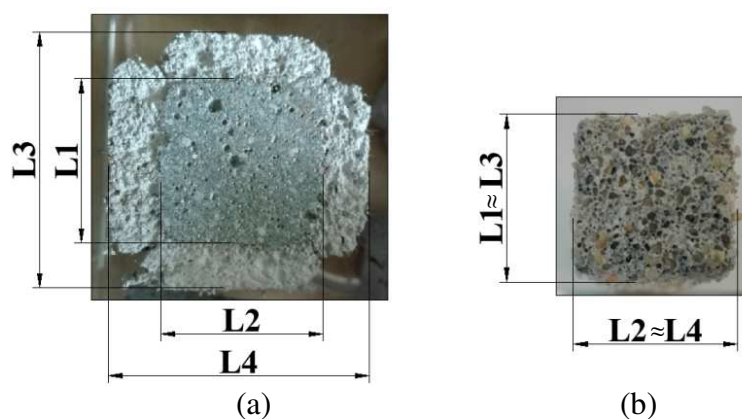


Figura 3.15 – (a) medições efetuadas em provete de elevada resistência química; (b) medições efetuadas em provete de argamassa de referência.

3.4.4. Medição de resistência à compressão dos provetes

Conforme anteriormente indicado, cada provete original foi cortado em 3 provetes com altura de 40 mm, de modo a realizar o ensaio de resistência à compressão sempre com a mesma altura de provetes.

Neste ensaio, o equipamento utilizado foi uma máquina universal da marca Instron, modelo 59R5884, com uma célula de carga de 150 kN. A norma de referência do ensaio é a EN 1015-11 (2007) [45].

Os ensaios foram efetuados no laboratório de argamassas do Itecons.

3.4.5. Medição de espessura seca da pintura epóxi

Alguns provetes em argamassa revestidos com pintura epóxi sofreram uma degradação muito pontual.

Deste modo, para melhor perceber o que pode ter originado a degradação, e também para analisar a espessura seca da pintura epóxi, procedeu-se ao corte de todos os provetes.

Nos provetes que tinham degradação visível, o corte foi efetuado junto às zonas degradadas. Nos restantes o corte foi efetuado a meio do provete.

Após o corte, procedeu-se ao registo fotográfico da secção de corte, tendo sido colocada uma fita métrica classe 2 no mesmo plano (Figura 3.16). Com o auxílio do computador e através do programa Autocad, realizou-se a medição da espessura seca de tinta.



Figura 3.16 – Fotografia da secção de corte.

4. OTIMIZAÇÃO DO TESTE DE RESISTÊNCIA AO ÁCIDO SULFÚRICO

Para estes ensaios, foram preparados e curados provetes de argamassa de referência, de argamassa de elevada resistência química, e também de argamassa de referência revestida com pintura epóxi de acordo com o descrito no capítulo 3.2.

De modo a obter provetes com dimensões menores, os provetes originais com dimensão 160 mm x 40 mm x 40 mm foram cortados através de serra circular com refrigeração a água em provetes com 40 mm x 40 mm x 17 mm, 30 mm x 30 mm x 30 mm e 80 mm x 40 mm x 40 mm.

4.1. Campanha experimental 1

Nesta campanha foram realizados ensaios de resistência química sobre provetes com 40 mm x 40 mm x 17 mm. Sobre estes provetes foram realizados os seguintes ensaios:

- imersão de provete de argamassa de referência em pH 0 durante 14 dias.
- imersão de provete de argamassa Mapei Sewament 10 em pH 0 durante 14 dias.
- imersão de provete de argamassa Mapei Sewament 10 em pH 1 durante 70 dias.

Para o efeito foi utilizado um volume de solução de ácido sulfúrico de 296 ml, correspondendo a uma relação com a área de superfície do provete de 20 m^{-1} . Estes ensaios foram realizados em copos graduados, tapados com vidro de relógio. Apresenta-se um registo fotográfico dos ensaios na Figura 4.1.

Apresenta-se, também, no Quadro 4.1 uma descrição do ensaio.



Figura 4.1 – Registo fotográfico dos estudos de otimização do ensaio de resistência química com provetes de 40 mm x 40 mm x 17 mm.

Quadro 4.1 Descrição da primeira campanha de ensaios

Tipo de provete	Solução de imersão	Tempo de cura	Duração de imersão
Argamassa de referência REF	H ₂ SO ₄ pH 0	28 dias	14 dias
Argamassa Mapei Sewament 10 SM10		28 dias	14 dias
Argamassa de referência REF	H ₂ SO ₄ pH 1	28 dias	-(¹)

(¹) ensaio de imersão com duração prevista de 70 dias interrompido por variação significativa de volume da solução de teste.

Esta campanha de ensaios permitiu estudar a variação de pH da solução de teste devido ao contacto com os provetes alcalinos, com vista a estabelecer a periodicidade das correções necessárias (foi assumido que a variação máxima de pH deveria ser de uma décima de unidade). Os resultados da variação de pH são apresentados no Anexo A.

Permitiu também analisar a taxa de evaporação da solução de teste nas condições de ensaio, condição relevante para a manutenção da relação entre a área de superfície dos provetes e o volume da solução de teste. Constatou-se existir uma variação significativa do volume da solução por evaporação, razão pela qual foi interrompido o ensaio a pH 1, cuja duração prevista era de 70 dias.

Após o ensaio de imersão, os provetes foram sujeitos a uma análise visual e a medição de dimensões após o ensaio, que constam do quadro 4.2.

Quadro 4.2 Medidas de provetes antes e após ensaio

Tipo de provete	Dimensões antes ensaio a x b x c (mm)	Duração de imersão	Dimensões após ensaio a (mm)	Dimensões após ensaio b (mm)	Dimensões após ensaio c (mm)
Argamassa de referência REF	40 x 40 x 17	14 dias	27,7	28,3	7,4
Argamassa Mapei Sewament 10 SM10		14 dias	43,6	44,3	19,8

Através deste ensaio foi possível ter uma ideia do desempenho que os 2 tipos de argamassas têm à imersão em ácido nas condições de ensaio. Verificou-se, assim, que os provetes de argamassa de referência apresentam uma significativa diminuição das dimensões exteriores e uma grande perda de material (Figura 4.2). Por sua vez, os provetes de argamassa Mapei Sewament 10 têm tendência para aumentar as suas dimensões, devido a fenómenos expansivos (Figura 4.3).



Figura 4.2 – Fotografia de provete Ref após ensaio de imersão em 14 dias com pH 0.



Figura 4.3 – Fotografia de provete SM10 após ensaio de imersão em 14 dias com pH 0.

4.2. Campanha experimental 2

Nesta campanha foram realizados ensaios de resistência química sobre provetes com menor esbelteza (30 mm x 30 mm x 30 mm). Em relação à primeira campanha experimental, foi também alterado o modo de fecho dos recipientes com o objetivo de diminuir as perdas de solução por evaporação. Para este efeito, utilizou-se parafilme para selar o vidro de relógio ao copo graduado.

Foram realizados os seguintes ensaios:

- imersão de provete de argamassa de referência em pH 0 durante 14 dias.
- imersão de provete de argamassa Mapei Sewament 10 em pH 0 durante 14 dias.
- imersão de provete de argamassa de referência em pH 1 durante 70 dias.
- imersão de provete de argamassa Mapei Sewament 10 em pH 1 durante 70 dias.

Para o efeito foi utilizado um volume de solução de ácido sulfúrico de 270 ml, correspondendo a uma relação com a área de superfície do provete de 20 m^{-1} . Estes ensaios foram realizados em copos graduados, tapados com vidro de relógio e selados com parafilme. Apresenta-se no Quadro 4.3 uma descrição do ensaio.

Quadro 4.3 Descrição da segunda campanha de ensaios

Tipo de provete	Solução de imersão	Tempo de cura	Duração de imersão
Argamassa de referência REF	H ₂ SO ₄ pH 0	28 dias	14 dias
Argamassa Mapei Sewament 10 SM10			
Argamassa de referência REF	H ₂ SO ₄ pH 1	28 dias	70 dias
Argamassa Mapei Sewament 10 SM10			

Este ensaio permitiu aprofundar o estudo da variação de pH, com vista ao estabelecimento de um procedimento de correção do valor ao longo do tempo.

Nesta campanha foi também alvo de análise o modo de preparação da superfície dos provetes após a sua retirada da solução de teste. Assim, imediatamente após a remoção dos provetes do ácido, foram testadas 2 formas de preparar a superfície dos provetes, de forma a soltar as partes de argamassa mal aderidas:

1. Lavagem abundante em água corrente;
2. Lavagem abundante em água corrente, seguida de escovagem com escova de pelo rígido.

Verificou-se que a maior parte da argamassa removida pela escovagem corresponde aos cantos dos provetes, zonas mais desagregadas e mais frágeis. Isto também significa que com a escovagem a dimensão exterior dos provetes permanece praticamente inalterada. Assim sendo, adotou-se a primeira opção, nos ensaios subsequentes.

No final do ensaio, foi efetuada uma análise visual e a medição de dimensões após o ensaio, que constam do quadro 4.4.

Quadro 4.4 Medidas de provetes antes e após ensaio

Tipo de provete	Dimensões antes ensaio a x b x c (mm)	Duração de imersão	Dimensões após ensaio a (mm)	Dimensões após ensaio b (mm)	Dimensões após ensaio c (mm)
Argamassa de referência REF	30 x 30 x 30	14 dias	19,2	19,5	18,3
Argamassa Mapei Sewament 10 SM10		14 dias	35,6	34,6	35,0
Argamassa de referência REF		70 dias	22,5	20,9	22,6
Argamassa Mapei Sewament 10 SM10		70 dias	32,7	33,9	34,0

Um dos objetivos destes ensaios prévios foi comparar o grau de degradação dos provetes imersos durante 14 dias a pH 0 com os provetes imersos durante 70 dias a pH 1, condições usadas como pressupostos iniciais deste trabalho tendo em consideração as condições de ensaio do relatório da Universidade de Hamburgo.

Analisando a variação das dimensões exteriores, verificou-se que os provetes da argamassa de referência imersos em pH 0 apresentaram uma perda dimensional de 11 mm (Figura 4.4), enquanto que os imersos em pH 1 apresentaram uma perda de 8 mm (Figura 4.6).

No caso da argamassa Sewament 10, os provetes imersos em solução de teste com pH 0 expandiram em média 5,1 mm (Figura 4.5), enquanto que em solução de teste com pH 1 expandiram em média 3,5 mm (Figura 4.6).

Estes resultados sugerem que, a imersão durante 14 dias a pH 0 é responsável por uma degradação maior dos provetes do que a imersão durante 70 dias a pH 1.



Figura 4.4 – Registo fotográfico de provete Ref após ensaio de imersão em 14 dias com pH 0.



Figura 4.5 – Fotografia de provetes de SM10; após ensaio de imersão em 14 dias com pH 0; após imersão em água.



Figura 4.6 – Registo fotográfico de provetes após ensaio de imersão em 70 dias com pH 1: argamassa de referência; Sewament 10.

4.3. Campanha experimental 3

Nesta campanha foram realizados ensaios de resistência química sobre um provete com 80 mm x 40 mm x 40 mm e sobre um provete de 40 mm x 40 mm x 17 mm revestido com pintura epoxídica.

Na última campanha de ensaios dos estudos de otimização foram utilizados 2 provetes:

- imersão de provete de argamassa Mapei Sewament 10 em pH 0 durante 14 dias.
- imersão de provete de argamassa de referência revestida com pintura epoxídica, em pH 0 durante 14 dias.

Foi utilizado um volume de solução de ácido sulfúrico de 1096 ml, correspondendo a uma relação com a superfície do provete de 20 m⁻¹. O ensaio foi realizado numa caixa em polipropileno com tampa, tendo os provetes sido apoiados numa tela de polietileno com grampeamento (Figura 4.7).

Nesta terceira campanha optou-se por utilizar caixas de polietileno com tampa, visto apresentarem elevada resistência ao ácido sulfúrico, permitirem testar vários provetes em simultâneo e asseguram uma adequada selagem.

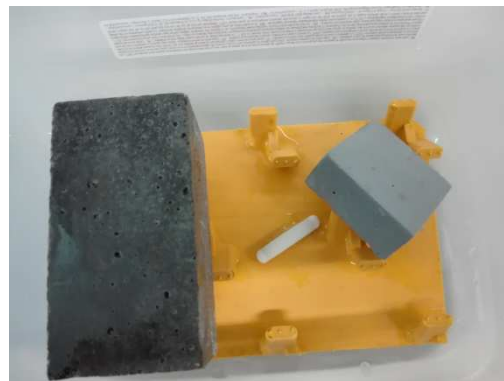


Figura 4.7 – Preparação de provetes para imersão em ácido.

No quadro 4.5 é indicada uma descrição deste ensaio.

