



LABORATÓRIO NACIONAL
DE ENGENHARIA CIVIL

CONFIDENCIAL

**AVALIAÇÃO DA DEGRADAÇÃO DO BETÃO ARMADO DOS
VIADUTOS ENTRE OS POSTOS DE ACOSTAGEM 4/5 E 9/10
DA APS**



LABORATÓRIO NACIONAL
DE ENGENHARIA CIVIL

CONFIDENCIAL

DEPARTAMENTO DE MATERIAIS
Núcleo de Betões

AVALIAÇÃO DA DEGRADAÇÃO DO BETÃO ARMADO DOS VIADUTOS ENTRE OS POSTOS DE ACOSTAGEM 4/5 E 9/10 DA APS

Trabalho realizado para a REPSOL POLÍMEROS, LDA

LISBOA • Novembro de 2011

I & D MATERIAIS

RELATÓRIO 352/2011 - NB

**AVALIAÇÃO DA DEGRADAÇÃO DO BETÃO ARMADO DOS
VIADUTOS ENTRE OS POSTOS DE ACOSTAGEM 4/5 E 9/10 DA APS**

**ASSESSMENT OF REINFORCED CONCRETE DEGRADATION OF
VIADUCTS BETWEEN BERTHS 4/5 AND 9/10 OF APS**

**EVALUATION DE LA DÉGRADATION DU BÉTON ARMÉ DES
VIADUCS ENTRE LES POSTES D'ACCOSTAGE 4/5 ET 9/10 DE
L'APS**

Índice do Texto

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. ENQUADRAMENTO	1
1.2. ESTRUTURA DO RELATÓRIO	4
2. AVALIAÇÃO DAS CONDIÇÕES DOS VIADUTOS	5
2.1. INTRODUÇÃO	5
2.2. AMBIENTE DE EXPOSIÇÃO	6
2.3. INSPECÇÃO E ENSAIOS <i>IN SITU</i>	6
2.3.1. <i>Inspecção das anomalias visíveis in situ</i>	6
2.3.2. <i>Ensaio realizados in-situ</i>	15
2.4. ENSAIOS REALIZADOS EM LABORATÓRIO	23
2.4.1. <i>Ensaio de compressão em carotes extraídas</i>	23
2.4.2. <i>Medição da profundidade de carbonatação em carotes</i>	25
2.4.3. <i>Determinação do teor de cloretos</i>	27
2.4.4. <i>Determinação do coeficiente de difusão dos cloretos em carotes por ensaio de migração</i>	31
2.4.5. <i>Observação do betão ao MEV</i>	33
2.4.6. <i>Análise dos resultados</i>	33
2.5. CONCLUSÕES DO CAPÍTULO 2	39
3. CAUSAS DA DEGRADAÇÃO DO BETÃO DOS VIADUTOS.....	41
4. NÍVEL DE DEGRADAÇÃO DO BETÃO DOS VIADUTOS	41
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	43

BIBLIOGRAFIA

REFERÊNCIAS NORMATIVAS

ANEXO I - Peças Desenhadas - Planta e cortes

ANEXO II - Registo Fotográfico - Levantamento e registo das observações efectuadas

