



LABORATÓRIO NACIONAL
DE ENGENHARIA CIVIL

RESERVADO

**INSPEÇÃO COMPLEMENTAR DOS ELEMENTOS
DE BETÃO ARMADO DAS FACHADAS DO EDIFÍCIO
DO BANCO DE PORTUGAL NA AV. ALMIRANTE REIS**



LABORATÓRIO NACIONAL
DE ENGENHARIA CIVIL

RESERVADO

INSPEÇÃO COMPLEMENTAR DOS ELEMENTOS DE BETÃO ARMADO DAS FACHADAS DO EDIFÍCIO DO BANCO DE PORTUGAL NA AV. ALMIRANTE REIS

Banco de Portugal

Lisboa • fevereiro 2022

I&D MATERIAIS

RELATÓRIO 54/2022 – DM/NBPC

Título

INSPEÇÃO COMPLEMENTAR DOS ELEMENTOS DE BETÃO ARMADO DAS FACHADAS DO EDIFÍCIO DO BANCO DE PORTUGAL NA AV. ALMIRANTE REIS

Autoria

DEPARTAMENTO DE MATERIAIS

André Valente Monteiro

Investigador Auxiliar, Núcleo de Betões, Pedra e Cerâmicos

Copyright © LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL, I. P.

AV DO BRASIL 101 • 1700-066 LISBOA

e-mail: lnec@lnec.pt

www.lnec.pt

Relatório 54/2022

Proc. 0202/1201/23014

INSPEÇÃO COMPLEMENTAR DOS ELEMENTOS DE BETÃO ARMADO DAS FACHADAS DO EDIFÍCIO DO BANCO DE PORTUGAL NA AV. ALMIRANTE REIS

Resumo

Neste relatório é complementada a inspeção realizada pelo LNEC em 2020, descrita no Relatório 154/2020 – DM/NBPC, com recurso a drone, dos elementos de betão armado das fachadas do edifício do Banco de Portugal na Av. Almirante Reis, em Lisboa, tendo-se procedido a uma inspeção visual, com recurso a andaimes, e realização de ensaios de determinação da profundidade de carbonatação do betão e da espessura do betão de recobrimento.

Com base nos resultados da inspeção, é complementada a proposta de intervenção e manutenção descrita no relatório acima mencionado.

Palavras-chave: Durabilidade / Inspeção / Reparação / Carbonatação / Drone

COMPLEMENTARY INSPECTION OF THE REINFORCED CONCRETE ELEMENTS OF THE FACADES OF THE BUILDING OF BANCO DE PORTUGAL ON AV. ALMIRANTE REIS

Abstract

In this report is complemented the inspection carried out by LNEC in 2020, described in the Report 154/2020 – DM/NBPC, of the reinforced concrete elements of the facades of the Banco de Portugal building on Av. Almirante Reis, in Lisbon, having carried out a visual inspection, using a scaffolding, and assessing concrete carbonation depth and concrete cover depth.

Based on the inspection results, it is complemented the intervention and maintenance proposal described in the aforementioned report.

Keywords: Durability / Inspection / Repair / Carbonation / Drone

Índice

1	Introdução	1
2	Enquadramento e abordagem	2
3	Procedimento experimental	6
3.1	Inspeção visual (<i>in loco</i>)	6
3.2	Determinação da profundidade de carbonatação e da espessura do betão de recobrimento	7
4	Resultados dos ensaios	12
4.1	Inspeção visual	12
4.2	Profundidade de carbonatação e espessura do betão de recobrimento.....	16
5	Análise dos resultados	21
5.1	Avaliação da evolução da degradação ao longo do tempo.....	21
6	Complemento à proposta de intervenção e manutenção descrita no Relatório 154/2020 – DM/NBPC	27
7	Conclusões.....	29
	Referências bibliográficas	31
	Anexos.....	33
	ANEXO I Identificação dos elementos de betão com áreas degradadas	35
	ANEXO II Leituras da espessura do betão de recobrimento	43

Índice de figuras

Figura 2.1 – Fragmento de betão removido de um elemento vertical da fachada sul do edifício de ampliação.....	4
Figura 2.2 – Aberturas efetuadas para verificação do estado da armadura por baixo das fissuras transversais dos elementos verticais.....	4
Figura 2.3 – Fissura no perímetro da zona reparada de um elemento vertical da fachada sul do edifício de ampliação	5
Figura 3.1 – Área inspecionada com recurso a andaimes. Fachada nascente.....	6
Figura 3.2 – Área inspecionada com recurso a andaimes. Fachada sul.....	6
Figura 3.3 – Área inspecionada com recurso a andaimes. Fachada poente.....	7
Figura 3.4 – Zonas complementares selecionadas para melhorar a avaliação da evolução da degradação dos elementos verticais pré-fabricados	11
Figura 4.1 – Calha de retenção de água dos AVACs com rotura de um dos dois pontos de fixação..	12
Figura 4.2 – Percentagem de elementos verticais pré-fabricados degradados. Fachadas exteriores (para a via pública)	14
Figura 4.3 – Fotografias tipo da fachada poente	15
Figura 4.4 – Fragmentos de betão removidos de um elemento vertical pré-fabricado da fachada poente	16
Figura 4.5 – Carotes de betão extraídas dos elementos	18
Figura 5.1 – Tempo de vida útil total e remanescente nos elementos verticais pré-fabricados da fachada nascente.....	24
Figura 5.2 – Tempo de vida útil total e remanescente nos elementos verticais e painéis pré-fabricados do edifício da antiga Fábrica de Portugal	25
Figura 6.1 – Gráfico de teste de 0,25 par de linhas/milímetro segundo o padrão 1951 USAF (dimensões em mm)	27
Figura A.1 – Elementos degradados da fachada nascente (Avenida Almirante Reis)	37
Figura A.2 – Elementos degradados da fachada sul (Rua Febo Moniz)	39
Figura A.3 – Elementos degradados da fachada poente (Rua Francisco Ribeiro e Rua Regueirão dos Anjos).....	41

Índice de quadros

Quadro 3.1 – Áreas de ensaio onde foram realizados ensaios de determinação da profundidade de carbonatação e espessura do betão de recobrimento	8
Quadro 3.2 – Áreas de ensaio onde foi determinada a espessura do betão de recobrimento em zonas complementares dos elementos verticais pré-fabricados	8
Quadro 4.1 – Quantidade de locais degradados. Ed. de ampliação. Fachada nascente.....	13
Quadro 4.2 – Quantidade de locais degradados. Ed. de ampliação. Fachada sul.....	13
Quadro 4.3 – Quantidade de locais degradados. Ed. antiga Fáb. de Portugal. Fachada sul.....	13
Quadro 4.4 – Quantidade de locais degradados. Ed. antiga Fáb. de Portugal. Fachada poente	14
Quadro 4.5 – Resultados dos ensaios de determinação da profundidade de carbonatação e da espessura do betão de recobrimento	19
Quadro 4.6 – Resultados dos ensaios de determinação da espessura do betão de recobrimento nas zonas complementares dos elementos verticais das fachadas sul nascente	20
Quadro 5.1 – Leituras usadas no cálculo da média e desvio padrão da espessura de recobrimento .	22
Quadro 5.2 – Estimativa da atual percentagem de armadura despassivada dos elementos das fachadas exteriores.....	23
Quadro AI.1 – Leituras da espessura do betão de recobrimento	45

1 | Introdução

O Banco de Portugal, através da plataforma Vortal, formalizou ao LNEC um convite, com a referência OA022621 - LX2 - Reavaliação do estado de conservação dos elementos em betão armado, das fachadas do edifício do Banco de Portugal, para a apresentação de uma proposta de estudo para reavaliar o estado de conservação dos elementos de betão pré-fabricado das fachadas do Edifício do Banco de Portugal, sito na Rua Francisco Ribeiro, em Lisboa, bem como para avaliar a perigosidade das anomalias detetadas nestes elementos e definir uma nova estratégia de intervenção face à já proposta no Relatório 154/2020 – DM/NBPC.

A necessidade de realização deste estudo deveu-se ao facto de, durante a reparação dos elementos da fachada sul do Edifício de Ampliação, terem sido detetados elementos degradados para além dos identificados no Relatório 154/2020 – DM/NBPC do LNEC, e que haveria o risco iminente de queda para a via pública de fragmentos de betão de alguns destes elementos. Após tal constatação, o LNEC alertou o Banco de Portugal, através de mensagem de correio eletrónico (a 26 de fevereiro de 2021), para a necessidade de serem implementadas medidas de proteção contra a queda de material das fachadas e de ser adotada uma metodologia de intervenção mais conservativa do que a proposta no Relatório 154/2020 – DM/NBPC.

No presente relatório são descritos os trabalhos de reinspeção realizados e é efetuada uma avaliação complementar do estado de conservação dos elementos de betão armado das fachadas do edifício do Banco de Portugal expostas para a via pública. Por fim, é complementada a metodologia de intervenção proposta inicialmente no Relatório 154/2020 – DM/NBPC.

2 | Enquadramento e abordagem

Na sequência da inspeção visual realizada com recurso a drone, durante os meses de janeiro e fevereiro de 2020, aos elementos de betão armado das fachadas do edifício do Banco de Portugal (composto pelo edifício da antiga Fábrica de Portugal e pelo edifício de ampliação), o LNEC elaborou o Relatório 154/2020 – DM/NBPC (2020), categorizando a degradação dos elementos da seguinte forma:

Categoria A – Degradação de risco não desprezável – Sinais de iminente destacamento do betão de recobrimento ou de excessiva degradação com risco de aceleração da corrosão das armaduras e conseqüente destacamento do betão a curto prazo, tais como: empolamento do betão, fissuras curvilíneas ou nos cantos dos elementos, fissuras que se intersectam, fissuras com elevada abertura, elevada densidade de fissuras, e exposição de armadura;

Categoria B – Degradação de baixo risco – Fissuras isoladas, sobretudo transversais aos elementos.

No mesmo relatório apresentou-se uma proposta de intervenção baseada na reparação pontual das zonas degradadas, considerando a seguinte ordem de prioridade, sendo os dois primeiros pontos de carácter urgente:

1. Ligações (ancoragens) entre elementos pré-fabricados verticais e horizontais das varandas dos pisos 7 e 8;
2. Elementos pré-fabricados horizontais das varandas dos pisos 7 e 8 e elementos verticais pré-fabricados da fachada sul (Rua Febo Moniz) do edifício de ampliação;
3. Restantes elementos das fachadas exteriores;
4. Patins das escadas exteriores do edifício de ampliação;
5. Restantes elementos das fachadas do pátio interior e elementos da fachada da Rua Regueirão dos Anjos.

Por forma a controlar os riscos associados ao desenvolvimento da corrosão das armaduras dos elementos, foi ainda recomendada a realização de uma nova inspeção visual num espaço de 4 anos (até 2024, inclusive).

Durante os trabalhos de reparação da fachada sul do edifício de ampliação, realizados no final de 2020, o Banco de Portugal informou o LNEC sobre a ocorrência de locais degradados que não se encontravam identificados no Relatório 154/2020 – DM/NBPC (2020), bem como locais com aparente risco de queda iminente de fragmentos de betão para a via pública. Posteriormente, no dia 9 de dezembro de 2020, o LNEC deslocou-se à obra onde efetuou uma breve inspeção visual aos elementos da mesma fachada (recorrendo aos andaimes instalados para a realização dos trabalhos de reparação) onde verificou os seguintes aspetos:

- Confirmação da ocorrência de um elemento vertical com degradação da categoria A não identificado no Relatório 154/2020 – DM/NBPC (2020), e observação de fragmento de betão, de dimensão considerável, previamente removido do mesmo elemento (Figura 2.1), sugerindo um elevado risco de iminente destacamento e queda para a via pública;
- Com base na observação de aberturas em alguns dos elementos verticais pré-fabricados (efetuadas pelo empreiteiro que realizou os trabalhos de reparação), verificou-se que as fissuras transversais destes elementos não se devem à corrosão das armaduras, sendo concordante com o presumido no Relatório 154/2020-DM/NBPC, onde foram consideradas de baixo risco (Figura 2.2);
- Ocorrência de fissuração no material das reparações efetuadas, o que se deve à partida à retração por secagem da argamassa, o que pode comprometer a ligação entre a argamassa e o betão do substrato;
- Segundo a informação prestada pelo empreiteiro, não foi possível, em algumas das reparações efetuadas, remover o betão atrás das armaduras com corrosão, fazendo com que o material de reparação nem sempre se encontre devidamente confinado pelas armaduras dos elementos, aumentando o risco de desenvolvimento da corrosão na face posterior destas armaduras e do conseqüente destacamento (e queda para a via pública) do material de reparação.