Quadro 4.5 Descrição da terceira campanha de ensaios

Tipo de provete	Solução de imersão	Tempo de cura	Duração de imersão
Argamassa Mapei Sewament 10 SM10	H ₂ SO ₄ pH 0	28 dias	14 dias
Argamassa de referência REF com pintura epoxi		54 dias	

No final da imersão, os provetes foram lavados em água corrente, conforme metodologia validade na campanha anterior. Foi efetuada uma análise visual e a medição de dimensões após o ensaio, que constam do quadro 4.6.

Quadro 4.6 Medidas de provetes antes e após ensaio

Tipo de provete	Dimensões antes ensaio a x b x c (mm)	Duração de imersão	Dimensões após ensaio a (mm)	Dimensões após ensaio b (mm)	Dimensões após ensaio c (mm)
Argamassa Mapei Sewament 10 SM10	80 x 40 x 40	14 dias	81,1	43,2	43,5

O provete revestido a pintura epóxi sofreu uma degradação significativa, caracterizada por uma rotura da pintura e pela normal degradação da argamassa de referência (Figura 4.8).



Figura 4.8 – Provetes de argamassa de referência revestida a epóxi, após ensaio de pH 0 por 14 dias.

No que diz respeito ao provete de argamassa de elevada resistência química, foi realizado o seu corte, de modo a analisar a sua secção, e também de modo a validar o método de corte que será utilizado para obter provetes com 40 mm de altura, de modo a serem ensaiados à compressão (Figura 4.9).

Através do corte foi possível verificar o efeito da degradação química e o grau de corrosão na secção de corte (Figura 4.10). Verifica-se que o núcleo do provete, aparentemente, mantém as características mecânicas do provete inicial, enquanto que a zona exterior, que neste provete tem aproximadamente 4,81 mm de largura, tem muito menor resistência.



Figura 4.9 – Provete de Mapei Sewament 10 após imersão e após corte.



Figura 4.10 – Provete de Mapei Sewament 10: grau de corrosão na secção de corte.

Com base nos estudos apresentados, optou-se por não avançar com os ensaios de imersão em solução de ácido sulfúrico com $\text{pH} = 1$, tendo em conta que a degradação após 70 dias nestas condições se revelou menos agressiva do que a imersão em solução de ácido sulfúrico com $\text{pH} 0$ por 14 dias. Decidiu-se, contudo, realizar ensaios de imersão com ácido sulfúrico a $\text{pH} 0$ por períodos de 7, 14 e 21 dias, com o objetivo de analisar a evolução da degradação dos provetes com o tempo nestas condições.

5. ESTUDO COMPARATIVO DAS SOLUÇÕES DE REVESTIMENTO

Após os testes preparatórios, procedeu-se à preparação dos provetes finais para a realização dos ensaios finais de imersão em pH 0 e água, durante 7, 14 e 21 dias. As condições do teste de resistência ao ácido sulfúrico são as apresentadas no ponto 3.3.

Inicialmente são apresentados os resultados referentes aos ensaios realizados com argamassas não revestidas. Após análise destes resultados são listados e analisados os resultados obtidos com argamassas revestidas com pintura epóxi.

5.1. Argamassas não revestidas

Neste capítulo são abordadas as argamassas não revestidas com pintura epóxi, tratando-se de seis provetes realizados com argamassa Mapei Sewament 10 e seis provetes realizados com argamassa de referência.

Foram preparados seis provetes (160 mm x 40 mm x 40 mm) com argamassa Mapei Sewament 10 e seis provetes (160 mm x 40 mm x 40 mm) com a argamassa de referência. Metade destes provetes foi imersa em água, ao passo que a outra metade foi imersa em solução de ácido sulfúrico com pH 0. Nos quadros 5.1 e 5.2 consta o plano experimental dos ensaios realizados.

Quadro 5.1 Plano experimental – Mapei Sewament 10

Tipo de provete	Solução de imersão	Duração de imersão
Argamassa Mapei Sewament 10 SM10	H ₂ SO ₄ pH 0	7 dias
		14 dias
		21 dias
	água	7 dias
		14 dias
		21 dias

Quadro 5.2 Plano experimental – Argamassa de referência

Tipo de provete	Solução de imersão	Duração de imersão
Argamassa de referência REF	H ₂ SO ₄ pH 0	7 dias
		14 dias
		21 dias
	água	7 dias
		14 dias
		21 dias

Nas seções seguintes apresentam-se e analisam-se os resultados obtidos após os ensaios de imersão, no que diz respeito à variação dimensional, variação de massa de provetes, grau de corrosão na seção de corte e resistência à compressão após imersão.

5.1.1. Variação dimensional dos provetes

Após a retirada de imersão, cada provete foi serrado de modo a obter 3 partes com uma altura de 40 mm. As outras 2 dimensões exteriores são variáveis decorrentes do processo de degradação que as argamassas sofrem, nomeadamente quando imersas em ácido.

Em cada provete com 40 mm de altura, foram realizadas medidas na face superior e na face inferior. Em cada uma das faces foram realizadas medições nas 2 direções, L3 e L4 (Figura 5.1).

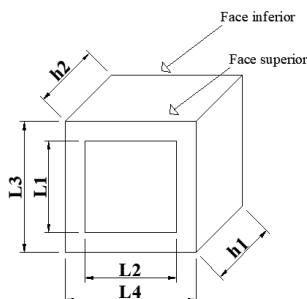


Figura 5.1 – Esquema de medições efetuadas em provetes após imersão em ácido

Os valores apresentados no Quadro 5.3 correspondem à média dos valores das medições de L3 e L4. As medições globais pormenorizadas constam do Anexo B.

A partir destes valores foi calculada a variação dimensional dos provetes, em que os valores positivos correspondem ao aumento de seção, e valores negativos correspondem a uma diminuição. A figura 5.2 representa graficamente a variação dimensional em função do tempo de imersão.

Quadro 5.3 Dimensão exterior e variação dimensional dos provetes

Duração de imersão (dias)	Mapei Sewament 10 SM10 (mm)		Argamassa referência REF (mm)	
	Dimensão exterior média de L3 e L4 (mm)	Variação dimensional (mm)	Dimensão exterior média de L3 e L4 (mm)	Variação dimensional (mm)
0	40,00	0,00	40,00	0,00
7	42,01 ± 0,4	2,01	35,88 ± 1,6	-4,12
14	44,15 ± 0,2	4,15	32,76 ± 0,5	-7,24
21	46,30 ± 0,6	6,30	28,65 ± 0,5	-11,35

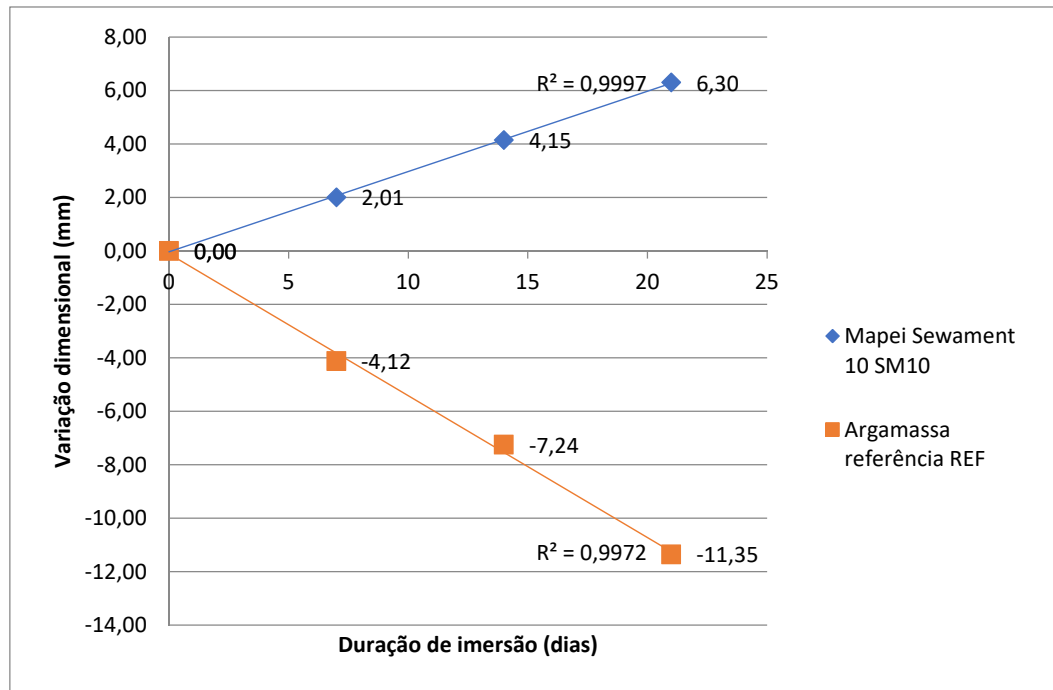


Figura 5.2 Gráfico da evolução da variação dimensional em função do tempo de imersão e respectivas linhas de tendência.

Através da análise destes valores, e também do gráfico obtido, podemos perceber que no caso da argamassa Mapei Sewament 10 há uma clara tendência de aumento dimensional dos provetes, enquanto que no caso da argamassa de referência REF há uma clara diminuição dimensional.

Pelo gráfico percebe-se que a evolução da variação dimensional das 2 argamassas em função do tempo apresenta uma tendência linear, verificando-se que os coeficientes de correlação estão muito próximos da unidade, conforme indicado no gráfico.

5.1.2. Variação de massa dos provetes

Nos quadros 5.4 e 5.5 são apresentadas as massas dos provetes iniciais antes dos ensaios de imersão e depois dos ensaios de imersão em ácido com pH 0 e em água. É também apresentada a variação de massa dos provetes, sendo que o valor positivo corresponde a um aumento de massa.

Quadro 5.4 Medições de massa de provetes de Mapei Sewament 10 antes e depois de ensaio de imersão e respetiva variação

Duração de imersão	Solução de imersão	Massa provetes antes imersão (g)	Massa provetes depois imersão (g)	Variação de massa (g)	Variação percentual de massa (%)
7 dias	H ₂ SO ₄ pH 0	543,57	561,98	18,41	3%
14 dias		536,86	567,30	30,44	6%
21 dias		545,94	562,76	16,82	3%
7 dias	água	540,85	539,78	-1,07	0%
14 dias		541,36	541,12	-0,24	0%
21 dias		534,35	535,00	0,65	0%

Quadro 5.5 Medições de massa de provetes de argamassa de referência REF antes e depois de ensaio de imersão e respetiva variação

Duração de imersão	Solução de imersão	Massa provetes antes imersão (g)	Massa provetes depois imersão (g)	Variação de massa (g)	Variação percentual de massa (%)
7 dias	H ₂ SO ₄ pH 0	592,36	457,54	-134,82	-23%
14 dias		591,33	359,86	-231,47	-39%
21 dias		584,33	268,15	-316,18	-54%
7 dias	água	586,38	585,20	-1,18	0%
14 dias		587,65	587,10	-0,55	0%
21 dias		586,3	586,70	0,40	0%

Os resultados permitem concluir que não houve alteração de massa dos provetes imersos em água. As pequenas alterações devem-se, possivelmente, à forma da secagem superficial dos provetes das argamassas.

No que diz respeito à imersão em ácido temos comportamentos muito diferentes entre os 2 tipos de provetes.

No caso da argamassa Mapei Sewament 10, apesar de uma ligeira perda de material observada nas arestas dos provetes (Figura 5.3), verifica-se um pequeno aumento de massa dos provetes (entre 3% e 6%), que aparenta não variar com o aumento do tempo de imersão. É importante realçar que a medição de massa é realizada imediatamente após a retirada dos provetes de imersão, encontrando-se os mesmos saturados com a solução de ensaio. Assim, é provável que este aumento de massa esteja relacionado com o aumento da capacidade de retenção de solução, resultante do aumento das dimensões exteriores dos provetes.



Figura 5.3 – Provetes de Mapei Sewament 10 após 21 dias de imersão em água; após 21 dias de imersão em ácido pH 0.

No caso da argamassa de referência, verifica-se uma diminuição crescente de massa dos provetes, sendo que após os 21 dias de imersão a massa do provete diminuiu 54%. Este resultado é consequência da perda de material, que se traduz na diminuição de dimensões exteriores dos provetes. Veja-se na Figura 5.4, como exemplo, a diferente variação dimensional de 2 provetes imersos em ácido pH 0 e em água, por um período de 21 dias.



Figura 5.4 – Provetes de argamassa de referência após 21 dias de imersão em ácido pH 0; após 21 dias de imersão em água.

5.1.3. Grau de corrosão de provetes na seção de corte

O grau de corrosão na seção de corte (X_c) corresponde a metade da diferença entre a dimensão inicial (40 mm x 40 mm) e a dimensão do núcleo dos provetes (L_1 x L_2) (Figura 5.5).