ANEXO III - Resultados dos ensaios

ANEXO IV - Registo Fotográfico - Carotes

Índice de Figuras

FIGURA 1: LOCALIZAÇÃO E VISTA GERAL DOS VIADUTOS.....	2
FIGURA 2: ARMADURA CORROÍDA EXPOSTA NOS PILARES PAREDE (A_c)	8
FIGURA 3: ARMADURA CORROÍDA EXPOSTA NAS LAJES PRÉ-FABRICADAS DO TABULEIRO (A_c).....	8
FIGURA 4: EXTREMIDADE CORROÍDA DOS ESPAÇADORES METÁLICOS NO PILAR PAREDE (E_c).....	8
FIGURA 5: CORTE E/OU ESMAGAMENTO DO BETÃO DE RECOBRIMENTO DO BETÃO DOS PILARES PAREDE E PILARES DOS ENCONTROS NA ZONA DE CONTACTO COM A ESTRUTURA METÁLICA (C/E).....	8
FIGURA 6: FISSURA INCLINADA E VERTICAL NA ZONA DE ESPESAMENTO DOS PILARES PAREDE, ZONA DE EXTREMIDADE (F_i/F_v).....	9
FIGURA 7: FISSURA INCLINADA NA ZONA DE ESPESAMENTO DOS PILARES PAREDE, ZONA INTERIOR (F_i)	9
FIGURA 8: FISSURA VERTICAL NOS PILARES PAREDE COM PROLONGAMENTO NA ZONA DE ESPESAMENTO (F_v) .	9
FIGURA 9: FISSURAS VERTICAIS NO PILAR PAREDE VISÍVEIS EM AMBAS AS FACES ESTE E OESTE (F_v).....	9
FIGURA 10: FACE OESTE DO PILAR SUL, ENCONTRO OESTE DO VIADUTO 9/10 (MAIS A SUL). ARMADURAS CORROÍDAS.....	10
FIGURA 11: FACE OESTE DO PILAR PAREDE N3, VIADUTO 4/5 (MAIS A NORTE). ARMADURAS CORROÍDAS.....	10
FIGURA 12: FACES SUL E OESTE DO PILAR PAREDE N1, VIADUTO 4/5 (MAIS A NORTE). ARMADURAS CORROÍDAS	10
FIGURA 13: DELAMINAÇÃO MAIS ALARGADA DO BETÃO DE RECOBRIMENTO NA ARESTA DEVIDO À CORROSÃO DO ESPAÇADOR (E_c).....	11
FIGURA 14: DESENVOLVIMENTO DE INCRUSTAÇÕES EM FISSURAS NOS PILARES PAREDE	11
FIGURA 15: ZONA ENTERRADA DO PILAR PAREDE Nº6 DO VIADUTO ENTRE OS POSTOS DE ACOSTAGEM 9/10 (SUL).....	12
FIGURA 16: INTERVENÇÃO EXISTENTE, DEGRADADA, NA ZONA DE LIGAÇÃO DOS PILARES COM O TABULEIRO ...	12
FIGURA 17: VISTA GERAL DA SUPERFÍCIE DO TABULEIRO DOS VIADUTOS.....	13
FIGURA 18: REGISTO DAS FISSURAS VERTICAIS NOS PILARES PAREDE DOS VIADUTOS, COM INDICAÇÃO DA CORRESPONDENTE FOTOGRAFIA NO ANEXO II.....	14
FIGURA 19: LOCAIS DE EXTRACÇÃO DE CAROTES (C1 A C5) E DE COLHEITA DE PÓ SECO DE BETÃO ENDURECIDO OBTIDO POR DESGASTE <i>IN SITU</i> (PG1 A PG4) DO PILAR PAREDE Nº 3 (PP3) DO VIADUTO ENTRE OS POSTOS DE ACOSTAGEM 9/10 (SUL)	15
FIGURA 20: LOCAIS DE EXTRACÇÃO DE CAROTES (C6 A C10) E DE COLHEITA DE PÓ SECO DE BETÃO ENDURECIDO OBTIDO POR DESGASTE <i>IN SITU</i> (PG5 E PG6) DO PILAR PAREDE Nº7 (PP7) DO VIADUTO ENTRE OS POSTOS DE ACOSTAGEM 4/5 (NORTE).....	16
FIGURA 21: MEDIÇÃO <i>IN SITU</i> DA ESPESSURA DO RECOBRIMENTO COM UM <i>COVERMETER</i>	17
FIGURA 22: MEDIÇÃO <i>IN SITU</i> DA ESPESSURA DO RECOBRIMENTO DIRECTAMENTE SOBRE A ARMADURA EXPOSTA	17
FIGURA 23: MEDIÇÃO DA ESPESSURA DO RECOBRIMENTO NO PILAR PAREDE JUNTO DO TERRENO DO ENCONTRO OESTE DO VIADUTO ENTRE OS POSTOS DE ACOSTAGEM 4/5 (NORTE).....	18
FIGURA 24: HISTOGRAMA E DISTRIBUIÇÃO CUMULATIVA DO RECOBRIMENTO DAS ARMADURAS NOS PILARES PAREDE DOS VIADUTOS.....	19
FIGURA 25: HISTOGRAMA E DISTRIBUIÇÃO CUMULATIVA DO RECOBRIMENTO DAS ARMADURAS NOS ENCONTROS DOS VIADUTOS	19
FIGURA 26: ASPECTO LISO DA SUPERFÍCIE DO VARÃO DE AÇO	20
FIGURA 27: CAROTE 1: VIADUTO ENTRE O POSTO DE ACOSTAGEM 9/10; PILAR PAREDE Nº3; ($\varnothing = 101$ MM; COMP. MÁX= 330 MM); DIMENSÃO DO AGREGADO $> 1/3 \varnothing$	21
FIGURA 28: COLHEITA DE AMOSTRAS NA FACE ESTE DO PILAR PAREDE 3, DO VIADUTO ENTRE OS POSTOS DE ACOSTAGEM 9/10.....	22
FIGURA 29: PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO DO BETÃO NOS PILARES PAREDE DO VIADUTO ENTRE OS POSTOS DE ACOSTAGEM 4/5.....	22
FIGURA 30: PROJETOS DE ENSAIO OBTIDOS DAS CAROTES EXTRAÍDAS DOS VIADUTOS	24
FIGURA 31: RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DAS CAROTES. DISPERSÃO DOS RESULTADOS.....	25
FIGURA 32: OBTENÇÃO DA ROTURA DA SECÇÃO TRANSVERSAL DOS PROJETOS DE ENSAIO	26
FIGURA 33: ASPECTO DA FRENTE DE CARBONATAÇÃO NAS FACES OESTE (A) E ESTE (B) DOS PILARES PAREDE, A PARTIR DOS PROJETOS DE ENSAIO OBTIDOS DAS CAROTES	26
FIGURA 34: VALOR MÉDIO DOS RESULTADOS DA PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO EM CADA FACE DOS PILARES PAREDE, MEDIDA EM LABORATÓRIO SOBRE AS CAROTES EXTRAÍDAS DOS VIADUTOS	26