Após alguns esclarecimentos efetuados pelo Banco de Portugal, o LNEC comunicou a esta entidade, através de mensagem de correio eletrónico no dia 26 de fevereiro, que considerava que o risco de destacamento e conseqüente queda de material das fachadas do edifício (betão original, mas também argamassa de zonas recentemente reparadas) seria superior ao previsto no Relatório 154/2020-DM/NBPC, tendo recomendado que:

- Fosse adotadas medidas de proteção, de carácter urgente, contra a queda de material das fachadas expostas quer para a via pública, como para as zonas acessíveis do pátio, por forma a proteger pessoas e bens;
- Fosse corrigidas as zonas reparadas com sinais de fissuração do material de reparação ou onde o material de reparação não envolva as armaduras, tal como recomendado no Relatório 154/2020-DM/NBPC;
- Após esta correção, fosse implementada uma metodologia de intervenção mais conservativa do que a proposta no Relatório 154/2020-DM/NBPC, de modo a diminuir o risco de queda de fragmentos dos elementos de betão das fachadas.



Figura 2.1 – Fragmento de betão removido de um elemento vertical da fachada sul do edifício de ampliação



Figura 2.2 – Aberturas efetuadas para verificação do estado da armadura por baixo das fissuras transversais dos elementos verticais



Figura 2.3 – Fissura no perímetro da zona reparada de um elemento vertical da fachada sul do edifício de ampliação

Após alguns esclarecimentos por parte do Banco de Portugal, ocorridos numa reunião por videoconferência no dia 9 de março de 2021, o LNEC propôs a realização de uma inspeção visual *in loco* por amostragem, complementar à efetuada com drone, nas fachadas do edifício expostas para a via pública, bem como a realização de ensaios de determinação da espessura do betão de recobrimento e da profundidade de carbonatação do betão dessas fachadas. Esta proposta, concretizada no presente relatório, tinha como principais objetivos:

- Avaliar a capacidade de deteção das anomalias baseada na inspeção realizada com o drone e o risco de queda de fragmentos de betão dos elementos degradados, dando apoio à decisão sobre a realização duma inspeção-geral das fachadas com recurso aos andaimes;
- Estimar a evolução da degradação dos elementos de betão armado das fachadas ao longo dos próximos anos, por forma a dar apoio ao planeamento dos trabalhos de manutenção, monitorização, substituição ou remoção dos elementos das fachadas.

Posteriormente, o Banco de Portugal optou pela instalação de andaimes com rede protetora nas fachadas do edifício na Av. Almirante Reis (fachada nascente), Rua Febo Moniz (fachada sul) e Rua Francisco Ribeiro (fachada poente).

A inspeção visual, a determinação da espessura do betão de recobrimento e a extração de carotes para determinação da profundidade de carbonatação do betão ocorreram durante o mês de julho de 2021 (cerca de um ano e meio após a inspeção com drone). Com vista a melhorar a avaliação da evolução da degradação dos elementos verticais pré-fabricados, foi posteriormente efetuada uma nova deslocação à obra, no dia 9 de novembro de 2021, onde foram determinadas as espessuras do betão de recobrimento em zonas destes elementos não contempladas na inspeção efetuada no mês de julho de 2021, consideradas como zonas de maior risco de corrosão das armaduras.

3 | Procedimento experimental

3.1 Inspeção visual (*in loco*)

A inspeção visual (*in loco*) dos elementos de betão armado foi realizada por um técnico do LNEC , recorrendo a andaimes, nas fachadas exteriores do edifício do Banco de Portugal expostas para nascente, sul e poente. Apesar de se ter inicialmente previsto realizar uma inspeção por amostragem, foi possível inspecionar todos os tipos de elementos pré-fabricados (elementos verticais, pilares e painéis de argamassa armada horizontais e verticais) da quase totalidade destas fachadas. Nas Figuras 3.1 a 3.3 encontram-se identificadas, a azul, as áreas (das fachadas) cobertas por esta nova inspeção visual.

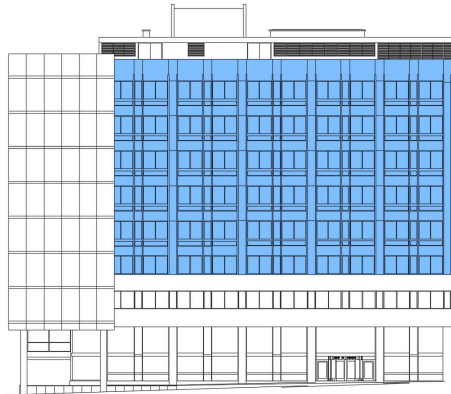


Figura 3.1 – Área inspecionada com recurso a andaimes. Fachada nascente

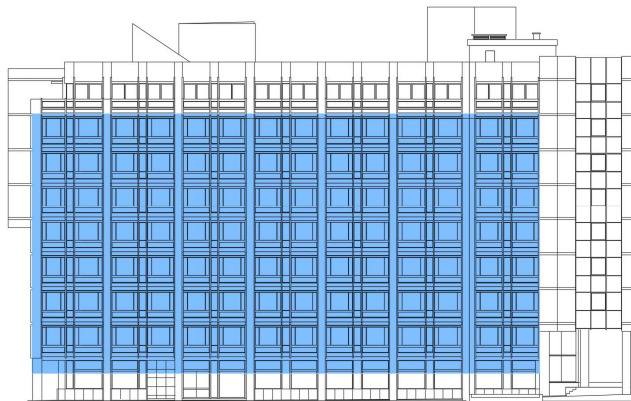


Figura 3.2 – Área inspecionada com recurso a andaimes. Fachada sul

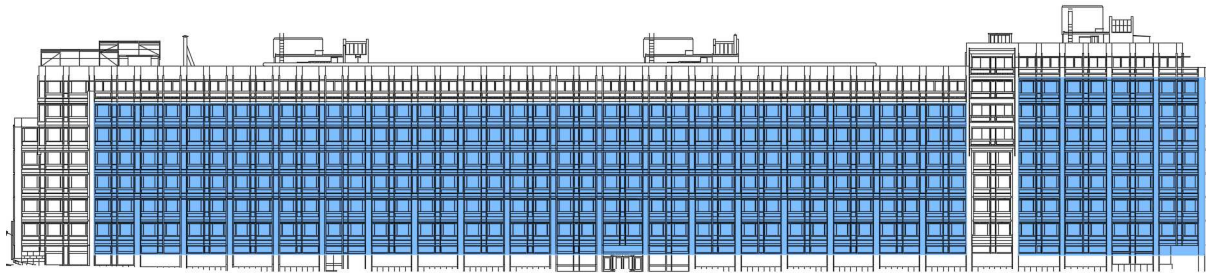


Figura 3.3 – Área inspecionada com recurso a andaimes. Fachada poente

Nesta inspeção visual foram identificados todos os elementos degradados pertencentes à categoria A (degradação de risco não desprezável), salientando-se os locais onde se considera que existe risco de queda iminente de fragmentos de betão. Complementarmente, foram ainda identificadas as calhas de retenção de água dos AVACs que, devido à degradação do sistema de fixação, apenas apresentam um ponto de fixação à fachada, exibindo, portanto, um elevado risco de queda. Relativamente aos elementos degradados da categoria B (degradação de baixo risco), por se ter verificado que a causa deste tipo de degradação não se encontra associada à corrosão das armaduras, não foram contemplados nesta inspeção.

Relativamente aos locais não identificados a azul nas Figuras 3.1 a 3.3, à fachada exterior norte e às fachadas expostas para o pátio interior do edifício, apenas existe a informação sobre a degradação dos elementos de betão obtida na inspeção realizada com drone.

3.2 Determinação da profundidade de carbonatação e da espessura do betão de recobrimento

Durante o mesmo período em que decorreu a inspeção visual, foram extraídas dos elementos de betão das fachadas nascente, sul e poente do edifício do Banco de Portugal 30 microcarotes de betão (com diâmetros entre os 33 e os 46 mm) para determinação da profundidade de carbonatação. Nos mesmos locais de extração das microcarotes, foram medidas as espessuras do betão de recobrimento.

Adicionalmente, foram determinadas as espessuras de betão de recobrimento em zonas complementares dos elementos verticais pré-fabricados das fachadas nascente do edifício de ampliação, e da fachada sul do edifício da antiga Fábrica de Portugal.

A localização das áreas de ensaio encontra-se descrita nos Quadros 3.1 e 3.2 e representada nos desenhos em anexo.

Quadro 3.1 – Áreas de ensaio onde foram realizados ensaios de determinação da profundidade de carbonatação e espessura do betão de recobrimento

Área de ensaio	Fachada	Edifício	Piso	Elemento	Diâmetro da carote (mm)
EV1	Nascente	Amp.	6	EVP	46
EV2	Nascente	Amp.	4	EVP	46
EV3	Nascente	Amp.	7	EVP	46
P1	Nascente	Amp.	7	Pilar	46
P2	Nascente	Amp.	6	Pilar	46
PA4	Sul	Amp.	4	Parede	33
EV4	Sul	Amp.	1	EVP	33
EV5	Sul	Amp.	7	EVP	33
EV6	Sul	PT	1	EVP	33
EV7	Sul	PT	7	EVP	33
EV8	Sul	PT	5	EVP	33
EV9	Sul	PT	2	EVP	33
EV10	Sul	PT	6	EVP	33
P5	Sul	PT	1	PilarPF	33
EV11	Poente	PT	1	EVP	33
EV12	Poente	PT	4	EVP	33
EV13	Poente	PT	2	EVP	33
EV14	Poente	PT	7	EVP	33
EV15	Poente	PT	1	EVP	33
EV16	Poente	PT	1	EVP	33
EV17	Poente	PT	6	EVP	33
EV18	Poente	PT	4	EVP	33
EV19	Poente	PT	1	EVP	33
EV20	Poente	PT	5	EVP	33
EV21	Poente	PT	4	EVP	33
P11	Poente	PT	4	PilarPF	33
P12	Poente	PT	1	PilarPF	33
P15	Poente	PT	2	PilarPF	33
P16	Poente	PT	2	PilarPF	33
P17	Poente	PT	1	PilarPF	33

PT – Edifício da antiga Fábrica de Portugal

Amp. – Edifício de ampliação

EVP – Elementos verticais pré-fabricados

PilarPF – Painéis pré-fabricados de revestimento

Quadro 3.2 – Áreas de ensaio onde foi determinada a espessura do betão de recobrimento em zonas complementares dos elementos verticais pré-fabricados

Área de ensaio	Fachada	Edifício	Piso
EV1	Nascente	Amp.	6
EV2	Nascente	Amp.	4
EV3	Nascente	Amp.	7
EV22	Nascente	Amp.	4
EV23	Nascente	Amp.	7
EV6	Sul	PT	1
EV10	Sul	PT	6
EV24	Sul	PT	2
EV25	Sul	PT	5
EV26	Sul	PT	7

PT – Edifício da antiga Fábrica de Portugal

Amp. – Edifício de ampliação

A profundidade de carbonatação foi determinada em laboratório, fraturando-se longitudinalmente as carotes extraídas e aspergindo-se uma solução alcoólica de fenolftaleína numa das superfícies fraturadas, medindo-se com um paquímetro em 3 pontos equidistantes a profundidade a partir da qual

a superfície da carote apresenta uma cor rosada. O resultado do ensaio corresponde ao valor médio das 3 leituras da profundidade de carbonatação.