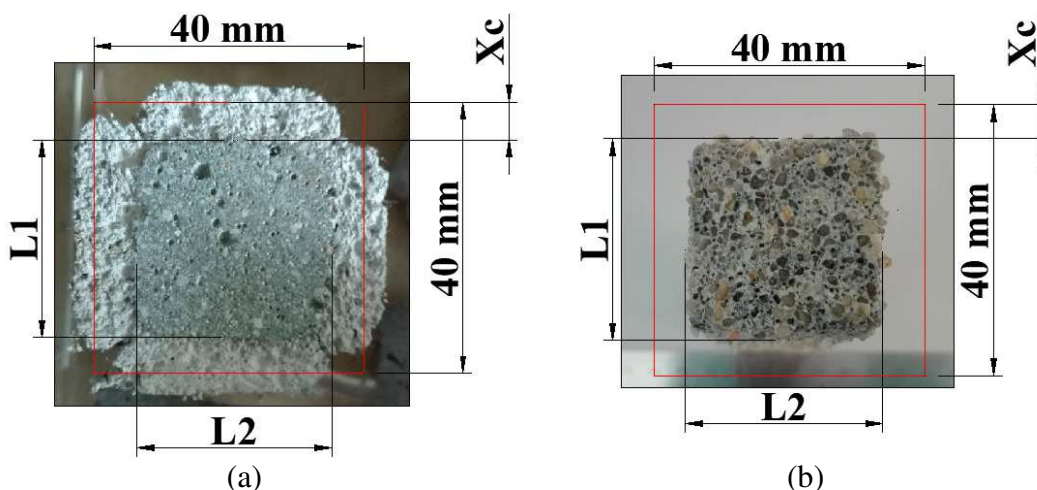


Figura 5.5 Medição de X_c após imersão em ácido de (a) provete de Sewament 10 e (b) argamassa de referência.

No Quadro 5.6 apresentam-se os valores obtidos para o grau de corrosão obtido na seção de corte após imersão em ácido pH 0.

No caso da argamassa Mapei Sewament 10, a seção de corte após o ensaio de imersão em ácido apresenta um núcleo pouco alterado, envolvido por uma auréola menos resistente.

Quadro 5.6 Grau de corrosão na seção de corte após imersão em ácido pH 0

Duração de imersão	Mapei Sewament 10 SM10 (mm)	Referência REF (mm)
0 dias	0,00	0,00
7 dias	2,29	2,06
14 dias	3,85	3,62
21 dias	5,26	5,67

Analisando estes valores, verifica-se que a evolução do grau de corrosão é muito semelhante nos 2 tipos de argamassas.

Este resultado não seria expectável, tendo em conta as diferenças no aspeto físico exterior dos 2 tipos de provetes. Contudo, analisando as suas secções resistentes, verifica-se que têm praticamente as mesmas dimensões.

Através da representação gráfica da Figura 5.6, é possível observar que existe uma tendência linear na variação do grau de corrosão na seção de corte em função do período de imersão em ácido pH 0 para ambas as argamassas.

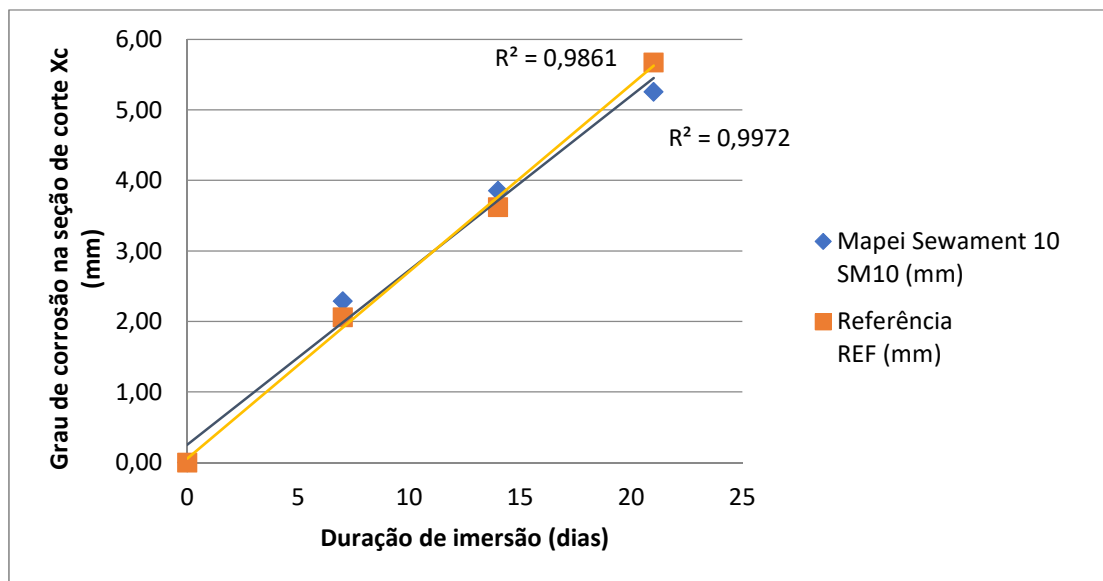


Figura 5.6 Gráfico da evolução do grau de corrosão na seção de corte em função do tempo de imersão em ácido pH 0.

5.1.4. Resistência à compressão dos provetes após imersão

Os provetes com 40 mm de altura, resultantes do seccionamento dos provetes iniciais com 160 mm x 40 mm x 40 mm, foram sujeitos a ensaios de compressão.

No quadro 5.7 apresentam-se os valores individuais e médios de resistência à compressão após imersão em ácido pH 0 e água pelo período de 7, 14 e 21 dias, considerando para este efeito a relação entre a carga obtida e a área inicial dos provetes (40 mm x 40 mm = 1600 mm²).

Calculou-se a variação em percentagem da resistência à compressão residual, que corresponde ao valor percentual do quociente da resistência à compressão após imersão em ácido pH 0 pelo valor após o mesmo tempo de imersão em água.

Calculou-se também o grau de corrosão residual X_r (1) correspondente à dimensão do rebordo periférico, entre a dimensão inicial e um núcleo quadrado imaginário (Figura 5.7), definido para este efeito como uma área quadrada em que a tensão gerada pela carga seja igual à do provete não alterado (imerso em água).

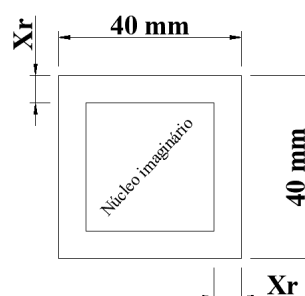


Figura 5.7 Representação de grau de corrosão residual X_r

O grau de corrosão de corrosão residual foi calculado a partir da seguinte expressão:

$$X_r = 0,5 \times d_0 \left| 1 - \sqrt{\frac{F_{d,\text{ácido}}}{F_{d,\text{água}}}} \right| \quad (1)$$

Em que:

d_0 = dimensão da aresta de seção inicial

$F_{d,\text{ácido}}$ = carga de rotura após imersão do provete em ácido

$F_{d,\text{água}}$ = carga de rotura após imersão do provete em água

Quadro 5.7 Resultados dos ensaios à compressão após 7, 14 e 21 dias de imersão em ácido com pH 0 e em água

Argamassa	Mapei Sewament 10 SM10		Argamassa de referência REF	
	7 dias em ácido	7 dias em água	7 dias em ácido	7 dias em água
Resistência à compressão (N/mm ²)	35,5	35,5	35,2	46,1
	24,3	28,8	24,7	66,7
	30,4	35,2	27,7	45,8
Valor médio (N/mm ²)	30,1	33,2	29,2	52,9
Duração de imersão	14 dias em ácido	14 dias em água	14 dias em ácido	14 dias em água
Resistência à compressão (N/mm ²)	13,9	46,0	17,9	48,5
	20,4	34,1	22,2	46,9
	24,4	32,6	18,0	60,1
Valor médio (N/mm ²)	19,5	37,6	19,4	51,8
Duração de imersão	21 dias em ácido	21 dias em água	21 dias em ácido	21 dias em água
Resistência à compressão (N/mm ²)	17,4	33,2	9,5	43,9
	16,9	48,1	13,3	48,0
	21,7	45,4	16,5	39,8
Valor médio (N/mm ²)	18,6	42,2	13,1	43,9

Através destes resultados pode-se verificar que existe um grande decréscimo dos valores de resistência à compressão, que aumenta com o aumento do período de imersão em ácido.

Verifica-se também que a argamassa Mapei Sewament 10 tem um menor decréscimo de resistência à compressão, visto que a sua resistência à compressão residual relativa e percentual tem sempre valores superiores aos da argamassa de referência (Quadro 5.8).

O grau de corrosão residual X_r tem sempre valores crescentes com o aumento do tempo de imersão em ácido e é sempre inferior para a argamassa SM10 do que para a argamassa REF (Quadro 5.9).

Quadro 5.8 Resultados da resistência à compressão residual e percentual após 7, 14 e 21 dias de imersão em ácido com pH 0 relativamente à imersão em água

Resistência à compressão residual relativa e percentual (%) após:	Mapei Sewament 10 SM10	Argamassa de referência REF
7 dias	91%	55%
14 dias	52%	37%
21 dias	44%	30%

Quadro 5.9 Grau de corrosão residual (Xr) após 7, 14 e 21 dias de imersão em ácido com pH 0 e em água

Grau de corrosão residual após:	Mapei Sewament 10 SM10 (mm)	Argamassa de referência REF (mm)
7 dias	0,96	5,13
14 dias	5,58	7,77
21 dias	6,72	9,09

Com base nos resultados obtidos após a imersão, foi realizada uma análise sobre a variação da resistência à compressão efetiva do núcleo das argamassas. Deste modo pretendeu-se analisar se o ataque do ácido incide unicamente sobre a periferia dos provetes, ou se também altera a resistência mecânica da parte central dos provetes.

Para o cálculo da resistência à compressão efetiva, em vez de se utilizar a área inicial de 1600 mm², utilizou-se a área efetiva correspondente às dimensões do núcleo dos provetes (Quadro 5.10). Calculou-se também a variação da resistência à compressão efetiva dos provetes, em que foi relacionada a resistência à compressão efetiva dos provetes nas 2 condições de imersão (Quadro 5.11).

Quadro 5.10 Resistência à compressão efetiva após imersão em ácido e em água

Argamassa	Mapei Sewament 10 SM10		Argamassa de referência REF	
	7 dias em ácido	7 dias em água	7 dias em ácido	7 dias em água
Duração de Imersão	7 dias em ácido	7 dias em água	7 dias em ácido	7 dias em água
Área efetiva média (mm)	1254,62	1676,07	1290,55	1625,28
Resistência à compressão efetiva (N/mm²)	44,7	34,2	43,6	45,2
	31,0	27,7	32,1	65,8
	39,3	33,1	32,9	45,2
Valor médio (N/mm²)	38,3	31,7	36,2	52,1
Duração de Imersão	14 dias em ácido	14 dias em água	14 dias em ácido	14 dias em água
Área efetiva média (mm)	1045,00	1668,94	1075,30	1626,98
Resistência à compressão efetiva (N/mm²)	19,6	44,2	26,3	47,8
	32,5	32,7	33,1	46,0
	39,0	31,2	27,1	59,1
Valor médio (N/mm²)	30,4	36,0	28,8	51,0
Duração de Imersão	21 dias em ácido	21 dias em água	21 dias em ácido	21 dias em água
Área efetiva média (mm)	869,62	1637,69	823,38	1621,80
Resistência à compressão efetiva (N/mm²)	31,6	32,6	18,5	43,4
	31,1	46,9	25,7	47,2
	40,3	44,3	31,9	39,3
Valor médio (N/mm²)	34,3	41,2	25,4	43,3

Quadro 5.11 Variação da resistência à compressão efetiva após imersão em ácido e em água

Variação de resistência à compressão efetiva após:	Mapei Sewament 10 SM10	Argamassa de referência REF
	7 dias	15%
14 dias	-19%	-44%
21 dias	-19%	-42%

Após 7 dias, a argamassa SM10 tem um acréscimo de resistência à compressão efetiva. Exceto este valor, todos os provetes imersos em ácido apresentam um decréscimo de resistência à compressão efetiva, relativamente aos provetes imersos em água.

No entanto, verifica-se que a argamassa SM 10 tem sempre um decréscimo de resistência à compressão efetiva muito inferior do que a argamassa REF, o que significa que, embora as áreas efetivas de ambas as argamassas sejam semelhantes, a argamassa SM10 tem uma maior

capacidade de manter a sua resistência, o que é uma vantagem para a utilização em sistemas de saneamento.

O acréscimo verificado aos 7 dias poderá ser explicado pelo facto deste período não ser suficiente para que o ácido penetre e ataque todo o provete, não diminuindo a resistência mecânica de todo o provete.

5.2. Argamassas revestidas com pintura epoxídica

Neste capítulo são abordadas as argamassas revestidas com pintura epoxídica, tratando-se de 6 provetes realizados com argamassa Mapei Sewament 10 e 7 provetes realizados com argamassa de referência.