FIGURA 35: PROVETES DE ENSAIO OBTIDOS DA CAROTE 2, DA METADA DOS PROVETES DOS TOPOS, FACE OESTE E FACE ESTE	28
FIGURA 36: SACOS COM AS COLHEITAS DE PÓ SECO DO BETÃO ENDURECIDO OBTIDO POR DESGASTE <i>IN SITU</i> ...	29
FIGURA 38: PERFIS DO TEOR DE CLORETOS A PARTIR DE CADA CAROTE EXTRAÍDA E DE CADA COLHEITA DE PÓ OBTIDO POR DESGASTE <i>IN SITU</i> , DO BETÃO DOS PILARES PAREDE COM CERCA DE 30 ANOS DE IDADE	30
FIGURA 39: PERFIS DO TEOR DE CLORETOS SOMENTE CONSIDERANDO OS RESULTADOS OBTIDOS NA ZONA SUPERIOR DO PILAR PAREDE	31
FIGURA 40: PERFIS DO TEOR DE CLORETOS SOMENTE CONSIDERANDO OS RESULTADOS OBTIDOS NA ZONA INFERIOR E MÉDIA DO PILAR PAREDE	31
FIGURA 41: PROVETES DE ENSAIO USADOS PARA A DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE DIFUSÃO DOS CLORETOS (L=50 MM; $\varnothing \approx 100$ MM)	31
FIGURA 42: ASPECTO GERAL DA AMOSTRA DE BETÃO, ONDE SÃO VISÍVEIS AGREGADOS ROLADOS DE QUARTZO E CONCHAS	33
FIGURA 43: ASPECTO DE PORMENOR DA PASTA DE CIMENTO, ONDE NÃO SE DETECTOU A PRESENÇA DE PARTÍCULAS DE CINZA VOLANTE	33
FIGURA 44: EVOLUÇÃO DA PROFUNDIDADE MÉDIA DE CARBONATAÇÃO <i>IN SITU</i>	35
FIGURA 45: PERFIS DE CLORETOS NO BETÃO DOS PILARES PAREDE, EM CAROTES EXTRAÍDAS E OBTIDO POR DESGASTE <i>IN SITU</i> , VERSUS RECOBRIMENTO MÉDIO DAS ARMADURAS E PROFUNDIDADE MÉDIA DE CARBONATAÇÃO DO BETÃO	36
FIGURA 46: EVOLUÇÃO DO PERFIL DO TEOR MÉDIO DE CLORETOS NO BETÃO <i>IN SITU</i>	38
FIGURA 47: NÍVEL 2 - DEGRADAÇÃO VISÍVEL DO BETÃO ARMADO EM MAIS DE METADE DA ÁREA DE EXPOSTA DO PILAR PAREDE 3 (PP3) DO VIADUTO 4/5	42
FIGURA 48: NÍVEL 2 - DEGRADAÇÃO VISÍVEL DO BETÃO ARMADO EM MAIS DE METADE DA ÁREA DE EXPOSTA DA LAJE PRÉ-FABRICADA	42
FIGURA 49: NÍVEL 1: DEGRADAÇÃO VISÍVEL DO BETÃO ARMADO EM MENOS DE METADE DA ÁREA EXPOSTA E CONCENTRADA NA ZONA DE ESPESSEAMENTO DO PILAR PAREDE 1 (PP1) DO VIADUTO 9/10	42
FIGURA 50: NÍVEL 1: DEGRADAÇÃO VISÍVEL DO BETÃO ARMADO EM MENOS DE METADE DA ÁREA EXPOSTA E ABRANGENDO A TOTALIDADE DO PILAR PAREDE 2 (PP2) DO VIADUTO 4/5	42