A espessura do betão de recobrimento foi medida com um pacómetro eletromagnético (Elcometer 331), que requer a indicação do diâmetro da armadura, tendo-se assumido para todos os varões um diâmetro de 5 mm (valor mínimo permitido pelo equipamento). Note-se que relativamente aos elementos verticais pré-fabricados, a sua reduzida dimensão, o reduzido diâmetro dos varões (2,5 mm nos elementos do edifício da Antiga Fábrica de Portugal, e 3 mm nos elementos do edifício de ampliação) e a presença de calhas metálicas dificultou significativamente a medição da espessura do betão de recobrimento. Por este motivo, em algumas zonas (descritas no final desta secção) foi removido o betão de recobrimento e medida a sua espessura usando uma régua calibrada. No que diz respeito a ter-se assumido no pacómetro um diâmetro dos varões (5 mm) superior aos dos varões dos elementos verticais (2,5 mm e 3 mm), verificou-se que, nos locais onde foram efetuadas medições com a régua, o erro máximo de medição do pacómetro foi de 1 mm.

A espessura do betão de recobrimento das áreas de ensaio do Quadro 3.1 foi medida da seguinte forma, consoante o tipo de elemento estrutural:

- Elementos verticais pré-fabricados: a espessura do betão de recobrimento foi medida:
 - nas armaduras horizontais (Lat) das duas faces laterais do elemento (5 a 12 leituras por face);
 - e, em alguns elementos, foram efetuadas medições na face frontal (Front) (5 leituras).

As medições em cada face abrangeram pelo menos 1,0 m de altura dos elementos verticais;

- Pilares e painéis (PilarPF) que revestem os pilares: a espessura do betão de recobrimento foi medida em todas as armaduras horizontais, ao longo de cerca de 1,2 m de altura (10 a 18 leituras por elemento);
- Parede: a espessura do betão de recobrimento foi medida nas armaduras da camada mais próxima da superfície, numa área com cerca de 1 m² na face de extração da carote (total de 18 leituras);

Os resultados do ensaio, em cada área de ensaio, consistem no valor médio e mínimo em cada face dos elementos.

Na Figura 3.4 apresentam-se as zonas complementares, consideradas como as zonas com maior risco de corrosão das armaduras dos elementos verticais pré-fabricados, exemplificando-se, sempre que possível, o tipo de degradação associado. Nas áreas de ensaio do Quadro 3.2, a espessura do betão de recobrimento foi determinada nas zonas representadas na Figura 3.4, com exceção das faces laterais (LatD) e frontais (FrontD) dos elementos da fachada sul (Fig. 3.4 d), devido à dificuldade da sua medição, bem como ao facto de se ter detetado que uma boa parte destes elementos tinha sido alvo de reparação. Apenas uma leitura da espessura de recobrimento foi efetuada em cada uma destas zonas, tendo-se utilizado o pacómetro, com exceção da face superior dos elementos da fachada nascente (Top, Fig. 3.4a) e das faces laterais junto aos topos dos elementos da fachada sul (LatTop,

Fig. 3.4c), onde se removeu o betão de recobrimento e se mediu a espessura do betão de recobrimento com uma régua.



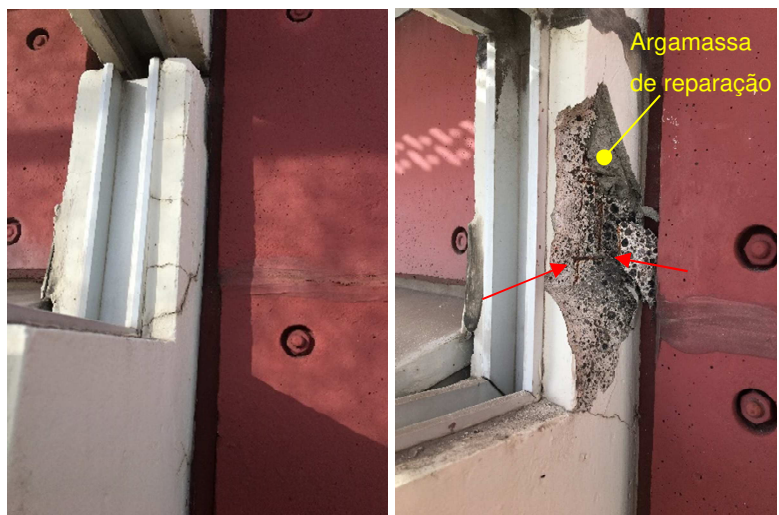
a) Face superior (Top) e face lateral (LatTop) junto ao topo dos elementos da fachada nascente



b) Faces laterais (LatD) e frontais (FrontD) da zona delgada dos elementos da fachada nascente



c) Face lateral (LatTop) junto ao topo dos elementos da fachada sul



d) Face lateral (LatD) e frontal (FrontD) da zona delgada dos elementos da fachada sul

Figura 3.4 – Zonas complementares seleccionadas para melhorar a avaliação da evolução da degradação dos elementos verticais pré-fabricados

4 | Resultados dos ensaios

4.1 Inspeção visual

Os resultados da análise do registo fotográfico obtido com drone encontram-se representados em desenhos dos alçados das diferentes fachadas do edifício do Banco de Portugal, em anexo, onde se identificam todos os elementos de betão pertencentes à categorização A (distinguindo-se os identificados apenas nesta nova inspeção com recurso a andaimes, e excluindo os elementos da fachada Sul reparados no final do ano de 2020), os locais com aparente risco de queda iminente de fragmentos de betão/argamassa (identificados com fotografias dos locais) e as calhas de retenção de água dos AVACs onde, devido a degradação por corrosão, apenas apresentam um ponto de fixação à fachada (ver exemplo na Figura 4.1). São ainda identificados, na fachada sul do edifício de ampliação, três elementos verticais que não foram totalmente reparados nos trabalhos de reparação ocorridos no final do ano de 2020.



Figura 4.1 – Calha de retenção de água dos AVACs com rotura de um dos dois pontos de fixação

Nos Quadros 4.1 a 4.4 apresenta-se um resumo da quantidade de locais degradados em elementos de betão das diferentes fachadas, atualizado com base nos resultados obtidos na recente inspeção com recurso a andaimes (os resultados da segunda inspeção incluem os elementos identificados na primeira inspeção, inclusive os elementos da fachada Sul reparados no final do ano de 2020). Nos mesmos quadros são também quantificados os locais em que se considera que existe um elevado risco de queda iminente de fragmentos (de dimensão considerável) de betão.

Nos Quadros 4.1 a 4.4 é possível verificar que existe uma quantidade significativa de elementos da categoria A que não foram detetados na primeira inspeção (com drone). Após a análise conjunta do observado durante a inspeção com andaimes com as fotografias obtidas da inspeção com drone, verificou-se que a degradação da grande maioria dos elementos da categoria A não identificados na

inspeção com drone se localiza nos topos dos elementos verticais, o que se deve, em parte, às condições de visibilidade serem menos favoráveis nestes locais, mas também ao facto de os topos serem os locais preferenciais para a ocorrência de degradação nestes elementos. A título informativo, na Figura 4.2 é atualizado o gráfico apresentado na Figura 6.1 do Relatório 154/2020 – DM/NBPC, relativo à percentagem de elementos verticais pré-fabricados pertencentes à categoria A em cada fachada exterior do edifício, tendo em conta os resultados da inspeção com andaimes, verificando-se claramente o maior nível de degradação dos elementos da fachada sul do edifício de ampliação face às restantes fachadas.

Quadro 4.1 – Quantidade de locais degradados. Ed. de ampliação. Fachada nascente

Tipo de elemento	Quantidade de locais da categoria A		Quantidade de locais com elevado de risco de queda iminente de fragmentos
	Primeira inspeção (drone)	Segunda inspeção (andaimes)	
Elemento vertical pré-fabricado	4*	13	0
Pilares	3	11	0
Platibanda da cobertura	6	10	0
Murete entre os pisos 1 e 2**	Todo o murete	Todo o murete	-
Murete entre os pisos 2 e 3**	0	0	-
Parede do corpo 1**	0	0	-

* Um dos elementos foi incorretamente identificado como pertencente à categoria A

** Elementos não cobertos pela segunda inspeção

Quadro 4.2 – Quantidade de locais degradados. Ed. de ampliação. Fachada sul

Tipo de elemento	Quantidade de locais da categoria A		Quantidade de locais com elevado de risco de queda iminente de fragmentos
	Primeira inspeção (drone)	Segunda inspeção (andaimes)	
Elemento vertical pré-fabricado***	14	16	0
Painéis pré-fabricados dos pilares	1	2	0
Painéis horizontais pré-fabricados	3	11	0
Platibanda da cobertura**	0	0	-
Elementos horizontais pré-fabricados da varanda**	1	1	-
Parede do corpo 1**	6	6	-
Ligações entre el. verticais e horizontais pré-fab. da varanda do piso 8**	1+1*	1+1*	-

* Apenas selagem

** Elementos não cobertos pela segunda inspeção

*** A zona superior do piso 7 não foi coberta pela inspeção (ver Figura 3.2)

Quadro 4.3 – Quantidade de locais degradados. Ed. antiga Fáb. de Portugal. Fachada sul

Tipo de elemento	Quantidade de locais da categoria A		Quantidade de locais com elevado de risco de queda iminente de fragmentos
	Primeira inspeção (drone)	Segunda inspeção (andaimes)	
Elemento vertical pré-fabricado*	3	20	2
Painéis pré-fabricados dos pilares	1	7	1
Painéis horizontais pré-fabricados	1	2	0
Platibanda da cobertura**	0	0	-
Elementos horizontais pré-fabricados da varanda**	1	1	-
Ligações entre el. verticais e horizontais pré-fab. da varanda do piso 8**	5	5	-

* A zona superior do piso 7 não foi coberta pela inspeção (ver Figura 3.2)

** Elementos não cobertos pela segunda inspeção

Quadro 4.4 – Quantidade de locais degradados. Ed. antiga Fáb. de Portugal. Fachada poente

Tipo de elemento	Quantidade de locais da categoria A		Quantidade de locais com elevado de risco de queda iminente de fragmentos
	Primeira inspeção (drone)	Segunda inspeção (andaimes)	
Elemento vertical pré-fabricado*	37	98	6
Painéis pré-fabricados dos pilares	0	4	1
Painéis horizontais pré-fabricados	2	8	0
Platibanda da cobertura**	1	-	-
Elementos horizontais pré-fabricados da varanda**	14	-	-
Ligações entre el. verticais e horizontais pré-fab. das varandas dos pisos 7 e 8**	14	-	-
Painéis da fachada da Rua Regueirão dos Santos**	22	-	-

* A zona superior do piso das varandas não foi coberta pela inspeção (ver Figura 3.3)

** Elementos não cobertos pela segunda inspeção

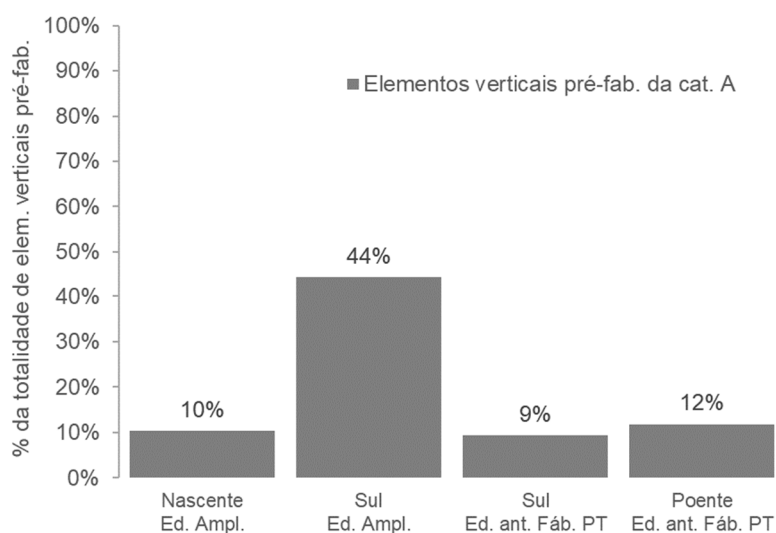


Figura 4.2 – Percentagem de elementos verticais pré-fabricados degradados. Fachadas exteriores (para a via pública)

Considera-se que a não identificação de elementos da categoria A na inspeção com drone teve como principais causas:

- Fachada nascente – as fotografias foram obtidas através de uma câmara fotográfica manual, a uma elevada distância da fachada, uma vez que não foi possível utilizar o drone por este não conseguir “captar sinal de um número de satélites suficiente para garantir um voo seguro” conforme descrito no Relatório FUNDEC (2020);
- Fachadas sul e poente – a nitidez das fotografias é relativamente baixa (sobretudo nas zonas sombreadas), em parte devido à relativamente elevada distância do drone à fachada, como também à excessiva inclinação de alguns dos elementos em relação ao plano da câmara.