De modo a simular possíveis problemas de aplicação que possam ser verificados em obra, em 3 provetes de cada tipo de argamassa foram criados artificialmente defeitos na pintura. 1 provete de argamassa de referência com pintura epóxi sem defeitos foi imerso em água durante 21 dias, para controlo, enquanto que os restantes 12 provetes foram imersos em solução de ácido sulfúrico com pH 0 durante 7, 14 e 21 dias.

O objetivo destes ensaios é analisar o desempenho da pintura epoxídica perante a imersão em ácido com pH 0 e perceber a importância da existência de defeitos no revestimento da superfície.

Nos quadros 5.12 e 5.13 consta uma descrição dos ensaios realizados.

Quadro 5.12 Descrição dos ensaios realizados – Mapei Sewament 10 revestido com pintura epóxi

Tipo de provete	Ref ^a proвете	Solução de imersão	Duração de imersão
Argamassa Mapei Sewament 10 SM10 Revestida com pintura epoxí, sem defeitos	2.1	H ₂ SO ₄ pH 0	7 dias
	2.2		14 dias
	2.3		21 dias
Argamassa Mapei Sewament 10 SM10 Revestida com pintura epoxí, com defeitos	1.1		7 dias
	1.2		14 dias
	1.3		21 dias

Quadro 5.13 Descrição dos ensaios realizados – Argamassa de referência revestida com pintura epóxi

Tipo de provete	Ref ^a provete	Solução de imersão	Duração de imersão
Argamassa de Referência REF Revestida com pintura epoxi, sem defeitos	3.1	H ₂ SO ₄ pH 0	7 dias
	3.2		14 dias
	3.3		21 dias
Argamassa de Referência REF Revestida com pintura epoxi, com defeitos	4.1		7 dias
	4.2		14 dias
	4.3		21 dias
Argamassa de Referência Revestida com pintura epoxi, sem defeitos	5.2	água	21 dias

Nas seções seguintes serão apresentados e analisados os vários resultados obtidos após os ensaios de imersão, no que diz respeito a:

- Variação de massa de provetes
- Análise visual dos defeitos superficiais
- Medição da espessura seca da pintura epóxi

5.2.1. Variação de massa de provetes

Nos quadros 5.14, 5.15 e 5.16, são apresentadas as massas dos provetes iniciais com 160 mm x 40 mm x 40 mm antes dos ensaios de imersão e depois dos ensaios de imersão em ácido com pH 0 e em água. É também apresentada a variação de massa dos provetes, sendo que o valor positivo corresponde a um aumento de massa.

Quadro 5.14 Medições de massa de provetes de Mapei Sewament 10 com pintura epóxi antes e depois de ensaio de imersão em ácido com pH 0

Duração de imersão	Ref ^a provete	Defeitos induzidos na pintura	Massa provetes antes imersão (g)	Massa provetes depois imersão (g)	Varição de massa (g)
7 dias	2.1	SEM defeitos	544,24	544,63	0,39
14 dias	2.2		544,11	544,64	0,53
21 dias	2.3		552,68	554,29	1,61
7 dias	1.1	COM defeitos	549,49	549,97	0,48
14 dias	1.2		545,65	547,35	1,70
21 dias	1.3		546,48	549,16	2,68

Quadro 5.15 Medições de massa de provetes de argamassa de referência REF antes e depois de ensaio de imersão em ácido com pH 0

Duração de imersão	Ref ^a provete	Defeitos induzidos na pintura	Massa provetes antes imersão (g)	Massa provetes depois imersão (g)	Varição de massa (g)
7 dias	3.1	SEM defeitos	609,40	609,26	-0,14
14 dias	3.2		604,18	604,19	0,01
21 dias	3.3		602,55	603,26	0,71
7 dias	4.1	COM defeitos	601,96	601,94	-0,02
14 dias	4.2		597,3	598,00	0,70
21 dias	4.3		599,95	599,32	-0,63

Quadro 5.16 Medição de massa de provete de argamassa de referência REF antes e depois de imersão em água

Duração de imersão	Ref ^a provete	Defeitos induzidos na pintura	Massa provetes antes imersão (g)	Massa provetes depois imersão (g)	Varição de massa (g)
21 dias	5.2	SEM defeitos	609,40	609,26	-0,14





Através destes valores, foi verificado que existem pequenas diferenças de massa nos provetes. Uma das características da pintura epóxi é a sua impermeabilidade, pelo que não havendo defeitos, é expectável que não haja diferença de massa.

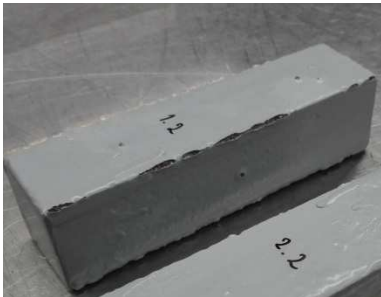
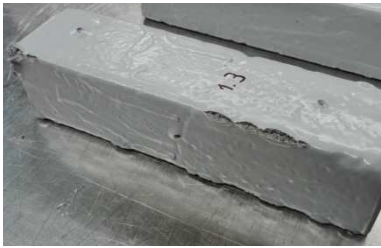


Verificou-se também que os pequenos defeitos provocados previamente e os defeitos que surgiram através da imersão, têm pouca influência na absorção de água dos provetes. Provavelmente a pequena absorção de água pelos defeitos é compensada pela perda de argamassa decorrente da sua degradação superficial.





5.2.2. Análise visual dos defeitos superficiais dos provetes

Os defeitos superficiais provocados pela imersão em ácido são de difícil medição, pelo que foi realizada uma análise visual da superfície dos provetes, identificando e caracterizando os defeitos observados, com o respetivo registo fotográfico (Quadro 5.17).

Quadro 5.17 Caracterização visual e breve registo fotográfico de defeitos superficiais após imersão em ácido e em água

Tipo de argamassa	Ref ^a	Duração de imersão	Fotografia do provete	Descrição visual dos defeitos
Argamassa de elevada resistência química, revestida com epóxi, SEM introdução de defeitos na pintura	2.1	7 dias		Verificou-se pequena degradação do revestimento em 2 arestas de maior dimensão do provete.
	2.2	14 dias		Verificou-se pequena degradação do revestimento em 2 arestas de maior dimensão do provete e 2 de menor dimensão.
	2.3	21 dias		Verificou-se pequena degradação do revestimento em 2 arestas de maior dimensão do provete, junto aos topos
Argamassa de elevada resistência química, revestida com epóxi, COM introdução de defeitos na pintura	1.1	7 dias		Verificou-se pequena degradação do revestimento em 1 aresta de maior dimensão do provete.

Tipo de argamassa	Ref ^a	Duração de imersão	Fotografia do provete	Descrição visual dos defeitos
Argamassa de elevada resistência química, revestida com epóxi, COM introdução de defeitos na pintura	1.2	14 dias		Verificou-se degradação do revestimento nas 4 arestas de maior dimensão do provete. Verificou-se pequeno empolamento em torno dos defeitos introduzidos
	1.3	21 dias		Verificou-se degradação do revestimento nas 4 arestas de maior dimensão do provete. Verificou-se empolamento em torno dos defeitos introduzidos
Argamassa de referência, revestida com epóxi, SEM introdução de defeitos na pintura epóxi	3.1	7 dias		Verificou-se 1 pequeno ponto de degradação do revestimento, numa aresta
	3.2	14 dias		Verificou-se uma grande degradação do revestimento nas 4 arestas de 1 topo do provete, bem como 2 pequenas degradações no topo oposto

Tipo de argamassa	Ref ^a	Duração de imersão	Fotografia do provete	Descrição visual dos defeitos
Argamassa de referência, revestida com epóxi, SEM introdução de defeitos na pintura epóxi	3.3	21 dias		Verificou-se uma pequena degradação em 2 arestas pequenas e 2 arestas maiores, ambas num lado do provete
Argamassa de referência, revestida com epóxi, COM introdução de defeitos na pintura epóxi	4.1	7 dias		Verificou-se uma pequena degradação em 3 arestas grandes, sem empolamento nos defeitos
	4.2	14 dias		Verificou-se degradação do revestimento numa aresta grande e em 4 arestas pequenas do provete. Verificou-se pequeno empolamento em torno dos defeitos introduzidos
	4.3	21 dias		Verificou-se grande degradação do revestimento nas 2 pontas do provete, nas arestas pequenas e grande. Observa-se perda de argamassa nestes pontos. Verificou-se empolamento em torno dos defeitos introduzidos

Tipo de argamassa	Ref ^a	Duração de imersão	Fotografia do provete	Descrição visual dos defeitos
Argamassa de referência, revestida com epóxi SEM introdução de defeitos na pintura epóxi	5.2	21 dias em água		Não se verificou degradação do revestimento

Através da análise deste quadro e dos provetes, conseguimos verificar que, de um modo geral, um aumento do tempo de imersão em ácido corresponde ao agravamento dos defeitos.

Foi também comprovado por esta avaliação que os provetes em que foram introduzidos defeitos, de um modo geral, apresentam uma maior degradação relativamente aos provetes sem indução de defeitos.

No anexo C consta o registo fotográfico mais completo dos provetes.

5.2.3. Medição da espessura seca da pintura epoxídica

Para analisar a pintura e o seu mecanismo de degradação, os provetes iniciais foram cortados ao longo do seu comprimento, de modo a permitir realizar a medição de espessura seca da pintura epóxi Mapei Mapecoat I 24.

Nos provetes com defeitos superficiais, os cortes foram realizados sobre esses mesmos defeitos, para analisar a degradação localizada e em profundidade.

Com o auxílio do software Autocad, conseguimos realizar a medição da espessura seca da pintura epóxi (Figura 5.8).

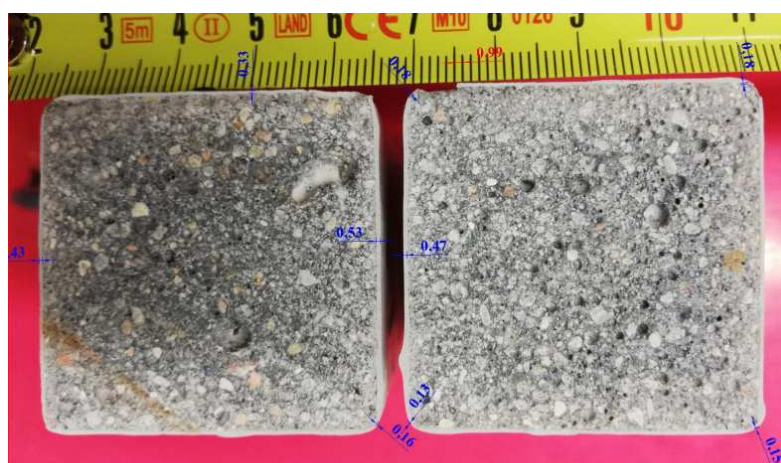


Figura 5.8 – Medição de espessura seca de pintura epóxi de provete Ref 2.2.

Tendo em conta que os defeitos superficiais se verificam sempre nos cantos dos provetes, realizámos a medição nas faces dos provetes e também nos cantos. Com estes valores, colocámos também no quadro a espessura média das faces dos provetes e a espessura média e mínima dos cantos dos provetes (Quadro 5.18).

Analisando os valores do quadro, verifica-se que a espessura nos cantos é, em média, um terço da espessura nas faces. Este facto justifica-se pela técnica de aplicação da pintura em provetes de pequenas dimensões e em posição vertical, o que dificulta a aplicação da quantidade correta de tinta epóxi nos cantos.

Verificamos que nos cantos chegamos a ter aproximadamente 0,1mm de espessura de tinta, sendo que no local dos defeitos não conseguimos obter um valor exato devido ao corte efetuado e à degradação existente provocada pela argamassa. Esta espessura é manifestamente insuficiente para o correto desempenho e resistência química desta pintura e, principalmente, facilita o aparecimento de poros no revestimento (Figura 5.9).

Estes poros associados com a espessura insuficiente, podem ser a principal justificação para o aparecimento dos defeitos superficiais nos cantos dos provetes, funcionando como os defeitos inicialmente introduzidos na pintura.