Índice de Quadros

QUADRO 1: ENSAIOS REALIZADOS EM LABORATÓRIO SOBRE AS CAROTES EXTRAÍDAS DOS VIADUTOS	16
QUADRO 2: RESULTADOS DO ENSAIO DE COMPRESSÃO E DA INSPECÇÃO VISUAL SEGUNDO A NP EN 12504-1 ...	24
QUADRO 3: COEFICIENTE DE DIFUSÃO DOS CLORETOS SEGUNDO O ENSAIO DE MIGRAÇÃO (LNEC E 463), NO BETÃO DOS VIADUTOS COM CERCA DE 30 ANOS DE IDADE	32
QUADRO 4: LIMITES DA COMPOSIÇÃO E DA CLASSE DE RESISTÊNCIA DO BETÃO SOB ACÇÃO DO DIÓXIDO DE CARBONO E DOS CLORETOS, PARA UMA VIDA ÚTIL DE 50 ANOS, SEGUNDO A LNEC E 464.	34
QUADRO 5: RESISTÊNCIA ESTIMADA DO BETÃO DOS VIADUTOS <i>IN SITU</i> , COM 30 ANOS E AOS 28 DIAS DE IDADE	34

Avaliação da Degradação do Betão Armado dos Viadutos entre os Postos de Acostagem 4/5 e 9/10 da APS

1. INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO

A empresa Repsol Polímeros, Lda, através de correio electrónico no dia 6 de Abril de 2011, solicitou ao Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) a avaliação do estado de degradação de estruturas do Terminal Portuário do Porto de Sines, que incluíam dois viadutos localizados entre os postos de acostagem 4/5 e 9/10 da Área do Porto de Sines (APS)¹ e o porto-cais do terminal de Graneis Líquidos², e a apresentação de recomendações relativas à solução a adoptar para a recuperação das estruturas.

Segundo a informação fornecida pela Repsol, a estrutura de betão armado que constitui os viadutos localizados entre os postos de acostagem 4/5 e 9/10 do Terminal Portuário do Porto de Sines terá sido construída em finais da década de 70 ou no início da década de 80 (projecto datado de 1977³).