Vários fatores podem contribuir para a nitidez das fotografias, sendo os principais: as condições de luz; a distância da câmara ao elemento fotografado; o tamanho do sensor da câmara; a resolução da câmara; e o ângulo entre a superfície fotografada e o plano da câmara.

Com base na análise das fotografias obtidas com drone, e conhecendo as características da câmara fotográfica do drone utilizado (DJI Spark; rácio das fotografias: comprimento/largura = 4/3; 12 MPx, FOV = 81,9°; sensor 1/2.3" CMOS), é possível estimar a que distância das fachadas estas foram obtidas. Com base no ângulo de visão (81,9°) e no rácio comprimento/largura da câmara (4/3), é possível estimar o ângulo de visão vertical da câmara da seguinte forma:

$$FOV_{Vert} = 2 \cdot \arctan \left[\frac{\tan\left(\frac{FOV}{2}\right)}{\sqrt{\left(\frac{4}{3}\right)^2 + 1}} \right] = 55^\circ.$$

Com base no ângulo de visão vertical da câmara pode-se relacionar a distância da câmara ao elemento fotografado (D) com a sua altura real (h) através da seguinte expressão:

$$D = \frac{h}{2 \cdot \tan\left(\frac{FOV_{Vert}}{2}\right)} \approx 1,0 \cdot h.$$

Ou seja, a distância da câmara ao elemento fotografado corresponde aproximadamente à sua altura.

Sabendo que a altura dos elementos verticais pré-fabricados é de cerca de 2,65 m, é possível estimar a altura total da fachada coberta por uma determinada fotografia da fachada. Na Figura 4.3 apresentam-se duas fotografias tipo da fachada poente do edifício, obtidas com drone, com a estimativa dessa altura no alinhamento de elementos verticais mais distante da câmara (note-se que a superfície lateral fotografada destes elementos não é coberta por outras fotografias que pudessem ser tiradas com maior proximidade). Estima-se, portanto, que, em geral, o drone se encontrava a distâncias bastante variáveis dos elementos verticais fotografados, chegando a ultrapassar os 7 m, revelando-se excessiva para as condições de luz encontradas no local e para as características da câmara fotográfica utilizada no drone.

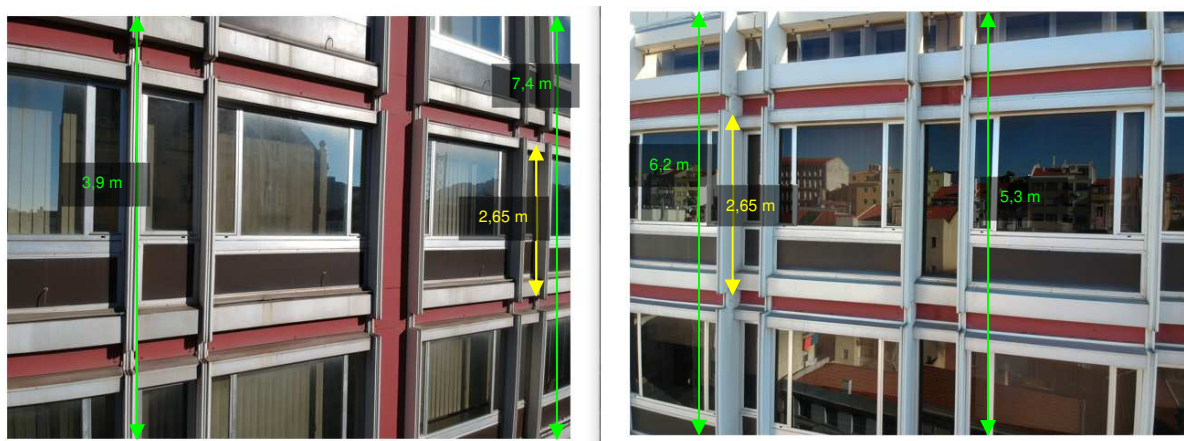


Figura 4.3 – Fotografias tipo da fachada poente

Verificou-se ainda que a degradação de grande parte dos elementos verticais da categoria A ocorre nas zonas identificadas na Figura 3.4, conforme já mencionado na secção 3.2. Deve-se ainda referir que, durante a segunda deslocação à obra para medição da espessura do betão de recobrimento nas zonas complementares descritas na secção 3.2, se verificou que os topos dos elementos verticais inspecionados na fachada nascente do edifício de ampliação (Fig. 3.4a) e a zona delgada dos

elementos verticais inspecionados na fachada sul do edifício da antiga Fábrica de Portugal (Fig. 3.4d) se apresentavam, em grande parte, reparados.

Por fim, deve-se referir que num dos locais da fachada poente com risco elevado de queda iminente de betão (piso2, alinhamento 23, de acordo com a Figura A.3) se procedeu à remoção manual, com alguma facilidade, dos fragmentos na iminência de se destacarem (Figura 4.4).

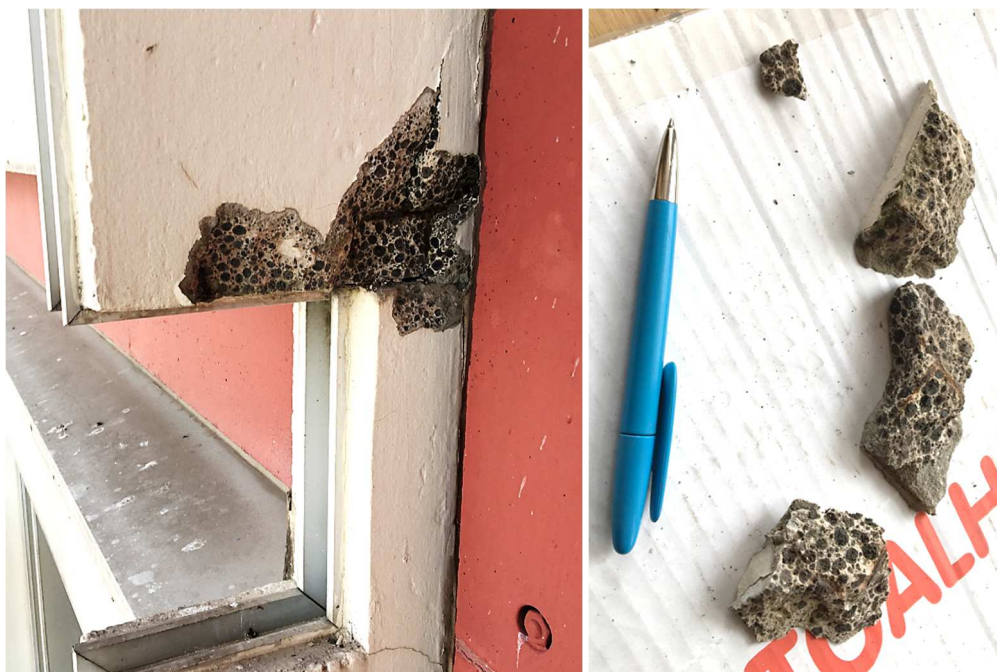


Figura 4.4 – Fragmentos de betão removidos de um elemento vertical pré-fabricado da fachada poente

4.2 Profundidade de carbonatação e espessura do betão de recobrimento

Na Figura 4.5 apresentam-se fotografias das carotes de betão extraídas das diferentes áreas de ensaio, e nos Quadros 4.5 e 4.6 os resultados dos ensaios de determinação da profundidade de carbonatação e da espessura do betão de recobrimento.

Os resultados dos ensaios permitem verificar que a profundidade de carbonatação média do betão dos elementos verticais pré-fabricados do edifício da antiga Fábrica de Portugal (21,3 mm) é significativamente superior à do betão dos elementos (5 a 10 mm) do edifício de ampliação (elementos verticais pré-fabricados, pilares e parede).

É também possível verificar que a profundidade de carbonatação média da face de tardo (18,0 mm) dos painéis pré-fabricados que revestem os pilares do edifício da antiga Fábrica de Portugal é significativamente superior à das suas faces frontais (8,2 mm). Tal se deve à partida ao maior contacto da face frontal com a água da chuva (e eventualmente alguma proteção conferida pela pintura), dificultando o ingresso de CO₂ do ambiente, e ao facto de existir uma caixa-de-ar entre os painéis e os pilares, permitindo o acesso desta face ao CO₂.

Relativamente à espessura do betão de recobrimento, verifica-se que as menores espessuras ocorrem nos topos (Top) e nas faces laterais (LatD) e frontais (FrontD) da zona delgada dos elementos verticais da fachada nascente do edifício de ampliação, bem como nos painéis pré-fabricados dos pilares (PilarPF) e nas faces laterais (LatTop) junto ao topo dos elementos verticais da fachada sul do edifício da antiga Fábrica de Portugal.



Figura 4.5 – Carotes de betão extraídas dos elementos

Quadro 4.5 – Resultados dos ensaios de determinação da profundidade de carbonatação e da espessura do betão de recobrimento

Área de ensaio	Fachada	Edifício	Piso	Elemento	Face	Tipo de betão	Prof. média de carb. (mm)	Esp. do betão de recob. (mm)	
								Valor mínimo	Valor médio
EV1	Nascente	Amp.	6	EVP	Lateral	Normal	3	19	26
					Frontal		-	18	25
EV2	Nascente	Amp.	4	EVP	Lateral	Normal	9	29	37
					Frontal		-	37	40
EV3	Nascente	Amp.	7	EVP	Lateral	Normal	12	26	29
					Frontal		-	22	24
P1	Nascente	Amp.	7	Pilar	Frontal	Normal	12	27	34
P2	Nascente	Amp.	6	Pilar	Frontal	Normal	8	<10	21
PA4	Sul	Amp.	4	Parede	Frontal	Normal	5	16	29
EV4	Sul	Amp.	1	EVP	Lateral	Normal	19	16	19
EV5	Sul	Amp.	7	EVP	Lateral	Normal	3	5	10
EV6	Sul	PT	1	EVP	Lateral	Leve	11	32	38
EV7	Sul	PT	7	EVP	Lateral	Leve	21	33	37
EV8	Sul	PT	5	EVP	Lateral	Leve	21	35	38
EV9	Sul	PT	2	EVP	Lateral	Leve	27	34	37
EV10	Sul	PT	6	EVP	Lateral	Leve	9	37	39
P5	Sul	PT	1	PilarPF	Frontal	Leve	7	24	31
					Tardoz		34	-	-
EV11	Poente	PT	1	EVP	Lateral	Leve	10	30	34
EV12	Poente	PT	4	EVP	Lateral	Leve	18	17	29
EV13	Poente	PT	2	EVP	Lateral	Leve	21	28	37
EV14	Poente	PT	7	EVP	Lateral	Leve	20	31	36
EV15	Poente	PT	1	EVP	Lateral	Leve	17	26	31
EV16	Poente	PT	1	EVP	Lateral	Leve	19	31	36
EV17	Poente	PT	6	EVP	Lateral	Leve	31	31	36
EV18	Poente	PT	4	EVP	Lateral	Leve	26	31	36
EV19	Poente	PT	1	EVP	Lateral	Leve	18	22	25
EV20	Poente	PT	5	EVP	Lateral	Leve	24	15	21
EV21	Poente	PT	4	EVP	Lateral	Leve	48	35	39
P11	Poente	PT	4	PilarPF	Frontal	Leve	5	17	26
					Tardoz		24	-	-
P12	Poente	PT	1	PilarPF	Frontal	Leve	5	<5	18
					Tardoz		24	-	-
P15	Poente	PT	2	PilarPF	Frontal	Leve	15	<5	16
					Tardoz		20	-	-
P16	Poente	PT	2	PilarPF	Frontal	Leve	6	15	21
					Tardoz		5	-	-
P17	Poente	PT	1	PilarPF	Frontal	Leve	11	<5	8
					Tardoz		1	-	-
	Valor médio	Amp.		EVP	Lateral		9,2		24
					Frontal		-		30
				Pilar	Frontal		10,0		28
		PT		EVP	Lateral		21,3		34
				PilarPF	Frontal		8,2		20
					Tardoz		18,0		-
	Desvio padrão	Amp.		EVP	Lateral		6,7		
		PT		EVP	Lateral		9,3		
				PilarPF	Frontal		4,0		