Quadro 5.18 Medição de espessura seca de pintura epóxi após corte de provetes

Referência de provete:	Espessura seca de pintura nas faces dos provetes (mm)				Valor médio nas faces (mm)	Espessura seca de pintura nos cantos dos provetes (mm)				Valor médio nos cantos (mm)	Valor mínimo nos cantos (mm)
2.1	0,51	0,39	0,47	0,55	0,48	0,09	0,25	0,2	0,29	0,21	0,09
2.2	0,33	0,53	0,47	0,43	0,44	0,18	0,18	0,15	0,13	0,16	0,13
2.3	0,39	0,36	0,61	0,67	0,51	0,26	0,13	0,11	0,1	0,15	0,10
1.1	0,44	0,63	0,48	0,86	0,60	0,24	0,13	0,18	0,19	0,19	0,13
1.2	0,47	0,41	0,55	0,47	0,48	0,18	0,25	0,25	0,18	0,22	0,18
1.3	0,49	0,44	0,68	0,55	0,54	0,26	0,2	0,15	0,21	0,21	0,15
3.1	0,73	0,78	0,86	0,56	0,73	0,4	0,3	0,2	0,13	0,26	0,13
3.2	0,6	0,51	0,39	0,57	0,52	0,23	0,13	0,14	0,1	0,15	0,10
3.3	0,66	0,67	0,77	0,78	0,72	0,22	0,17	0,13	0,14	0,17	0,13
4.1	0,62	0,69	0,58	0,84	0,68	0,22	0,17	0,13	0,4	0,23	0,13
4.2	0,68	0,36	0,63	0,64	0,58	0,28	0,18	0,22	0,17	0,21	0,17
4.3	0,5	0,42	0,45	0,53	0,48	0,17	0,16	0,17	0,3	0,20	0,16
5.2	1,04	0,83	0,89	0,74	0,88	0,26	0,39	0,22	0,37	0,31	0,22
				Valor médio	0,59			Valor médio		0,20	0,14

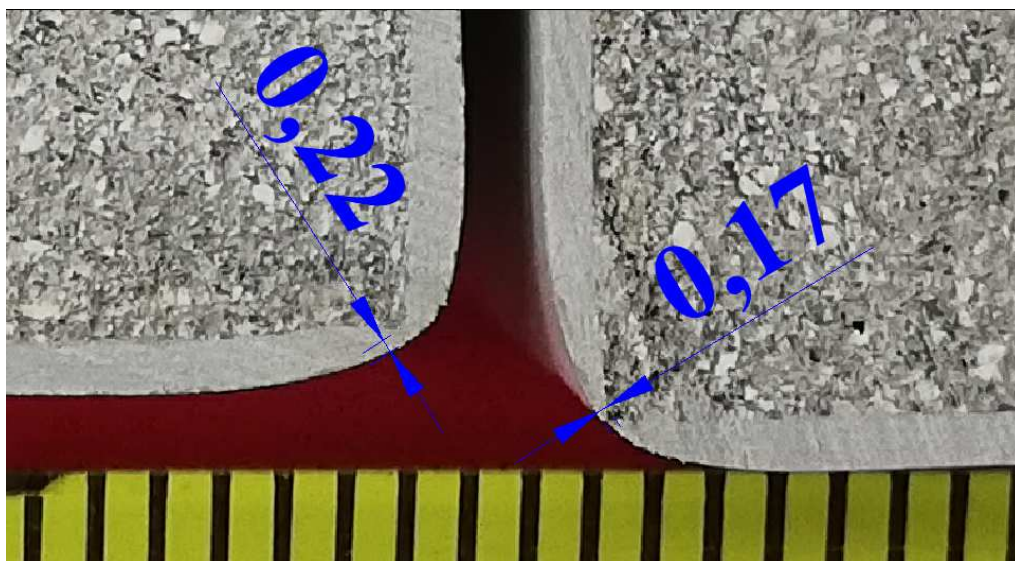


Figura 5.9 – Pormenor de medição de espessura seca de pintura epóxi de provete Ref 3.3, valores em mm.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O trabalho realizado centrou-se na implementação de um teste de resistência ao ácido sulfúrico capaz de reproduzir, de forma acelerada, o tipo de anomalias observada em revestimentos de sistemas de saneamento. O método otimizado foi, então, utilizado na realização de um estudo comparativo de várias argamassas, nomeadamente uma argamassa de referência e uma argamassa comercial com maior resistência aos ácidos, bem como um revestimento polimérico à base de resinas epoxídicas. No caso deste último, foram ainda analisados os efeitos de degradação decorrentes da presença de defeitos de superfície.

As argamassas utilizadas foram produzidas nos laboratórios da Lusomapei e o estudo experimental conduzido nas instalações laboratoriais do Itecons. Os testes consistiram na imersão dos provetes em soluções de ácido sulfúrico concentrado em condições de agitação moderada por períodos de tempo variáveis, após os quais foram realizados ensaios para avaliar variação de massa, a variação dimensional, o grau de corrosão na seção de corte e a resistência à compressão das várias soluções.

Os resultados obtidos sugerem que, através do método de imersão em ácido sulfúrico concentrado, é possível reproduzir, de forma acelerada, o tipo de degradação observada em argamassas de revestimento de sistemas de saneamento, podendo o mesmo ser utilizado no estudo comparativo de argamassas existentes e novas. Os resultados obtidos sugerem, adicionalmente, que alguns dos efeitos da degradação observados, tais como a variação dimensional e o grau de corrosão na secção de corte, têm um comportamento linear relativamente ao tempo de imersão. Importa ainda referir que, apesar deste método não reproduzir as condições ambientais e biológicas subjacentes à formação de ácido sulfúrico, principal agente responsável pela degradação das argamassas, considera-se que o mesmo simula o pior cenário, isto é, argamassa em contacto permanente com ácido sulfúrico a pH 0.

Através dos estudos comparativos concluiu-se que a argamassa Mapei Sewament 10 apresenta claras vantagens a nível de resistência à compressão, apresentando uma menor diminuição da sua resistência com o aumento do período de imersão. Já no que diz respeito ao grau de corrosão das argamassas, verificou-se uma grande semelhança entre os 2 produtos, sendo que a argamassa Mapei Sewament 10 mantém o seu rebordo menos resistente, o que poderá trazer vantagens a nível de resistência à abrasão mecânica. O grau de corrosão na seção é de elevada importância quando estamos a analisar argamassas de revestimento, que podem ser aplicadas em espessuras a partir de 10 mm e que, correntemente, não ultrapassam espessuras de 15 a 20 mm. Tendo em conta que após os 21 dias de imersão em ácido com pH 0 o grau de corrosão de ambas argamassas rondou os 5 mm, significa que seria perdida grande parte da seção do revestimento, deixando mais desprotegido o restante elemento estrutural e a eventual armadura metálica de reforço.

Decidiu-se analisar as pinturas epoxídicas, uma vez que estas são soluções utilizadas em revestimentos anti-ácido, tanto em obras novas como na reabilitação. Verificou-se, de facto, que existe um grande acréscimo de resistência ao ácido sulfúrico com esta solução. No entanto, constatou-se também a grande sensibilidade deste tipo de solução no que diz respeito à preparação do suporte e correta aplicação da pintura. Considera-se, pois, ser de extrema

importância a eliminação de defeitos ou pequenos poros na pintura, visto que este poderão ser responsáveis por uma degradação precoce do revestimento e da argamassa do suporte, diminuindo a durabilidade global.

Como um dos possíveis desenvolvimentos futuros da presente tese, propõe-se a realização de testes de resistência química em ambiente real. Esse trabalho exigirá uma avaliação das condições de agressividade química ao longo do tempo, nomeadamente a nível de valores de pH do efluente, pH superficial da argamassa, concentração de H_2S , temperatura e humidade. Um estudo com estas características, permitiria estabelecer uma relação entre o nível de degradação verificado nos ensaios acelerados e a durabilidade das argamassas em ambiente real.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Mapei, Caderno técnico A reabilitação dos sistemas de saneamento, 2017, disponível em www.mapei.pt.
- [2] Takagi, Emílio Minoru, Pinto, Jaques., Sistemas de impermeabilização e proteção de obras de saneamento. Concreto e Construções, URL: www.casadagua.com.br/pdf/artigo_saneamento.pdf. Consultado em 13 de abril de 2018.
- [3] PEAASAR II - Plano Estratégico de Abastecimento de Água e de Saneamento de Águas Residuais (2007-2013), Ministério do Ambiente, do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional, 1ª Ed. 2007.
- [4] PENSAAR 2020 - Uma nova Estratégia para o Setor de Abastecimento de Água e Saneamento de Águas Residuais (Fases 2, 3 e 4), Volume 2, 2015.
- [5] Kaminsky, J., Javernick-Will, A., Contested Factors for Sustainability: Construction and Management of Household On-Site Wastewater Treatment. *Journal of Construction Engineering and Management*, 139, Issue 12 (2013).
- [6] Cardoso, M., Coelho, S., Praça, P., Brito, R., Matos, J., Technical Performance Assessment of Urban Sewer Systems, *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 339, ASCE (2005).
- [7] Younis, R., Knight, M., A probability model for investigating the trend of structural deterioration of wastewater pipelines. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 25, 670–680 (2010).
- [8] Wirahadikusumah, R., Abraham, D., Castello, J., Markov decision process for sewer rehabilitation, *Engineering, Construction and Architectural Management*, 6 4, 358–370 (1999).
- [9] Marzouk, M., Othman, A., Modeling the performance of sustainable sanitation systems using building information modeling, *Journal of Cleaner Production* 141, 1400-1410 (2017).
- [10] Vieira, J., Baptista, J., Indicadores de Desempenho para Melhoria dos Serviços de Saneamento Básico. *Engenharia Civil, UM*, nº 33 (2008).
- [11] Yuan, H., Dangla, A., Chatellier, P., Chaussadent, T. Degradation modeling of concrete submitted to biogenic acid attack. *Cement and Concrete Research*, 70, 29–38 (2015).
- [12] Grengg, C., Mittermayr, F., Koraimann, G., Konrad, F., Szabó, M., Demeny, A., Dietzel, M., The decisive role of acidophilic bacteria in concrete sewer networks: A new model for fast progressing microbial concrete corrosion, *Cement and Concrete Research* 101, 93–101 (2017).

- [13] O'Connell, M., McNally, C., Richardson, M., Biochemical attack on concrete in wastewater applications: A state of the art review, *Cement & Concrete Composites*, 32, 479–485 (2010).
- [14] Grandclerc, A., Guéguen-Minerbe, M., Nour, I., Dangla, P., Chaussadent, T., Impact of cement composition on the adsorption of hydrogen sulphide and its subsequent oxidation onto cementitious material surfaces, *Construction and Building Materials*, 152, 576–586 (2007).
- [15] Miyamoto, S., Minagawa, H., Hisada, M., Deterioration rate of hardened cement caused by high concentrated mixed acid attack, *Construction and Building Materials*, 67, 47–5, (2014).
- [16] De Belie N., Monteny J., Vincke E, Beeldens A., Testing and modelling biogenic sulfuric acid corrosion of concrete sewer pipes in function of aggregate type, cement type and production method. *Life Prediction and Aging Management of Concrete Structures* (2009).
- [17] Magdy, A., Abd El-Aziz, A., Sufe, W., Effect of sewage wastes on the physico-mechanical properties of cement and reinforced steel. *Ain Shams Engineering Journal*, 4, 387–391 (2013).
- [18] Monteny, J., Vincke, E., Beeldens, A., De Belie, N., Taerwe, L., Van Gemert, D., Verstraete, W., Chemical, microbiological, and in situ test methods for biogenic sulfuric acid corrosion of concrete. *Cement and Concrete Research*, 30, 623-634 (2000).
- [19] Grengg, C., Mittermayr, F. , Baldermann, A., Böttcher, M. E., Leis, A., Koraimann, G., Grunert, P. & Dietzel, M.; Microbiologically induced concrete corrosion: A case study from a combined sewer network, 2, (2015).
- [20] Matias, G., Faria, P., Torres, I., Lime mortars with heat treated clays and ceramic waste: A review, *Construction and Building Materials* 73, 125-136, 2014.
- [21] Škerget, L.; Tadeu, A., BEM numerical simulation of coupled heat and moisture flow through a porous solid, *Engineering Analysis with Boundary Elements*, vol. 40, 154–161, 2014.
- [22] Orlov, V., Hydraulic characteristics of internal protective coatings used for rehabilitation of pipelines of water supply and sanitation systems, *MATEC Web of Conferences* 144, 02017 (2018).
- [23] Tennich, M., Ouezdou, M., Kallel, A. Behavior of self-compacting concrete made with marble and tile wastes exposed to external sulfate attack, *Construction and Building Materials*, 135, 335–342 (2017).
- [24] Araghi, H., Nikbin, I., Reskati, S., Rahmani, E., Allahyari, H., An experimental investigation on the erosion resistance of concrete containing various PET particles percentages against sulfuric acid attack, *Construction and Building Materials*, 77, 461–471 (2015).