Os viadutos são constituídos por uma estrutura mista, sendo o tabuleiro formado por lajes pré-fabricadas de betão armado que se apoiam numa estrutura metálica suportada por pilares parede e por pórticos, nos encontros, de betão armado. Este relatório respeita apenas à estrutura de betão armado dos pilares parede, dos encontros e das lajes pré-fabricadas dos viadutos (Figura 1, Desenho N° 1 do Anexo I).

O número de pilares parede existente em cada viaduto é de sete, de largura 8,74 m e altura visível de 1,56 m, distanciados cerca de 5 m. Os encontros dos viadutos são constituídos por quatro pórticos distanciados de 2,8 m com viga de travamento (Desenho N° 1 do Anexo I, com identificação dos pilares parede (PP) e encontros (E)).

Os viadutos estão orientados na direcção este-oeste, numa extensão total de cerca de 47 m.

¹ - Designação conforme o documento fornecido pela Repsol durante a visita à obra em 2011-04-20

² - Designação de acordo com o Mapa do Porto de Sines fornecido por e-mail de 2011-04-08

³ - Data conforme desenhos de Betão Armado fornecidos pela Repsol



Figura 1: Localização e vista geral dos viadutos

Foi realizada uma visita prévia à obra, em 20 de Abril de 2011, por engenheiros do LNEC acompanhados pelo Eng^o Dâmaso Lopes, da Repsol. Esta visita destinou-se a efectuar a observação visual das estruturas do Terminal Portuário sobre as quais o estudo incidirá, de modo a permitir estabelecer o Plano de Trabalhos e as condições para a realização do estudo.

O problema observado pela Repsol respeitava à degradação do betão armado das lajes pré-fabricadas do tabuleiro, pilares parede e encontros, nomeadamente o destacamento do betão de recobrimento com exposição das armaduras corroídas, e à corrosão da estrutura metálica do tabuleiro. O pedido da Repsol veio acompanhado de um Caderno de Encargos que definia os trabalhos pretendidos realizar durante o estudo.

Correspondendo às solicitações da Repsol, o LNEC apresentou, por carta em 6 de Maio de 2011, o Plano de Trabalhos que incluía as tarefas a realizar relativamente às estruturas de betão armado, as tarefas relativas aos elementos metálicos do tabuleiro e a apresentação das possíveis metodologias de reparação dos viadutos, tendo a Repsol formalizado a adjudicação do estudo, através de correio electrónico no dia 7 de Junho de 2011.

O presente relatório constitui o Relatório Intermédio respeitante à avaliação do estado de degradação da estrutura de betão armado das lajes pré-fabricadas do tabuleiro, dos pilares parede e dos encontros dos viadutos entre os dois postos de acostagem 4/5 e 9/10 da APS¹, correspondente à Tarefa 2 do Plano de Trabalhos, e que integrou as seguintes etapas:

2.1. Avaliação do estado de degradação do betão armado dos viadutos.

2.1.1. Análise dos documentos solicitados à Repsol⁴ (Projecto, Relatório, Desenhos, Caderno de Encargos e outros).

2.1.2. Inspeção visual da estrutura de betão armado dos viadutos. Realização de ensaios de diagnóstico em obra ao betão armado das referidas estruturas.

2.1.3. Análise e tratamento da informação recolhida na inspeção visual.

2.1.4. Realização de ensaios em laboratório sobre as amostras de betão recolhidas em obra.

2.2. Definição das causas da degradação do betão armado e classificação dos níveis de degradação.

2.3. Definição das prioridades de intervenção para a reparação das estruturas.

2.4. Relatório Intermédio.

⁴ - Solicitados à Repsol por e-mail, em 2011-04-26.

Saliente-se que, a estrutura de betão armado do porto-cais de Granéis Líquidos inicialmente prevista analisar no Plano de Trabalhos foi excluída do presente estudo devido à impossibilidade de ser garantida a segurança na utilização de andaimes para a realização dos trabalhos *in situ*, da responsabilidade da Repsol.