PT – Edifício da antiga Fábrica de Portugal

Amp. – Edifício de ampliação

EVP – Elementos verticais pré-fabricados

PilarPF – Painéis pré-fabricados de revestimento dos pilares

Nos elementos EVP foram consideradas apenas as espessuras do betão de recobrimento da face lateral com menores valores; e a profundidade de carbonatação apresentada corresponde ao valor médio dos resultados obtidos nas duas faces laterais.

Quadro 4.6 – Resultados dos ensaios de determinação da espessura do betão de recobrimento nas zonas complementares dos elementos verticais das fachadas sul nascente

Área de ensaio	Fachada	Edifício	Piso	Esp. do betão de recob. (mm)		LAtD	FrontD
				Top	LatTop		
EV1	Nascente	Amp.	6	5*	12	11	20
EV2	Nascente	Amp.	4	6*	28	19	38
EV3	Nascente	Amp.	7	11*	33	21	<5
EV22	Nascente	Amp.	4	2*	28	10	<5
EV23	Nascente	Amp.	7	10*	32	29	21
EV6	Sul	PT	1	27	-	-	-
EV10	Sul	PT	6	20	-	-	-
EV24	Sul	PT	2	25	-	-	-
EV25	Sul	PT	5	24	-	*	*
EV26	Sul	PT	7	21	-	*	*
Valor médio		Amp.		6,8	26,6	18,0	≤ 17,8
		PT		23,4			
Desvio padrão		Amp.		3,7	8,5	7,8	≥ 13,7
		PT		2,9			

* Reparado com argamassa.

PT – Edifício da antiga Fábrica de Portugal

Amp. – Edifício de ampliação

5 | Análise dos resultados

5.1 Avaliação da evolução da degradação ao longo do tempo

Nesta secção é avaliada a evolução da degradação nos principais elementos de betão das fachadas do edifício do Banco de Portugal, nomeadamente, nos elementos verticais pré-fabricados e nos painéis que revestem os pilares. Devido ao elevado número de elementos em que se detetou a presença de argamassa de reparação, esta avaliação não abrange as zonas do topo dos elementos pré-fabricados dos elementos verticais da fachada nascente (Top, Fig. 3.4a), bem como as zonas delgadas dos elementos pré-fabricados das fachadas do edifício do Banco de Portugal (FrontD e LatD, Fig. 3.4d). Devido aos recentes trabalhos de reparação, são também excluídos da presente avaliação os elementos verticais pré-fabricados da fachada sul do edifício de ampliação.

Por forma a avaliar a evolução da degradação dos elementos de betão das fachadas exteriores, é estimada, numa primeira abordagem, a atual percentagem de armaduras despassivadas dos diferentes elementos de betão das fachadas. Para tal, é usada a seguinte expressão:

$$P_{dep.} = \Phi \left[-\frac{(\mu_c - \mu_x)}{\sqrt{\sigma_c^2 + \sigma_x^2}} \right], \quad (1)$$

onde:

- $P_{dep.}$ é a percentagem de armaduras despassivada (ou probabilidade de despassivação);
- μ_c e σ_c são o valor médio e o desvio padrão da espessura do betão de recobrimento, respetivamente;
- e μ_x e σ_x são o valor médio e o desvio padrão da profundidade de carbonatação do betão, respetivamente.

Esta expressão assume que a profundidade de carbonatação e a espessura do betão de recobrimento são normalmente distribuídas e estatisticamente independentes, não contabilizando, contudo, a incerteza estatística associada ao número limitado de medições da profundidade de carbonatação e da espessura do betão de recobrimento, tratando-se, portanto, de uma aproximação. Para a sua aplicação, podem ser usados os valores médios e o desvio padrão estimados para a profundidade de carbonatação apresentados no Quadro 4.5. No que diz respeito à espessura do betão de recobrimento, não devem ser utilizados os resultados apresentados no mesmo quadro, uma vez que a autocorrelação espacial das leituras efetuadas (associada à proximidade entre estas nos elementos) pode conduzir a estimativas enviesadas de μ_c e σ_c . Assim, de forma a se poder obter uma amostra de leituras de espessura de recobrimento, independentes entre si, que permitam estimar μ_c e σ_c de forma centrada (i.e. sem viés), é construída uma amostra composta por um conjunto de leituras individuais escolhidas aleatoriamente de cada elemento (uma leitura por elemento), que se apresenta no Quadro 5.1. Para a espessura do betão de recobrimento nas zonas complementares dos elementos verticais, são utilizados

os valores médios e desvios padrão apresentados no Quadro 4.5. Uma vez que os elementos verticais da fachada sul do edifício de ampliação apresentaram um nível de degradação significativamente superior ao da fachada nascente, tal como descrito nos relatórios anteriormente elaborados pelo LNEC (LNEC 1997, LNEC 2020), é expectável que a profundidade de carbonatação e/ou a espessura do betão de recobrimento dos elementos da fachada sul sejam distintas das dos elementos da fachada nascente. Por este motivo, não são considerados os resultados dos elementos verticais da fachada sul na estimativa da profundidade de carbonatação e da espessura do betão de recobrimento dos elementos verticais do edifício de ampliação.

Quadro 5.1 – Leituras usadas no cálculo da média e desvio padrão da espessura de recobrimento

Área de ensaio	Fachada	Edifício	Elemento	Face	Leitura aleatória da espessura do betão de recobrimento (mm)
EV1	Nascente	Amp.	EVP	Lateral	45
EV2	Nascente	Amp.	EVP	Lateral	35
EV3	Nascente	Amp.	EVP	Lateral	45
EV6	Sul	PT	EVP	Lateral	43
EV7	Sul	PT	EVP	Lateral	42
EV8	Sul	PT	EVP	Lateral	28
EV9	Sul	PT	EVP	Lateral	39
EV10	Sul	PT	EVP	Lateral	37
EV11	Poente	PT	EVP	Lateral	31
EV12	Poente	PT	EVP	Lateral	42
EV13	Poente	PT	EVP	Lateral	32
EV14	Poente	PT	EVP	Lateral	33
EV15	Poente	PT	EVP	Lateral	47
EV16	Poente	PT	EVP	Lateral	31
EV17	Poente	PT	EVP	Lateral	42
EV18	Poente	PT	EVP	Lateral	31
EV19	Poente	PT	EVP	Lateral	26
EV20	Poente	PT	EVP	Lateral	51
EV21	Poente	PT	EVP	Lateral	35
	Valor médio	Amp.	EVP	Lateral	41,7
		PT	EVP	Lateral	36,9
	Desvio padrão	Amp.	EVP	Lateral	5,8
		PT	EVP	Lateral	7,1

PT – Edifício da antiga Fábrica de Portugal

Amp. – Edifício de ampliação

EVP – Elementos verticais pré-fabricados

PilarPF – Painéis pré-fabricados de revestimento dos pilares

No Quadro 5.2 são apresentadas as estimativas da atual percentagem de armaduras despassivadas P_{dep} nos elementos das fachadas exteriores, bem como dos valores médios e desvios padrão dos parâmetros utilizados no seu cálculo. Os valores de P_{dep} apresentados permitem verificar desde já uma percentagem elevada de armaduras despassivadas (> 10%) nas zonas delgadas (LatD e FrontD) dos elementos verticais da fachada nascente, e nas zonas laterais junto ao topo (LatTop) dos elementos verticais das fachadas do edifício da antiga Fábrica de Portugal.

Quadro 5.2 – Estimativa da atual percentagem de armadura despassivada dos elementos das fachadas exteriores

Edifício	Tipo de elemento	Face/zona	μ_c (mm)	σ_c (mm)	μ_x (mm)	σ_x (mm)	$P_{dep.}$ (%)	P_{fiss} atual (%)	P_{fiss} durante a próxima década (%)	Tempo de vida útil remanescente, t_{gr} (anos)**
Amp. (fachada nascente)	EVP	Lateral	41,7*	5,8*	8,0*	4,6*	0	0	0	>50
	EVP	LatTop	26,6	8,5	8,0	4,6	3	2	3	52
	EVP	LatD	18,0	7,8	8,0	4,6	13	11	17	-2
	EVP	FrontD	≤17,8	≥13,7	8,0	4,6	≥25	≥20	≥23	≤ -20
PT	EVP	Lateral	36,9	7,1	21,3	9,3	9	4	8	15
	EVP	LatTop	23,4	2,9	21,3	9,3	42	28	42	-12
	PilarPF	Frontal	21,8	7,2	8,2	4,0	5	4	6	32

* Estimativa baseada nos resultados das três áreas de ensaio EV1, EV2 e EV3

** Valores estimados para uma probabilidade de fissuração $P_{fiss.} = 10\%$

PT – Edifício da antiga Fábrica de Portugal

Amp. – Edifício de ampliação

EVP – Elementos verticais pré-fabricados

PilarPF – Painéis pré-fabricados de revestimento dos pilares

Para uma melhor compreensão da evolução da degradação dos elementos ao longo do tempo, estima-se seguidamente o seu tempo de vida útil remanescente t_{gr} , que consiste em subtrair a sua idade atual t_{atual} à estimativa do tempo de vida útil t_g .

Para estimar o tempo de vida útil, considera-se como estado limite de durabilidade dos elementos o início da fissuração do betão de recobrimento devido à corrosão das armaduras. Para tal, recorre-se à seguinte expressão:

$$t_g = t_{ic} + t_p = \left(\frac{c}{x}\right)^2 t_{atual} + \frac{74,5 + \frac{7,3c}{\phi_0} - 17,4 f_{cd}}{11,5 I_{corr}}, \quad (2)$$

onde:

- $t_{ic} = \left(\frac{c}{x}\right)^2 t_{atual}$ é o tempo de iniciação (tempo decorrido até à despassivação das armaduras), no qual se assume que a profundidade de carbonatação é diretamente proporcional à raiz do tempo (esta proporcionalidade foi de certa forma verificada na secção 6 do Relatório 154/2020 – DM/NBPC (2020) onde se constatou que o coeficiente de carbonatação de alguns elementos não se alterou significativamente entre as inspeções de 1997 e 2020);
- $t_p = \frac{74,5 + \frac{7,3c}{\phi_0} - 17,4 f_{cd}}{11,5 I_{corr}}$ é o tempo de propagação t_p (tempo decorrido entre o início da despassivação das armaduras e a formação da primeira fissura do betão de recobrimento) definido na Especificação LNEC E 465 (2007);
- c e x são a espessura do betão de recobrimento e a profundidade de carbonatação obtida nos ensaios à idade atual t_{atual} considerada – 31 e 41 anos no edifício de ampliação e no edifício da antiga Fábrica de Portugal, respetivamente;
- ϕ_0 é o diâmetro das armaduras, considerado de 3,0 e 2,5 mm nos elementos edifício de ampliação e no edifício da antiga Fábrica de Portugal, respetivamente;

- f_{cd} é a resistência à compressão diametral do betão dos elementos, considerado como 2,5 MPa;
- I_{corr} é a intensidade de corrente de corrosão, considerada como 0,80 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$.