- [25] Girardi, F., Di Maggio, R., Resistance of concrete mixtures to cyclic sulfuric acid exposure and mixed sulfates: Effect of the type of aggregate. *Cement & Concrete Composites*, 33, 276–285, (2011).
- [26] Kong, L., Zhang, B., Fang, J., Study on the applicability of bactericides to prevent concrete microbial corrosion. *Construction and Building Materials*, 149, 1–8 (2017).
- [27] Noeiaghahi, T., Mukherjee, A., Dhama, N., Chae, S., Biogenic deterioration of concrete and its mitigation technologies. *Construction and Building Materials*, 149, 575–586 (2017).
- [28] Noeiaghahi, T., Mukherjee, A., Mukherjee, A., Nanoparticles surface treatment on cemented materials for inhibition of bacterial growth. *Construction and Building Materials* 150, 880–891 (2017).
- [29] De Muynck, W., De Belie, N., Verstraete, W., Effectiveness of admixtures, surface treatments and antimicrobial compounds against biogenic sulfuric acid corrosion of concrete. *Cement & Concrete Composites*, 31, 163–170 (2009).
- [30] Maley, B.; Kelso, S., Strategic Corrosion Protection of New Sewerage Overflow Tunnels, *Journal of Protective Coatings & Linings*, 42-46,48,50-53 (2011).
- [31] Azevedo, Ana Matilde Pardinhas (2010). “Guião para a execução e reabilitação de pavimentos à base de resinas sintéticas”. Tese de mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.
- [32] NP EN 196-1. 2006 - Métodos de ensaio de cimentos. Parte 1: Determinação das resistências mecânicas. Bruxelas: European Standard, CEN.
- [33] Secil, Ficha técnica Cimento CEM IV/A (V) 32,5R, cimento pozolânico.
- [34] Secil, Declaração de desempenho de Cimento CEM IV/A (V) 32,5R, cimento pozolânico.
- [35] NP EN 206-1, 2007. Betão – Parte 1: Especificação, desempenho, produção e conformidade. Bruxelas: European Standard, CEN.
- [36] LNEC E-464 2016, Betões, Metodologia prescritiva para uma vida útil de projeto de 50 e de 100 anos face às ações ambientais.
- [37] Mapei, Ficha técnica de Sewament 10, 2016.
- [38] C. Look, Prof. Dr. E. Bock, “Report on Biogenic, sulphuric, acid corrosion of cement-bound materials for Mapei GmbH’s product Sewament 10”, University of Hamburg, Institute of Botany, Department of Microbiology, Hamburg.

[39] NP EN 1504-9. 2009, Produtos e sistemas para a proteção e reparação de estruturas de betão – Definições, requisitos, controlo da qualidade e avaliação da conformidade. Parte 9: Princípios gerais para a utilização de produtos e sistemas. Bruxelas: European Standard, CEN.

[40] NP EN 1504-3. 2006, Produtos e sistemas para a protecção e reparação de estruturas de betão – Definições, requisitos, controlo da qualidade e avaliação da conformidade. Parte 3: Reparação estrutural e não estrutural. Bruxelas : European Standard, CEN.

[41] Mapei, Ficha técnica de Mapecoat I 24, 2008.

[42] NP EN 1504-2. 2006, Produtos e sistemas para a proteção e reparação de estruturas de betão – Definições, requisitos, controlo da qualidade e avaliação da conformidade. Parte 2: Sistemas de proteção superficial do betão. Bruxelas: European Standard, CE.

[43] Mapei, Ficha técnica de Planitop 100, 2013.

[44] Frank, Prof Dr. Ing Lutz, “Relatório de ensaio de resistência do pré-misturado seco SEWAMENT 10 à corrosão por ácido sulfúrico com pH 0 e pH 1”, Universidade de Tecnologia de Hamburgo, Hamburgo.

[45] EN 1015-11 (2007), Methods of test for mortar for masonry Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar.

8. ANEXOS

8.1. Anexo A – Descrição das soluções de teste, medições de pH efetuadas e respetivas correções

Equipamento/material: POT01, POT01-01, PLA01, PLA02, PLA03													
Tabela de resultados obtidos - preparação de soluções a utilizar													
Data	Hora	Refª solução	pH (25°C)	Observações									
04-11-2017	---	Sol. Tampão pH1	1,022	---									
04-11-2017	---	H2SO4 10%	-0,504	---									
04-11-2017	---	H2SO4 2%	0,520	---									
04-11-2017	---	H2SO4 1%	0,786	---									
04-11-2017	---	H2SO4 0,5%	1,055	---									
04-11-2017	---	H2SO4 5%	0,157	---									
04-11-2017	---	pH0	-0,004	Sol. 5% + ~7ml H2SO4 conc.									
04-11-2017	---	pH1	0,996	Sol. 0,5% + ~1ml H2SO4 conc.									
Tabela de resultados obtidos - testes													
Data	Hora	Refª solução	pH (25°C)	Refª solução	pH (25°C)	Refª solução	pH (25°C)	Observações	Controlo antes leituras		Controlo após leituras		
									Sol. Tampão pH1	Sol. Tampão pH2	Sol. Tampão pH1	Sol. Tampão pH2	
04-11-2017	10:05	pH0 Ref	---	pH0 S10	---	pH1 S10	---	Momento zero	---	---	---	---	
04-11-2017	10:35	pH0 Ref	0,070	pH0 S10	0,037	pH1 S10	1,064	Tempo de reação: 30 min	1,004	---	---	---	
04-11-2017	11:35	pH0 Ref	0,044	pH0 S10	0,037	pH1 S10	1,076	Tempo de reação: 60 min	0,986	---	---	---	
04-11-2017	12:35	pH0 Ref	0,138	pH0 S10	0,087	pH1 S10	1,076	Tempo de reação: 120 min	0,982	---	---	---	
04-11-2017	14:35	pH0 Ref	-0,102	pH0 S10	-0,094	pH1 S10	0,969	Tempo de reação: 240 min; Mau desempenho do eletrodo.	0,846	---	0,856	1,876	
04-11-2017	18:00	pH0 Ref	0,081	pH0 S10	0,045	pH1 S10	1,020	Tempo de reação: 450 min; Após regeneração do eletrodo.	0,922	1,936	0,884	1,875	
06-11-2017	10:00	pH0 Ref	0,059	pH0 S10	0,114	pH1 S10	1,200	Tempo de reação: 72h	0,984	1,995	0,967	1,984	
07-11-2017	10:00	pH0 Ref	0,066	pH0 S10	0,063	pH1 S10	1,213	Tempo de reação: 96h	0,989	1,997	0,955	1,983	
08-11-2017	10:00	pH0 Ref	0,070	pH0 S10	0,087	pH1 S10	1,252	Tempo de reação: 120h	0,975	1,973	0,952	1,974	
09-11-2017	10:00	pH0 Ref	0,085	pH0 S10	0,085	pH1 S10	1,257	Tempo de reação: 144h	0,976	1,979	0,968	1,984	
10-11-2017	10:00	pH0 Ref	0,102	pH0 S10	0,095	pH1 S10	1,302	Tempo de reação: 168h	0,955	1,983	0,976	1,990	
13-11-2017	10:00	pH0 Ref	0,118	pH0 S10	0,124	pH1 S10	1,385	Tempo de reação: 240h	1,006	2,020	0,993	2,011	
17-11-2017	17:30	pH0 Ref	0,099	pH0 S10	0,156	pH1 S10	1,465	Tempo de reação: 34 fh 30m	1,000	2,003	0,992	2,018	
20-11-2017	10:00	pH0 Ref	0,140	pH0 S10	0,152	pH1 S10	1,498	Tempo de reação: 408h	1,037	2,043	1,000	2,024	
Acerto de pH:		pH0 Ref	15 ml sol 5% + 2,5 ml conc., pH = 0,010										
		pH0 S10	4,5 ml conc., pH = 0,014										
		pH1 S10	1,2 ml conc., pH = 1,002										

Figura 8.1 Descrição das soluções de teste, medições de pH efetuadas e respetivas correções. Campanha experimental 1.

Equipamento/material: POT01, POT01-01, PLA01, PLA02, PLA03

Tabela de resultados obtidos - preparação de soluções a utilizar

Data	Hora	Refª solução	pH (25°C)	Observações
20-11-2017	---	Sol. Tamp. pH1	1,000	---
---	---	H2SO4 5%	0,169	---
---	---	pH0	0,006	Sol. 5% + 15,5 ml H2SO4 conc.
---	---	pH1	0,989	Sol. 0,5% + 1,5 ml H2SO4 conc.

volume solução ácido 270 ml

Tabela de resultados obtidos - testes

Data	Hora	Reª solução	pH (25°C)	Reª solução	pH (25°C)	Reª solução	pH (25°C)	Reª solução	pH (25°C)	Observações	Controlo antes leituras		Controlo após leituras	
											Sol. Tampão pH1	Sol. Tampão pH2	Sol. Tampão pH1	Sol. Tampão pH2
20-11-2017	13:00	pH0 Ref	---	pH0 S10	---	pH1 Ref	---	pH1 S10	---	Momento zero	---	---	1,008	---
20-11-2017	18:00	pH0 Ref	0,046	pH0 S10	0,056	pH1 Ref	1,094	pH1 S10	1,099	Tempo de reação: 5 h	1,023	2,022	1,008	2,014
21-11-2017	18:00	pH0 Ref	0,053	pH0 S10	0,076	pH1 Ref	1,169	pH1 S10	1,132	Tempo de reação: 29 h	1,002	2,013	---	---
---	---	---	---	---	---	---	0,953	---	1,033	Acerto pH (pH1 Ref: 1 ml; pH1 S10: 0,5 ml)	---	---	---	1,002
22-11-2017	18:00	pH0 Ref	0,065	pH0 S10	0,076	pH1 Ref	0,962	pH1 S10	1,082	Tempo de reação: 53 h	0,987	2,013	0,996	2,014
23-11-2017	17:00	pH0 Ref	0,085	pH0 S10	0,086	pH1 Ref	1,014	pH1 S10	1,086	Tempo de reação: 76 h	1,003	2,018	0,993	2,017
24-11-2017	18:00	pH0 Ref	0,098	pH0 S10	0,090	pH1 Ref	1,058	pH1 S10	1,108	Tempo de reação: 101 h	1,004	2,015	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	pH1 S10	0,999	Acerto pH (pH1 S10: 0,4 ml)	---	---	---	1,032
27-11-2017	12:00	pH0 Ref	0,069	pH0 S10	0,000	pH1 Ref	1,160	pH1 S10	1,091	Tempo de reação: 167 h	1,003	2,000	1,000	2,014
---	---	pH0 Ref	0,020	pH0 S10	0,010	pH1 Ref	---	pH1 S10	1,056	Leitura após certo de volume (perdas por evaporação) Soluções adicionadas pH0 =0,034, pH1 = 1,008 Volumes adicionados: 45 ml, 65 ml, 0 ml, 39 ml	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	pH1 Ref	1,048	---	---	Acerto pH (pH1 Ref: 0,3 ml)	---	---	1,063	1,982
28-11-2017	12:00	pH0 Ref	0,028	pH0 S10	0,025	pH1 Ref	1,069	pH1 S10	1,077	Tempo de reação: 191 h	0,988	2,010	0,983	2,006
29-11-2017	12:00	pH0 Ref	0,048	pH0 S10	0,020	pH1 Ref	1,137	pH1 S10	1,110	Tempo de reação: 215 h	1,028	2,022	---	---
---	---	---	---	---	---	pH1 Ref	0,996	pH1 S10	1,000	Acerto pH (pH1 Ref: 0,5 ml; pH1 S10: 0,35 ml)	---	---	---	1,025
30-11-2017	12:00	pH0 Ref	0,060	pH0 S10	0,029	pH1 Ref	1,034	pH1 S10	1,038	Tempo de reação: 239 h	0,984	2,007	0,988	2,007
04-12-2017	12:00	pH0 Ref	0,046	pH0 S10	0,020	pH1 Ref	1,137	pH1 S10	1,088	Leitura após certo de volume (perdas por evaporação) Volumes adicionados: 17 ml, 15 ml, 45 ml, 42 ml Tempo de reação: 335 h - 14 dias	1,042	2,046	---	---
---	---	---	---	---	---	pH1 Ref	1,027	---	---	Acerto pH (pH1 Ref: 0,3 ml)	---	---	---	1,018
06-12-2017	18:00	---	---	---	---	pH1 Ref	1,159	pH1 S10	1,196	Tempo de reação: 389 h	1,050	2,007	---	---
---	---	---	---	---	---	pH1 Ref	1,039	pH1 S10	1,032	Acerto pH (0,5 ml; 0,6 ml)	---	---	---	1,024
11-12-2017	17:00	---	---	---	---	pH1 Ref	1,234	pH1 S10	1,156	Tempo de reação: 508 h - 21 dias	1,065	1,972	---	---
---	---	---	---	---	---	pH1 Ref	1,020	pH1 S10	1,029	Acerto pH (1,5 ml; 0,5 ml)	---	---	---	1,019
13-12-2017	17:00	---	---	---	---	pH1 Ref	0,930	pH1 S10	1,040	Tempo de reação: 23 dias	0,967	1,925	0,960	1,982
15-12-2017	17:00	---	---	---	---	pH1 Ref	1,047	pH1 S10	1,092	Tempo de reação: 25 dias	---	---	---	---
18-12-2017	17:00	---	---	---	---	pH1 Ref	1,108	pH1 S10	1,147	Tempo de reação: 28 dias	1,038	2,007	---	---
---	---	---	---	---	---	pH1 Ref	1,031	pH1 S10	1,038	Acerto pH (0,3 ml; 0,4 ml)	---	---	---	0,978
26-12-2017	10:30	---	---	---	---	pH1 Ref	1,266	pH1 S10	1,244	Tempo de reação: 36 dias	0,989	2,007	---	---
---	---	---	---	---	---	pH1 Ref	0,940	pH1 S10	1,005	Acerto pH (1,5 ml; 1,5 ml)	---	---	---	0,984
04-01-2018	14:00	---	---	---	---	pH1 Ref	1,146	pH1 S10	1,010	Tempo de reação: 45 dias	0,960	1,961	---	---
---	---	---	---	---	---	pH1 Ref	0,979	---	---	Acerto pH (0,5 ml)	---	---	---	0,930
08-01-2018	10:45	---	---	---	---	pH1 Ref	1,102	pH1 S10	1,085-1,109	Tempo de reação: 49 dias	0,967	1,985	---	---
---	---	---	---	---	---	pH1 Ref	1,045	pH1 S10	1,063	Acerto pH (0,2 ml; 0,1 ml)	---	---	---	0,969
10-01-2018	18:00	---	---	---	---	pH1 Ref	1,117	pH1 S10	1,162	Tempo de reação: 51 dias	0,941	1,938	---	---
---	---	---	---	---	---	pH1 Ref	1,057	pH1 S10	1,053	Acerto pH (0,4 ml; 0,5 ml)	---	---	---	0,958
15-01-2018	10:15	---	---	---	---	pH1 Ref	1,082	pH1 S10	1,066	Tempo de reação: 56 dias	0,958	1,984	0,964	1,926
18-01-2018	18:00	---	---	---	---	pH1 Ref	1,139	pH1 S10	1,086	Tempo de reação: 59 dias	0,949	1,959	---	---
---	---	---	---	---	---	pH1 Ref	1,057	---	---	Acerto pH (0,4 ml)	---	---	---	0,943
22-01-2018	18:00	---	---	---	---	pH1 Ref	1,128	pH1 S10	1,113	Tempo de reação: 63 dias	0,962	1,941	---	---
---	---	---	---	---	---	pH1 Ref	1,016	pH1 S10	1,049	Acerto pH (0,4 ml; 0,3 ml)	---	---	---	0,936
29-01-2018	9:30	---	---	---	---	pH1 Ref	1,071	pH1 S10	1,122	Tempo de reação: 70 dias	0,931	1,943	---	---
---	---	---	---	---	---	pH1 S10	1,035	---	---	Acerto pH (0,3 ml)	---	---	---	0,929