1.2. ESTRUTURA DO RELATÓRIO

Este Relatório Intermédio está organizado em três capítulos, sendo este o primeiro em que se expõe o pedido realizado pela Repsol ao LNEC e se apresenta a tarefa 2 do Plano de Trabalhos, que respeita à degradação do betão armado dos viadutos localizados entre os postos de acostagem 4/5 e 9/10 da APS.

O capítulo 2 consiste na avaliação das condições dos viadutos. Inclui a definição do ambiente de exposição dos viadutos, as etapas da inspecção visual, os critérios adoptados na selecção e registo das observações visíveis e a síntese da inspecção de cada viaduto. São também apresentados os ensaios realizados *in situ* e em laboratório e a análise desses resultados, e faz-se uma introdução à metodologia de cada ensaio.

No capítulo 3 apresentam-se e analisam-se as causas da degradação do betão armado dos viadutos.

No capítulo 4 caracterizam-se os níveis de degradação do betão armado dos viadutos, com base na observação macroscópica efectuada no decorrer da inspecção *in situ*.

Finalmente, no capítulo 5, faz-se uma síntese crítica dos resultados obtidos nos ensaios efectuados *in situ* e em laboratório e sumarizam-se as principais conclusões retiradas no estudo.

Os Anexos incluem:

ANEXO I - Peças Desenhadas - Planta e cortes

ANEXO II - Registo fotográfico - Levantamento e registo das observações efectuadas

ANEXO III - Resultados dos ensaios

Anexo IV – Registo fotográfico - Carotes

Por último, inclui-se a bibliografia consultada e os documentos normativos referenciados ao longo do relatório.

2. AVALIAÇÃO DAS CONDIÇÕES DOS VIADUTOS

2.1. INTRODUÇÃO

A avaliação das condições dos viadutos localizados entre os postos de acostagem 4/5 e 9/10 envolve a caracterização do ambiente de exposição e a caracterização do estado de degradação do betão armado dos viadutos, nomeadamente das lajes pré-fabricadas do tabuleiro, dos pilares parede e encontros. Esta avaliação foi realizada através de inspecções e de ensaios, *in situ* e em laboratório.

A inspecção visual das lajes pré-fabricadas do tabuleiro, dos pilares parede e dos encontros dos viadutos e a realização dos ensaios *in situ* nos mesmos elementos foi efectuada por técnicos do LNEC com acompanhamento do Eng^o Dâmaso Lopes, da Repsol, nos dias 15, 16 e 17 de Junho de 2011. Durante a realização dos trabalhos *in situ*, a Repsol, por meio do Eng^o Damaso Lopes, informou o LNEC da impossibilidade de garantir as condições de segurança necessárias para a realização do trabalho *in situ* na estrutura de betão armado do porto-cais do terminal de Graneis Líquidos. Os ensaios realizados *in situ* incluíram:

1. Medição da espessura do recobrimento das armaduras;
2. Extracção de carotes de betão para medição da profundidade de carbonatação no betão e para as determinações da resistência à compressão do betão, do teor de cloretos e do coeficiente de difusão dos cloretos do betão;
3. Colheita de amostras de pó seco de betão endurecido a várias profundidades pelo método de desgaste para a determinação do teor de cloretos;
4. Medição da profundidade de carbonatação do betão.

Os ensaios realizados em laboratório foram iniciados em 24 de Junho e incluíram:

1. Exame e ensaio de compressão sobre as carotes extraídas segundo a NP EN 12504-1;
2. Medição da profundidade de carbonatação sobre as carotes extraídas segundo o prEN 14360;
3. Determinação do teor de cloretos, sobre as carotes extraídas e as amostras de pó de betão endurecido obtido por desgaste *in situ*, segundo a NP EN 196- 2 (secção 14);
4. Determinação do coeficiente de difusão dos cloretos sobre as amostras extraídas segundo a especificação LNEC E 463;
5. Análise por observação ao microscópio electrónico de varrimento (MEV) e microanálise de raios X por dispersão em energias (EDS) da microestrutura do betão dos viadutos para detecção de cinzas volantes.

A realização das etapas 1 a 5 foi efectuada pelo Núcleo de Betões (NB) e a observação ao MEV pelo Núcleo de Materiais Metálicos (NMM), ambos do Departamento de Materiais do LNEC.