Dada a variabilidade espacial da profundidade de carbonatação x e da espessura do betão de recobrimento c , foi executada uma simulação de Monte-Carlo com base na expressão (2), assumindo uma distribuição normal para estas variáveis, com os valores médios (μ_c e μ_x) e desvios padrão (σ_c e σ_x) apresentados no Quadro 5.2. Como base na função de distribuição cumulativa empírica dos valores de t_g obtidos da simulação de Monte-Carlo, são estimadas as probabilidades de se atingir o tempo de vida útil nos elementos, ou seja, a probabilidade do betão fissurar, P_{fiss} , que se apresentam nas Figuras 5.1 e 5.2. Nestas figuras é possível observar que os elementos com maior probabilidade de fissuração durante a próxima década coincidem com os elementos onde se estimaram maiores probabilidades de despassivação P_{dep} , ou seja, nas zonas delgadas (LatD e FrontD) dos elementos verticais da fachada nascente (Fig. 5.1c e 5.1d), e nas zonas laterais junto ao topo (LatTop) dos elementos verticais das fachadas do edifício da antiga Fábrica de Portugal (Fig 5.2b).

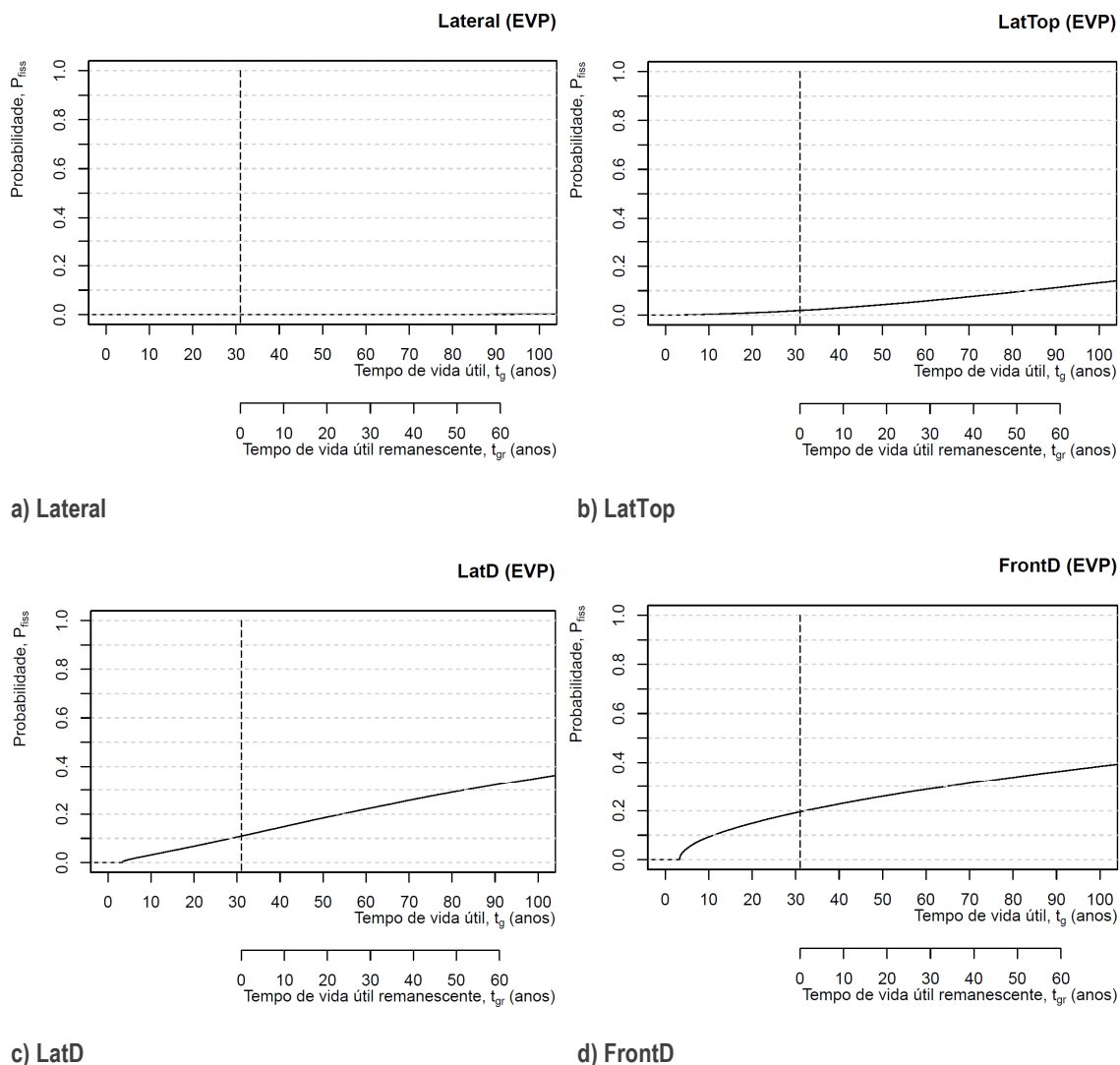
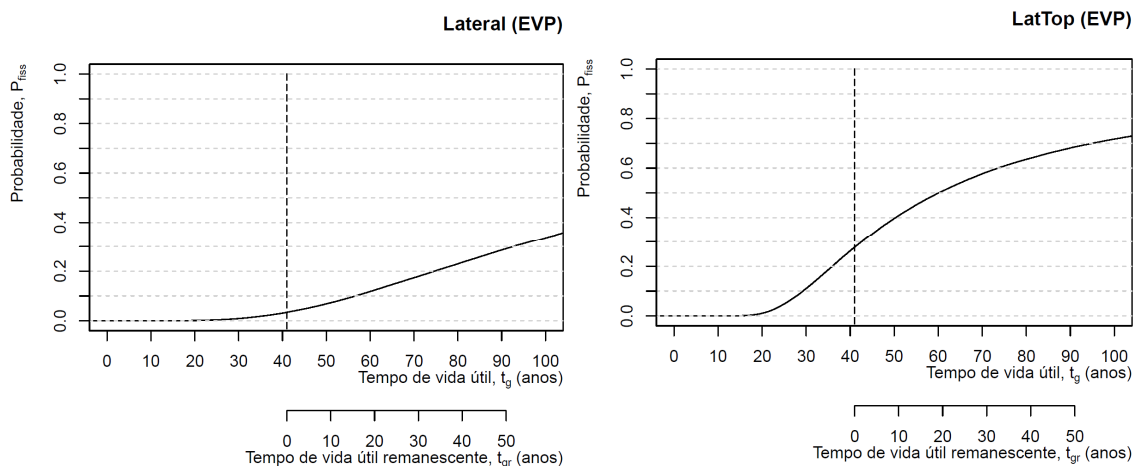
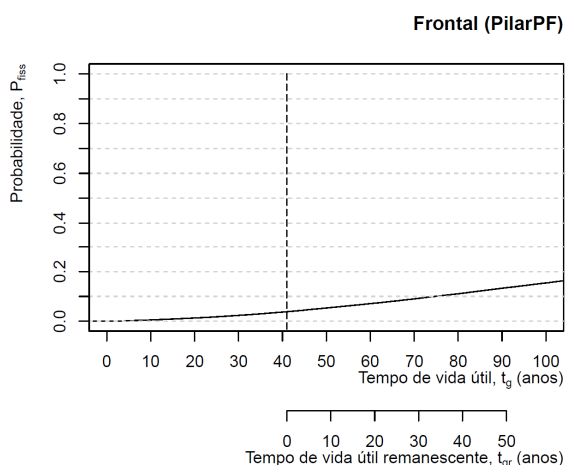


Figura 5.1 – Tempo de vida útil total e remanescente nos elementos verticais pré-fabricados da fachada nascente



a) Lateral (EVP)

b) LatTop (EVP)



c) Frontal (PilarPF)

Figura 5.2 – Tempo de vida útil total e remanescente nos elementos verticais e painéis pré-fabricados do edifício da antiga Fábrica de Portugal

Para se estimar o tempo de vida útil remanescente dos elementos, é necessário assumir um valor limite para a probabilidade de fissuração. Para tal, considera-se o valor de 10%, que se encontra dentro dos valores geralmente encontrados na literatura (*fib* bulletin 34, 2006). No Quadro 5.2 são apresentadas as estimativas da probabilidade de fissuração dos elementos atualmente e nos próximos 10 anos, bem como do seu tempo de vida útil remanescente. Comparando as estimativas, é possível tirar as seguintes conclusões:

- Os elementos verticais da fachada nascente já atingiram o tempo de vida útil nas zonas delgadas (LatD e FrontD), sendo expectável que durante a próxima década o aumento do número de zonas degradadas seja moderado face ao atual (por exemplo, estima-se que P_{fiss} aumente de 11% para 17% nas zonas LatD);
- Os elementos verticais das fachadas do edifício da antiga Fábrica de Portugal já atingiram o tempo de vida útil nas zonas laterais junto aos seus topos (LatTop), sendo expectável que

durante a próxima década o aumento do número de zonas degradadas seja elevado face ao atual (aumento de 28% para 42% da probabilidade de fissuração);

- É expectável que durante a próxima década os painéis pré-fabricados que revestem os pilares do edifício da antiga fábrica de Portugal (PilarPF) não apresentem problemas significativos de degradação associada à corrosão das armaduras

Deve-se referir que estas estimativas se revestem de um significativo grau de incerteza, não só associada ao elevado nível de simplificação dos modelos utilizados, como também à incerteza estatística das estimativas da profundidade de carbonatação e da espessura do betão de recobrimento, pelo que devem ser tidas como uma aproximação da realidade.

6 | Complemento à proposta de intervenção e manutenção descrita no Relatório 154/2020 – DM/NBPC

Face ao exposto, considera-se que deverá ser mantida a proposta de intervenção e manutenção descrita no Relatório 154/2020 – DM/NBPC (2020), complementada da seguinte forma:

- Deverá ser visualmente inspecionada, com recurso aos andaimes, a restante área das fachadas exteriores, com elementos verticais pré-fabricados, não coberta pela inspeção descrita no presente relatório;
- Deverá ser mantida a reduzida a circulação de pessoas nos pátios junto às fachadas interiores do edifício (pelo menos até se concluir a próxima inspeção);
- Os desenhos com a identificação dos elementos de betão a reparar nas fachadas exteriores, apresentados no Relatório 154/2020 – DM/NBPC (2020), deverão ser substituídos pelos desenhos apresentados no Anexo I do presente relatório;
- Recomenda-se a substituição, ou reparação, do sistema de fixação das calhas de retenção de água dos AVACs existentes na fachada sul do edifício da antiga Fábrica de Portugal;
- A próxima inspeção com drone, a realizar em 2024, deverá satisfazer os seguintes requisitos mínimos:
 - Ser garantida uma resolução de pelo menos 0,25 pares de linhas/milímetro nas imagens obtidas com o drone, de acordo com o padrão 1951 USAF (Figura 6.1). Para tal, recomenda-se que sejam realizados testes prévios que permitam demonstrar que essa resolução consegue ser obtida nos elementos com piores condições de visibilidade (devendo ser considerada a maior distância entre o drone e os elementos, a maior inclinação entre as superfícies dos elementos e plano da câmara do drone e as piores condições de luz, expectáveis de ocorrer durante a inspeção), tanto nas faces laterais como nas faces de ambos os topos dos elementos verticais;
 - Inspeccionar as fachadas durante a parte do dia que proporciona menos sombras (e.g. início do dia na fachada nascente, a meio do dia na fachada sul e final do dia na fachada poente);
 - Serem devidamente identificadas todas as faces onde, por dificuldade de acesso, não é possível garantir estes requisitos. Esta identificação deverá ser efetuada, de preferência, antes do início da inspeção, durante a fase de planeamento.