Observações:
pH0 - 14 dias; pH1 - 70 dias

Figura 8.2 Descrição das soluções de teste, medições de pH efetuadas e respetivas correções. Campanha experimental 2.

8.2. Anexo B – Medições detalhadas de provetes após imersão

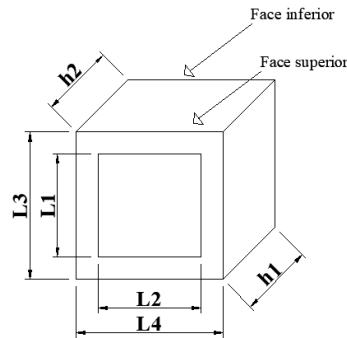


Figura 8.3 – Esquema de medições efetuadas em provetes após imersão.

Duração de imersão	Solução de imersão	Face superior (interior)			Face superior (exterior)			Face inferior (interior)			Face inferior (exterior)			A _m (mm ²)	h ₁ (mm)	h ₂ (mm)
		L ₁ (mm)	L ₂ (mm)	A _m (mm ²)	L ₃ (mm)	L ₄ (mm)	A _m (mm ²)	L ₁ (mm)	L ₂ (mm)	A _m (mm ²)	L ₃ (mm)	L ₄ (mm)	A _m (mm ²)			
7 dias	água	41,24	40,35	1664			0	40,39	41,16	1662			0	1663	40,20	39,72
		40,34	41,35	1668			0	40,31	41,12	1658			0	1663	40,18	40,08
		40,79	41,38	1688			0	41,52	41,34	1716			0	1702	40,60	40,30
	ácido pH0	35,11	36,19	1271	42,04	41,85	1759	35,7	35,54	1269	40,91	42,04	1720	1740	38,93	40,20
		34,11	35,70	1218	42,26	42,02	1776	35,2	36,72	1293	42,72	42,26	1805	1791	38,72	40,06
		35,76	35,09	1255	41,99	42,18	1771	35,6	34,36	1223	41,84	41,99	1757	1764	39,42	40,52
14 dias	água	41,52	40,17	1668			0	41,21	40,33	1662			0	1665	39,77	39,66
		41,59	40,22	1673			0	41,32	40,24	1663			0	1668	41,37	40,87
		41,31	40,23	1662			0	41,92	40,23	1686			0	1674	40,78	40,64
	ácido pH0	31,84	31,59	1006	43,99	44,18	1943	35,64	35,23	1256	44,32	44,36	1966	1955	39,52	39,01
		31,32	32,11	1006	43,92	44,30	1946	32,02	31,28	1002	44,23	44,21	1955	1951	40,19	40,53
		31,61	31,12	984	43,89	44,17	1939	31,93	31,87	1018	44,04	44,15	1944	1941	40,73	40,74
21 dias	água	40,20	40,64	1634			0	40,13	40,54	1627			0	1630	40,39	40,07
		40,25	40,91	1647			0	40,84	40,18	1641			0	1644	39,62	39,72
		40,25	40,59	1634			0	40,86	40,24	1644			0	1639	40,31	40,42
	ácido pH0	29,26	29,67	868	46,94	45,98	2158	29,70	30,05	892	45,59	46,79	2133	880	40,46	40,01
		29,46	29,44	867	46,82	45,58	2134	29,12	29,83	869	45,65	47,10	2150	868	40,10	40,08
		29,98	29,13	873	46,73	45,68	2135	29,50	28,74	848	45,86	46,90	2151	861	40,17	40,05

Figura 8.4 Medições detalhadas de provetes de Mapei Sewament 10 após imersão.

Duração de imersão	Solução de imersão	Face superior (interior)			Face superior (exterior)			Face inferior (interior)			Face inferior (exterior)			A _m (mm ²)	h ₁ (mm)	h ₂ (mm)
		L ₁ (mm)	L ₂ (mm)	A _m (mm ²)	L ₃ (mm)	L ₄ (mm)	A _m (mm ²)	L ₁ (mm)	L ₂ (mm)	A _m (mm ²)	L ₃ (mm)	L ₄ (mm)	A _m (mm ²)			
7 dias	água	40,70	40,28	1639			0	40,3	40,28	1623			0	1631	40,76	40,51
		40,50	40,04	1622			0	40,49	40,11	1624			0	1623	40,37	40,21
		40,37	40,28	1626			0	40,26	40,17	1617			0	1622	39,82	39,73
	ácido pH0	34,98	33,82	1183	37,20	38,01	1414	34,38	34,6	1190	36,84	37,67	1388	1186	40,55	40,85
		34,20	26,08	892	36,32	38,50	1398	34,77	35,34	1229	37,8	37,23	1407	1060	40,72	40,77
		35,22	35,63	1255	37,16	38,04	1414	35,29	35,44	1251	38,22	38,38	1467	1253	39,44	39,37
14 dias	água	40,44	40,29	1629			0	40,16	40,27	1617			0	1623	40,60	40,68
		40,39	40,30	1628			0	40,38	40,45	1633			0	1631	40,77	41,06
		40,32	40,33	1626			0	40,37	40,33	1628			0	1627	39,04	39,08
	ácido pH0	32,61	31,62	1031	34,79	34,74	1209	31,25	31,06	971	33,52	33,99	1139	1001	40,18	40,38
		30,99	31,12	964	34,23	35,18	1204	30,60	31,51	964	34,16	34,25	1170	964	41,42	41,41
		30,54	31,72	969	34,24	34,03	1165	30,21	31,56	953	34,37	33,86	1164	961	38,36	38,33
21 dias	água	40,43	40,18	1624			0	40,21	40,18	1616			0	1620	39,54	39,92
		40,19	40,31	1620			0	40,74	40,19	1637			0	1629	40,14	40,58
		40,29	40,15	1618			0	40,24	40,15	1616			0	1617	40,06	40,18
	ácido pH0	26,84	27,18	730	30,45	29,83	908	26,64	27,40	730	29,65	30,58	907	730	40,49	40,54
		26,93	28,09	756	30,29	30,08	911	26,51	26,93	714	30,39	30,27	920	735	39,46	39,32
		26,45	28,03	741	30,37	29,94	909	27,77	25,99	722	30,27	30,80	932	732	39,96	39,88

Figura 8.5 Medições detalhadas de provetes de argamassa de referência após imersão.

8.3. Anexo C – Registo fotográfico de provetes revestidos com pintura epoxidica, após ensaios de imersão.

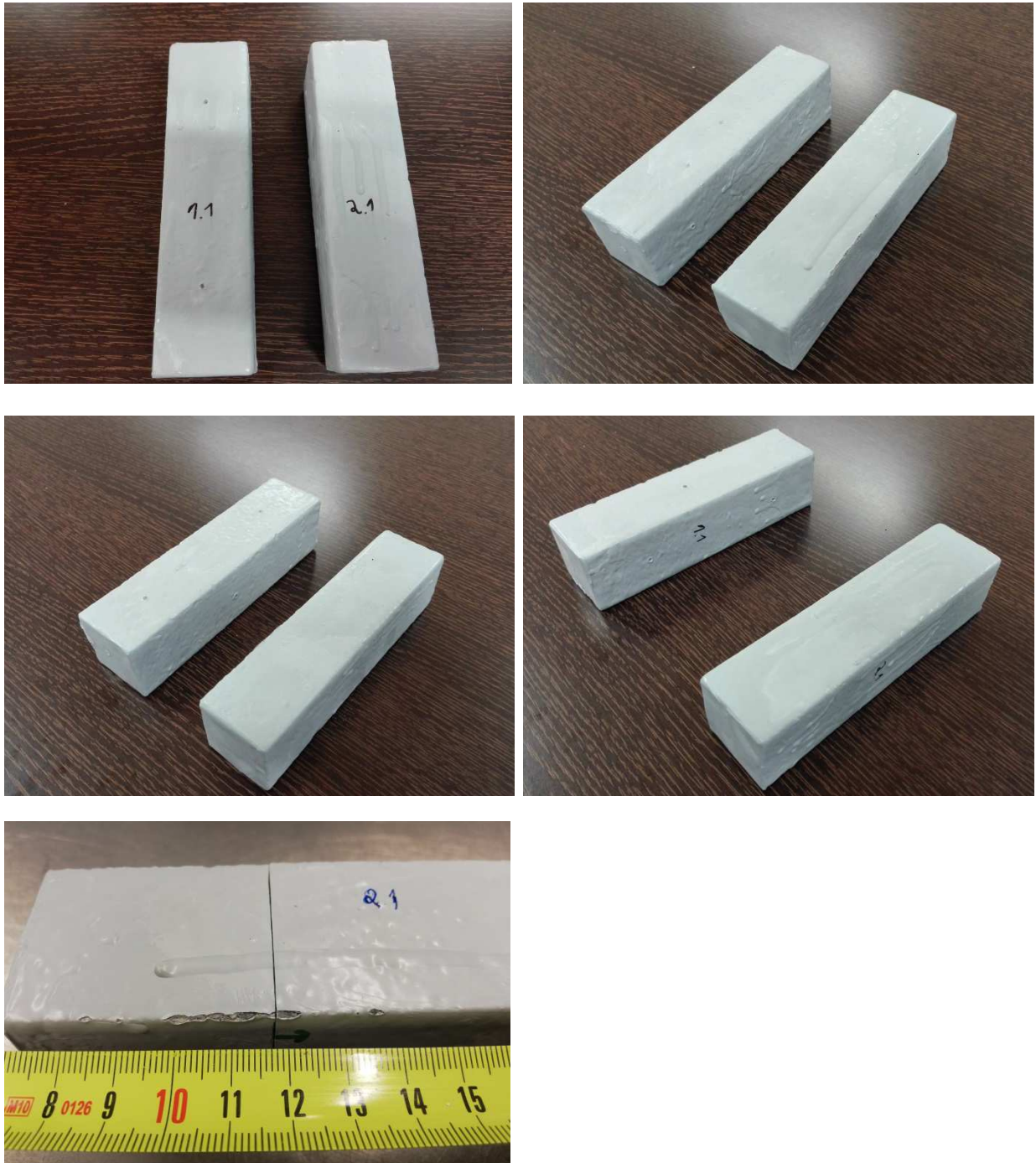


Figura 8.6 – Fotografias de provetes de argamassa de elevada resistência química, revestidos com epóxi, COM introdução de defeitos na pintura (ref^a 1.1) e SEM introdução de defeitos na pintura (ref^a 2.1), após 7 dias de imersão em ácido.