2.2. AMBIENTE DE EXPOSIÇÃO

Os viadutos estão localizados no Terminal Petroquímico do Porto de Sines, distrito de Setúbal, junto à costa atlântica (Figura 1). Inserem-se num clima mediterrâneo moderado pela influência atlântica, pelo que a humidade do ar se mantém alta durante todo o ano, devido à maior incidência de nevoeiros e neblinas, e as amplitudes térmicas e as temperaturas extremas resultam atenuadas. Os ventos dominantes são os ventos NO e N [1, 2, 3].

Segundo a NP EN 206-1, encontrando-se o betão armado das lajes pré-fabricadas do tabuleiro, dos pilares parede e dos encontros no exterior sem protecção da chuva e na zona costeira, devem ser consideradas, respectivamente, as classes de exposição ambiental XC4 e XS1. Neste ambiente ciclicamente seco e húmido, a corrosão das armaduras é induzida por carbonatação e por cloretos da água do mar.

Saliente-se ainda que, o betão armado dos pilares parede e dos pilares dos pórticos dos encontros em contacto com o solo (enterrado) poder-se-à considerar inserido num ambiente diferente, normalmente húmido e raramente seco, da classe de exposição XC2, caso o terreno seja não agressivo quimicamente.

2.3. INSPECÇÃO E ENSAIOS *IN SITU*

2.3.1. Inspeção das anomalias visíveis *in situ*

2.3.1.1. Descrição das observações visíveis

Para facilitar o registo e mapeamento das observações visíveis: anomalias e outras observações relevantes (ex: reparações localizadas anteriormente efectuadas), identificam-se e descrevem-se resumidamente as observações visíveis que se consideram directamente relacionadas com a resistência e durabilidade do betão armado dos viadutos. As áreas com macro poros, com escorrências ou de diferente coloração, entre outros, não foram consideradas por influenciarem em menor grau a resistência e durabilidade do betão armado (anomalias secundárias) e não condicionarem a selecção do tipo de reparação.

As observações consideradas nas lajes pré-fabricadas do tabuleiro, nos pilares parede e nos encontros foram as seguintes:

i) Armadura corroída exposta (A_c)

Os pilares parede e os encontros dos viadutos apresentavam em algumas zonas, sobretudo na zona do espessamento do pilar parede e na zona de contacto com a estrutura metálica, a presença de armadura corroída exposta (Figura 2).

Na face visível das lajes pré-fabricadas do tabuleiro, a face inferior, era generalizada a exposição da armadura inferior transversal corroída em todo o seu comprimento (Figura 3).

ii) Extremidade do espaçador corroída exposta (E_c)

Nos pilares parede são visíveis pontos de corrosão alinhados a várias alturas, correspondendo às extremidades corroídas dos espaçadores metálicos (Figura 4).

iii) Corte e/ou esmagamento do betão de recobrimento na zona de contacto com a estrutura metálica (C/E)

Na zona de contacto dos pilares parede e dos pilares dos encontros com a estrutura metálica do tabuleiro observa-se a rotura por corte e/ou por esmagamento do betão de recobrimento associada armaduras expostas corroídas (Figura 5).

iv) Fissuras inclinadas e verticais na zona de espessamento do pilares parede dos encontros (F_i / F_v)

Na zona de espessamento dos pilares parede observam-se fissuras inclinadas ($\approx 45^\circ$) (Figura 6-a) e verticais (Figura 6-b), com maior incidência nos extremos norte e sul do pilar parede, mas também em algumas zonas do interior (Figura 7). Na generalidade, estas fissuras são de reduzida dimensão e apresentam cristais de carbonato de cálcio depositado, resultante da percolação de água no seu interior. Estas fissuras são facilmente identificadas pela sua coloração branca.

v) Fissuras verticais nos pilares parede (F_v)

A grande maioria dos pilares parede apresenta uma fissura vertical (Figura 8), visível em ambas as faces este e oeste do pilar (Figura 9), que se desenvolve em todo o seu comprimento e por vezes se prolonga na zona de espessamento. Na generalidade, a fissura é de reduzida dimensão e apresenta-se húmida e/ou de coloração branca. Em alguns pilares parede observou-se a existência de mais do que uma fissura vertical (Figura 8).