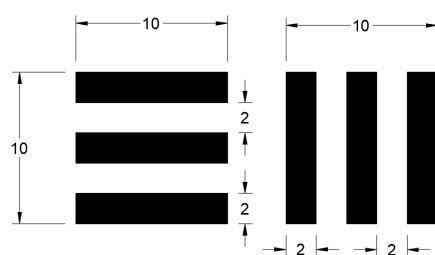


Figura 6.1 – Gráfico de teste de 0,25 par de linhas/milímetro segundo o padrão 1951 USAF (dimensões em mm)

Relativamente aos trabalhos de reparação, para além das fachadas que ainda não foram alvo de reparação, recomenda-se que sejam intervencionados os elementos parcialmente reparados da fachada nascente do edifício de ampliação (identificados a laranja no desenho A.2, no Anexo I). Reforça-se ainda a importância da remoção do betão atrás das armaduras corroídas e do controlo da fissuração da argamassa de reparação, nos primeiros dias após a sua aplicação. Para tal, poderá ser necessário testar diferentes tipos de argamassa de reparação e equacionar a proteção contra a evaporação nos primeiros dias após a aplicação.

7 | Conclusões

Neste relatório avaliou-se o estado de conservação dos elementos de betão armado das fachadas exteriores do edifício do Banco de Portugal na Av. Almirante Reis, em Lisboa, tendo-se procedido a uma inspeção visual, recorrendo a andaimes, e à realização de ensaios de determinação da profundidade de carbonatação do betão e da espessura do betão de recobrimento. Esta inspeção teve como objetivo complementar a inspeção efetuada em 2020, descrita no Relatório 154/2020 – DM/NBPC (2020), tendo sido motivada pela deteção, na fachada sul do edifício de ampliação, de elementos degradados não identificados na inspeção de 2020, bem como de locais com aparente risco de queda iminente de fragmentos de betão.

Os resultados da inspeção permitiram identificar um número significativo de elementos de betão com sinais de degradação não assinalados na inspeção de 2020, bem como 10 locais onde se considera que existe um risco elevado de queda iminente de fragmentos de betão, tendo o Banco de Portugal entretanto instalado um sistema de proteção contra a queda desses fragmentos sobre pessoas e bens que circulem na periferia do edifício.

Em complemento a esta medida já concretizada, recomenda-se que seja completada a inspeção visual das fachadas exteriores do edifício com elementos verticais pré-fabricados (na área não coberta pela inspeção com andaimes identificada na secção 3.1), bem como mantida a reduzida circulação de pessoas na periferia das fachadas interiores do edifício até à realização da próxima inspeção visual com drone prevista para 2024. Apesar de se terem estabelecidos requisitos mínimos para a sua realização, admite-se que esta inspeção poderá não permitir detetar todos os locais com elevado risco de queda iminente de fragmentos de betão, pelo que, nesse caso, deverá ser equacionada a inspeção com recurso a outros meios, por exemplo, a andaimes.

Relativamente aos trabalhos de reparação, foram atualizados os desenhos com a identificação dos elementos de betão a reparar nas fachadas exteriores do edifício, preconizando-se ainda a reparação dos elementos da fachada sul do edifício de ampliação que não foram totalmente reparados nos trabalhos de reparação ocorridos no final de 2020.

Com base nos resultados dos ensaios de determinação da espessura do betão de recobrimento e da profundidade de carbonatação do betão, estima-se ainda que:

- Os elementos verticais da fachada nascente já atingiram o tempo de vida útil nas zonas delgadas, sendo expectável que durante a próxima década o aumento do número de zonas degradadas seja moderado face ao atual;
- Os elementos verticais das fachadas do edifício da antiga Fábrica de Portugal já atingiram o tempo de vida útil nas zonas laterais junto aos seus topos, sendo expectável que durante a próxima década o aumento do número de zonas degradadas seja elevado face ao atual;

- Os painéis pré-fabricados que revestem os pilares do edifício da antiga fábrica de Portugal não deverão apresentar, durante a próxima década, problemas significativos de degradação associada à corrosão das armaduras.

Por fim, deve-se referir que esta estimativa não inclui as faces superiores dos elementos verticais da fachada nascente, bem como as zonas delgadas dos elementos verticais das fachadas do edifício da antiga fábrica de Portugal, uma vez que foram sujeitos a reparação. Desta forma, desconhece-se se estas zonas condicionarão a durabilidade dos elementos verticais nos próximos anos.

Lisboa, LNEC, fevereiro de 2022

VISTOS

O Chefe do Núcleo de Betões,
Pedra e Cerâmicos



António Bettencourt Ribeiro

O Diretor do Departamento de Materiais



Arlindo Freitas Gonçalves

AUTORIA



André Valente Monteiro
Investigador Auxiliar

Referências bibliográficas

- LNEC E 465, 2007 – **Metodologia para estimar as propriedades de desempenho do betão que permitem satisfazer a vida útil de projecto de estruturas de betão armado ou pré-esforçado sob as exposições ambientais XC e XS.** Laboratório Nacional de Engenharia Civil.
- fib* Bulletin 34 – **Model code for service life design.** *fib*, 2006.
- FUNDEC, 2020 – **Levantamento fotográfico das fachadas do edifício do Banco de Portugal na Av. Almirante Reis, Lisboa.** Relatório FUNDEC PS nº 05/2020.
- LNEC,1997– **Diagnóstico da corrosão do betão armado do edifício do Banco de Portugal na R. Francisco Ribeiro.** LNEC - Proc. 024/1/13204. Relatório 187/97 – NQ/DMC.
- LNEC, 2020 – **Controlo dos riscos associados à corrosão nos elementos de betão armado das fachadas do edifício do Banco de Portugal na Av. Almirante Reis.** LNEC - Proc. 0202/121/22033. Relatório 154/2020 – DM/NBPC.

Anexos

ANEXO I
Identificação dos elementos de betão com áreas degradadas

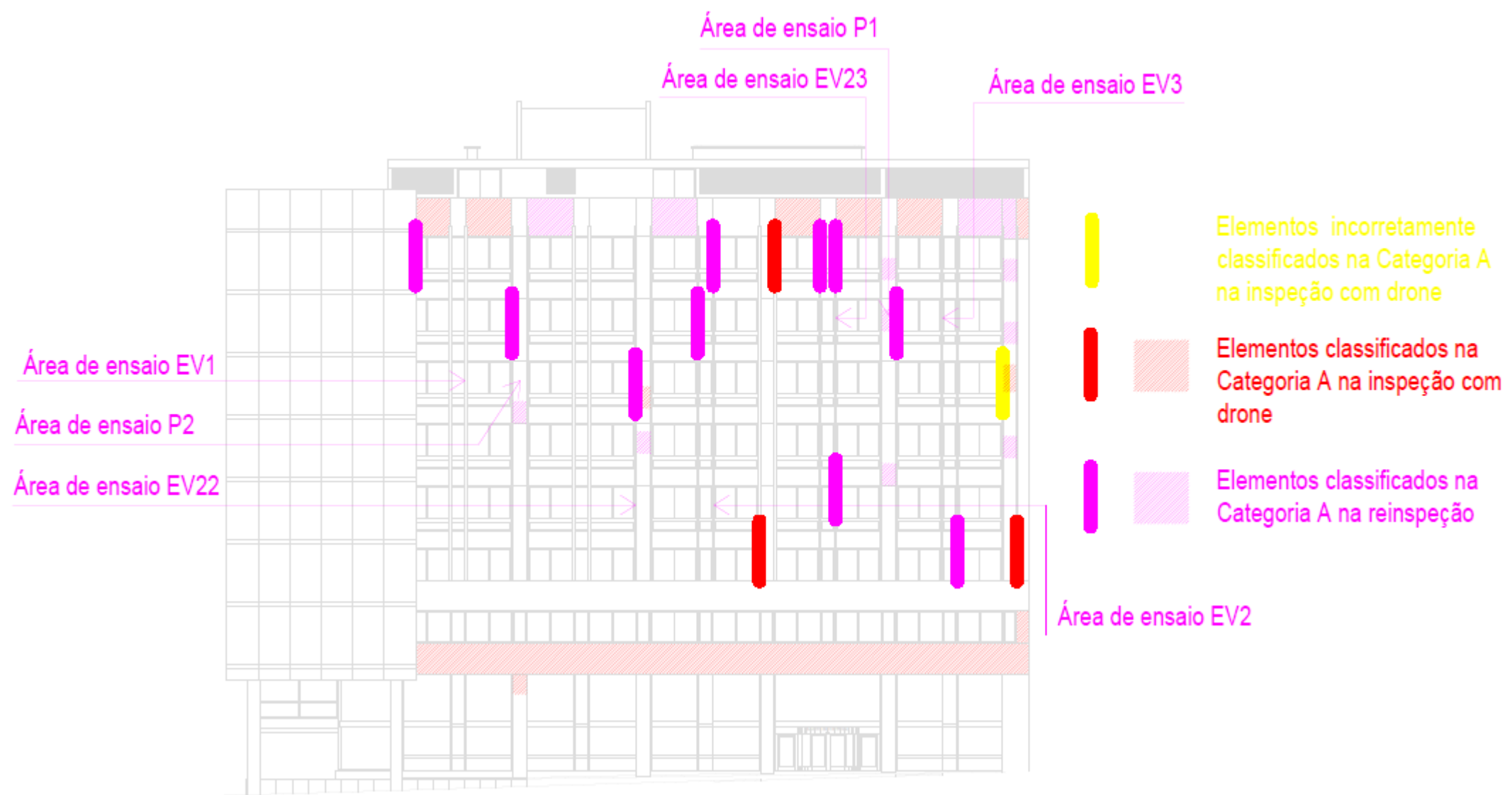


Figura A.1 – Elementos degradados da fachada nascente (Avenida Almirante Reis)