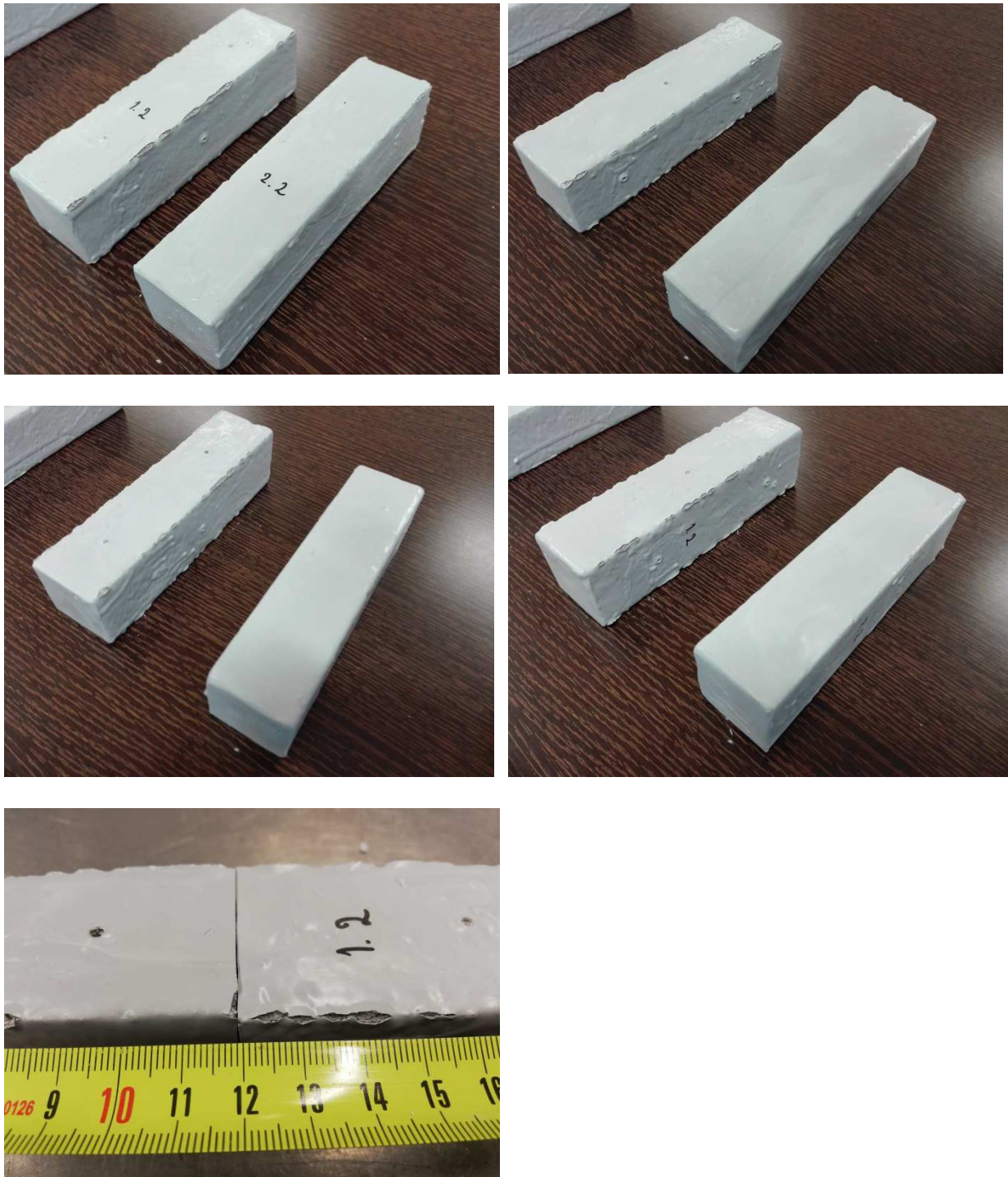


Figura 8.7 – Fotografias de provetes de argamassa de elevada resistência química, revestidos com epóxi, COM introdução de defeitos na pintura (ref^a 1.2) e SEM introdução de defeitos na pintura (ref^a 2.2), após 14 dias de imersão em ácido.

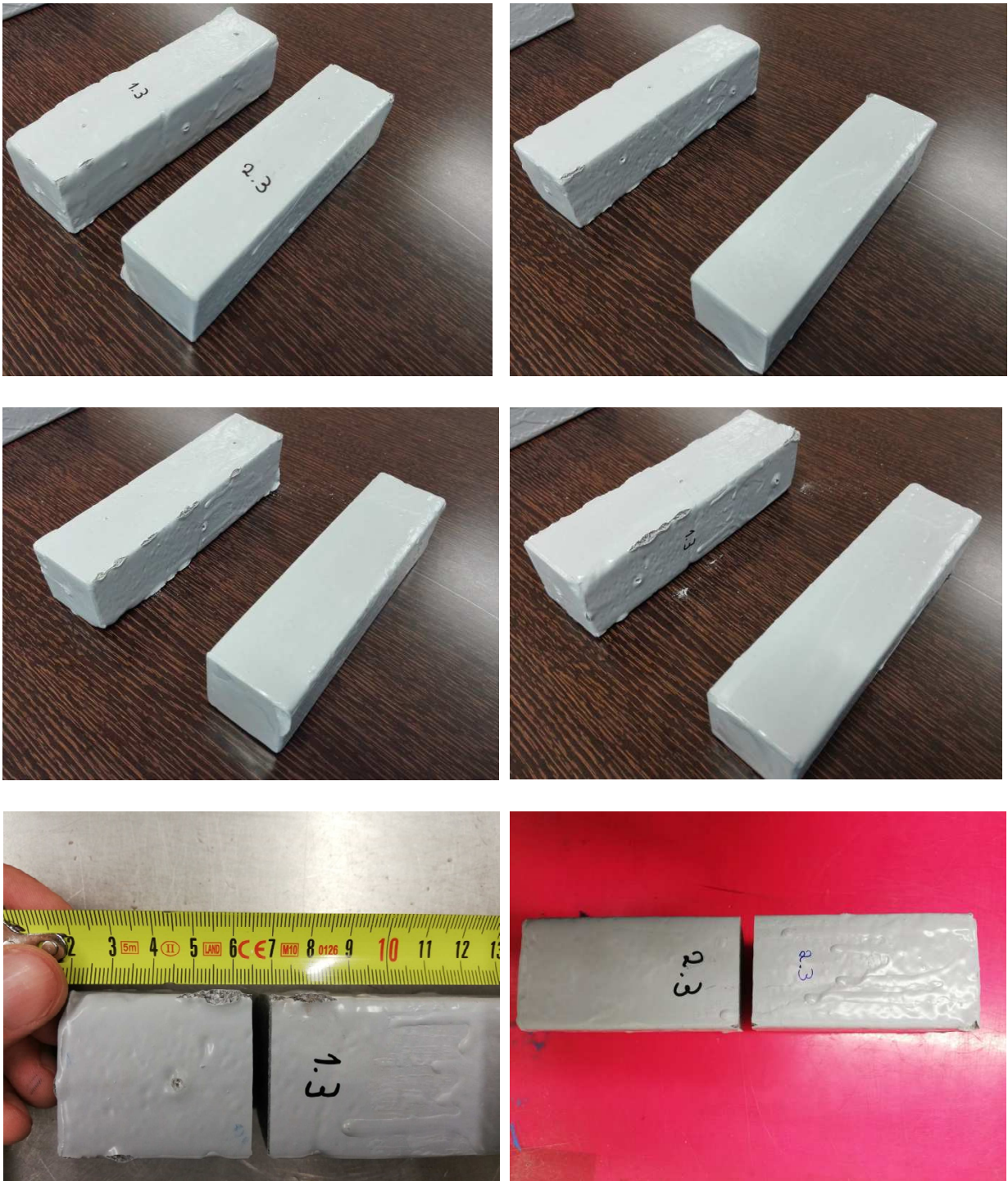


Figura 8.8 – Fotografias de provetes de argamassa de elevada resistência química, revestidos com epóxi, COM introdução de defeitos na pintura (ref^a 1.3) e SEM introdução de defeitos na pintura (ref^a 2.3), após 21 dias de imersão em ácido.

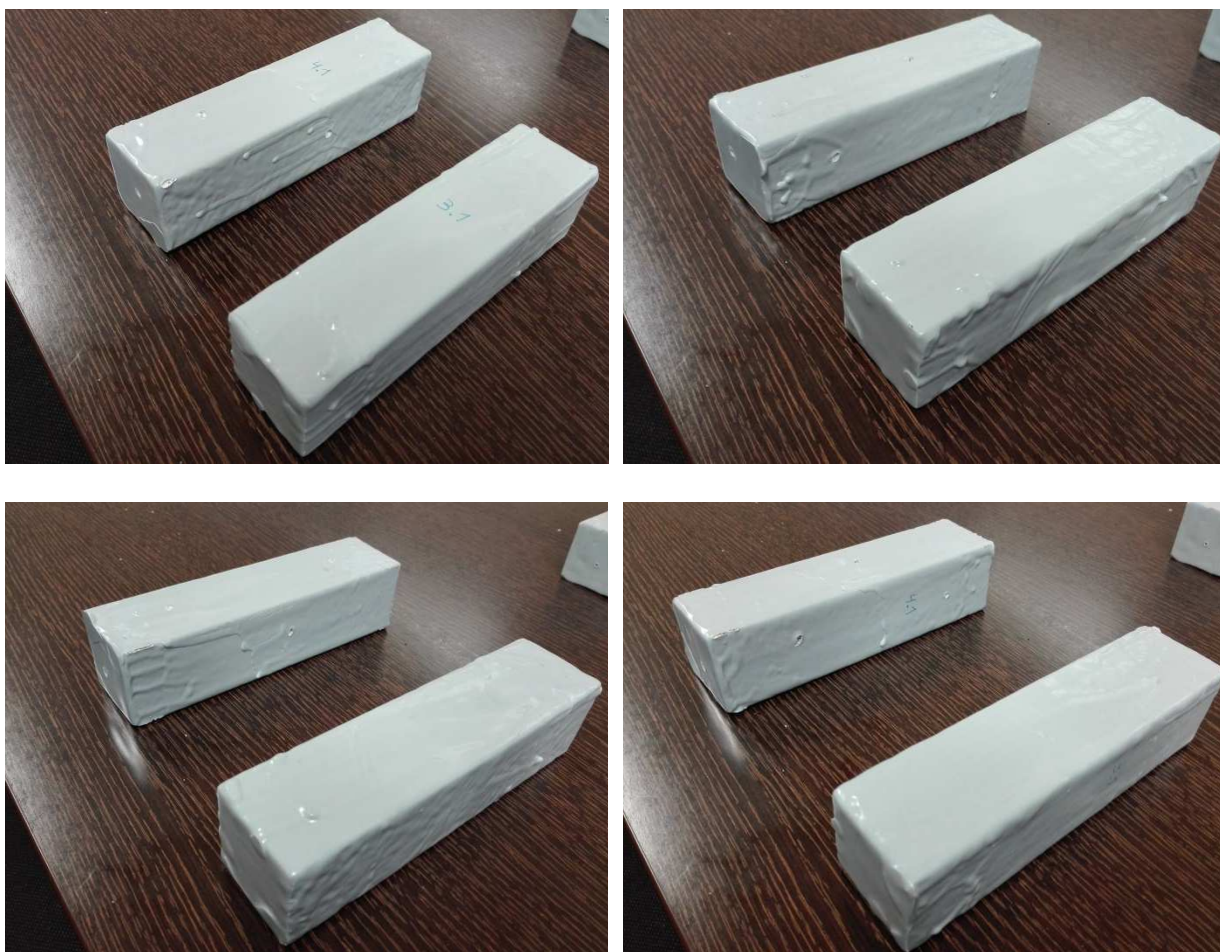


Figura 8.9 – Fotografias de provetes de argamassa de referência, revestidos com epóxi, COM introdução de defeitos na pintura (ref^a 4.1) e SEM introdução de defeitos na pintura (ref^a 3.1), após 7 dias de imersão em ácido.



Figura 8.10 – Fotografias de provetes de argamassa de referência, revestidos com epóxi, COM introdução de defeitos na pintura (ref^a 4.2) e SEM introdução de defeitos na pintura (ref^a 3.2), após 14 dias de imersão em ácido.



Figura 8.11 – Fotografias de provetes de argamassa de referência, revestidos com epóxi, COM introdução de defeitos na pintura (ref^a 4.3) e SEM introdução de defeitos na pintura (ref^a 3.3), após 21 dias de imersão em ácido.