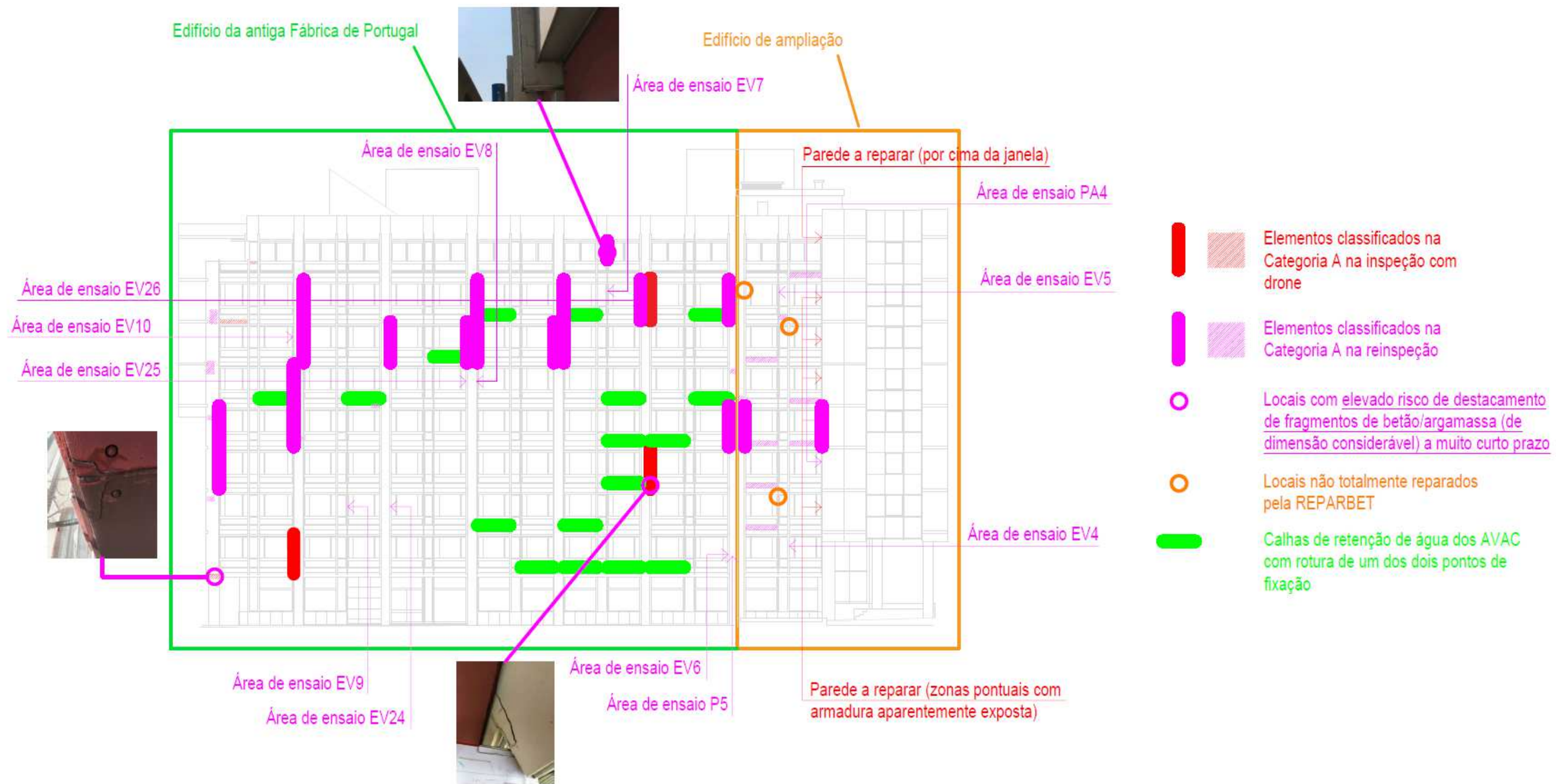


Figura A.2 – Elementos degradados da fachada sul (Rua Febo Moniz)

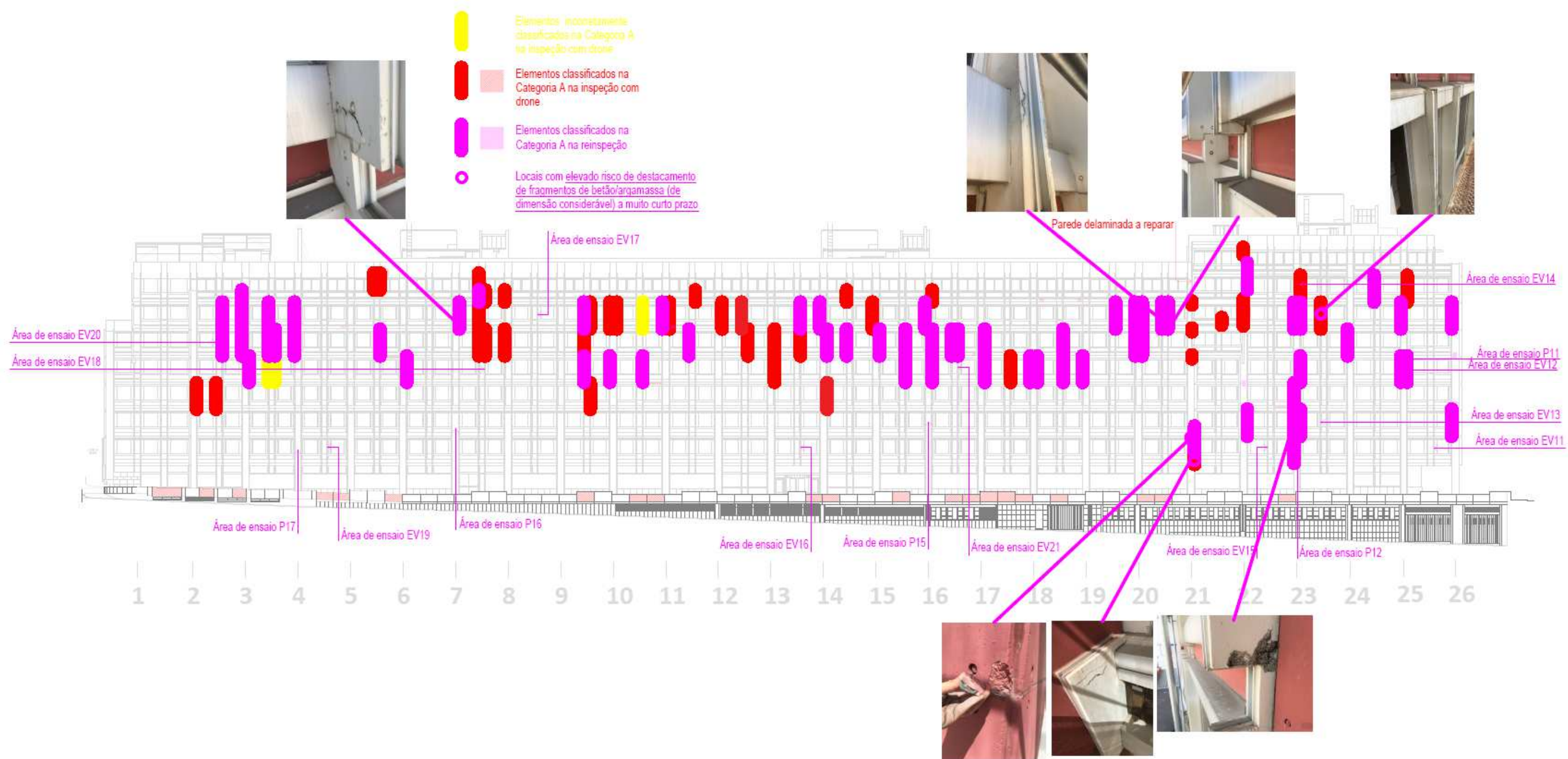


Figura A.3 – Elementos degradados da fachada poente (Rua Francisco Ribeiro e Rua Regueirão dos Anjos)

ANEXO II
Leituras da espessura do betão de recobrimento

Quadro Al.1 – Leituras da espessura do betão de recobrimento

Área de ensaio	Fachada	Edifício	Piso	Tipo de elemento	Face	Espessura do betão de recobrimento (mm)						Valor médio	Valor mínimo		
						Leituras individuais									
EV1	Nascente	Amp.	6	EPV	E	45	48	46	47	47		47	45		
					E	45	46	48	48	47					
					D	23	19	25	26	29				26	19
					D	27	33	30	24	27					
					F	22	18	30	27	29				25	18
EV2	Nascente	Amp.	4	EPV	E	35	34	37	40	40		37	29		
					E	30	29	42	40	39					
					D	40	38	37	39	41				40	33
					D	43	46	33	43	39					
					F	41	40	44	39	37				40	37
EV3	Nascente	Amp.	7	EPV	E	45	44	50	48	48		47	44		
					E	45	48	50	49	47					
					D	26	28	27	32	33				29	26
					D	28	28	30	28	30					
					F	25	23	23	22	28				24	22
P1	Nascente	Amp.	7	Pilar	F	39	39	33	31	31	29	34	27		
					F	30	42	40	38	35	34				
					F	33	27								
P2	Nascente	Amp.	6	Pilar	F	31	33	25	19	22	25	21	<10		
					F	23	22	24	22	23	18				
					F	17	11	10	<10						
PA4	Sul	Amp.	4	Parede	F	31	19	25	35	34	35	29	16		
					F	26	26	16	36	23	21				
					F	25	34	30	31	37	32				
EV4	Sul	Amp.	1	EPV	E	20	24	21	16	16		19	16		
					D	26	25	29	32	29				28	25
EV5	Sul	Amp.	7	EPV	E	20	24	21	22	15	15	20	15		
					D	17	13	5	10	5	8			10	5
EV6	Sul	PT	1	EPV	E	43	34	32	35	41	44	38	32		
					D	35	38	48	43	37	30			39	30
EV7	Sul	PT	7	EPV	E	42	37	39	44	41	45	41	37		
					D	33	39	40	36	38	33			37	33
EV8	Sul	PT	5	EPV	E	28	38	45	42	39	40	39	28		
					D	37	35	36	37	40	41			38	35
EV9	Sul	PT	2	EPV	E	39	40	40	36	35	34	37	34		
					D	40	40	39	40	43	43			41	39
EV10	Sul	PT	6	EPV	E	37	41	40	39	40	38	39	37		
					D	41	40	41	42	39	38			40	38
P5	Sul	PT	1	EPV	F	29	36	34	24	27		31	24		
					F	30	35	35	30	27					
EV11	Poente	PT	1	EPV	E	31	32	30	32	36	41	34	30		
					D	44	45	43	45	43	48			45	43
EV12	Poente	PT	4	EPV	E	42	30	43	46	40	38	40	30		
					D	40	39	27	26	17	24			29	17
EV13	Poente	PT	2	EPV	E	32	34	36	28	45	44	37	28		
					D	43	39	42	38	34	32			38	32
EV14	Poente	PT	7	EPV	E	33	38	43	34	31	36	36	31		
					D	43	40	35	38	41	47			41	35
EV15	Poente	PT	1	EPV	E	47	43	45	46	42	42	44	42		
					D	28	29	32	26	33	37			31	26
EV16	Poente	PT	1	EPV	E	31	37	33	31	34	33	36	31		
					E	38	37	40	39	38	37				
					D	46	46	45	48	49	50			49	45
					D	52	51	48	52	52	51				
EV17	Poente	PT	6	EPV	E	42	37	33	31	32	39	36	31		
					D	40	44	44	47	38	40			42	38
EV18	Poente	PT	4	EPV	E	31	33	35	39	38	40	36	31		
					D	42	44	37	45	45	41			42	37
EV19	Poente	PT	1	EPV	E	26	22	25	26	27	28	25	22		

					E	29	25	23	22	24	27		
					D	50	53	50	55	53	51	51	48
					D	49	51	53	52	51	48		
EV20	Poente	PT	5	EPV	E	51	48	35	49	44	44	45	35
					D	16	15	21	25	23	24	21	15
EV21	Poente	PT	4	EPV	E	35	38	37	43	41	40	39	35
					D	41	42	43	41	38	35	40	35
P11	Poente	PT	4	PilarPF	F	27	28	33	27	26	23	26	17
					F	24	30	20	23	32	34		
					F	21	33	28	24	17	23		
P12	Poente	PT	1	PilarPF	F	26	18	11	17	18	11	18	<5
					F	24	17	8	<5	15	16		
					F	29	19	17	19	24	21		
P15	Poente	PT	2	PilarPF	F	17	11	14	18	22	22	16	<5
					F	16	18	<5	8	13	20		
					F	18	20	19	9	11	18		
P16	Poente	PT	2	PilarPF	F	22	22	17	18	21	23	21	15
					F	20	22	15	18	24	26		
					F	20	22	15	24	24	25		
P17	Poente	PT	1	PilarPF	F	10	9	9	7	6	5	8	<5
					F	7	9	9	9	9	10		
					F	<5	8	6	7	6	8		

Notas:

PT-Edifício da antiga Fábrica de Portugal

Amp. – Edifício de ampliação

EPV – Elementos verticais pré-fabricados

PilarPF – Painéis pré-fabricados de revestimento dos pilares



www.lnec.pt

AV DO BRASIL 101 • 1700-066 LISBOA • PORTUGAL
tel. (+351) 21 844 30 00
lnec@lnec.pt www.lnec.pt