Armadura corroída na zona de espessamento do pilar parede e na zona de contacto com a estrutura metálica
Figura 2: Armadura corroída exposta nos pilares parede (A_c)



Figura 3: Armadura corroída exposta nas lajes pré-fabricadas do tabuleiro (A_c)

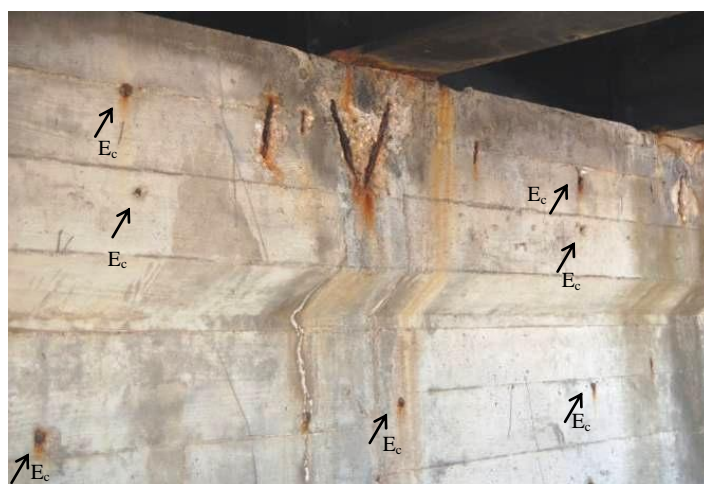


Figura 4: Extremidade corroída dos espaçadores metálicos no pilar parede (E_c)



a) Rotura por corte e esmagamento



b) Rotura por corte

Figura 5: Corte e/ou Esmagamento do betão de recobrimento do betão dos pilares parede e pilares dos encontros na zona de contacto com a estrutura metálica (C/E)



a) Fissura inclinada



b) Fissura vertical

Figura 6: Fissura inclinada e vertical na zona de espessamento dos pilares parede, zona de extremidade norte e sul (F_i/F_v)



Figura 7: Fissura inclinada na zona de espessamento dos pilares parede, zona interior (F_i)



Figura 8: Fissura vertical nos pilares parede com prolongamento na zona de espessamento (F_v)



a) Face oeste



b) Faces sul e este

Figura 9: Fissuras verticais no pilar parede visíveis em ambas as faces este e oeste (F_v)

Nas zonas com o betão de recobrimento delaminado a redução da secção em certas armaduras corroídas é significativa, o que se traduzirá numa redução da sua resistência (Figura 10 a Figura 12).



Figura 10: Face oeste do pilar sul, encontro oeste do viaduto 9/10 (mais a sul). Armaduras corroídas



Figura 11: Face oeste do pilar parede N3, viaduto 4/5 (mais a norte). Armaduras corroídas



Figura 12: Faces sul e oeste do pilar parede N1, viaduto 4/5 (mais a norte). Armaduras corroídas

De um modo geral, a corrosão da extremidade do espaçador metálico (E_c) conduziu à delaminação do betão de recobrimento da área de influência do seu diâmetro. Contudo, para os espaçadores existentes na proximidade das arestas dos pilares, nomeadamente na zona de espessamento dos pilares (Figura 13), a corrosão levou à delaminação de uma área mais alargada do recobrimento.



Figura 13: Delaminação mais alargada do betão de recobrimento na aresta devido à corrosão do espaçador (E_c)

Com alguma frequência foi observada a presença de incrustações de cor esbranquiçada nas fissuras dos pilares parede. A sua formação terá resultado da percolação de água através das fissuras, que dissolveu os cristais de hidróxido de cálcio da pasta de cimento e, quando em contacto com o dióxido de carbono da atmosfera na superfície da fissura, deu origem ao depósito de cristais de carbonato de cálcio (Figura 14 e eq.1).

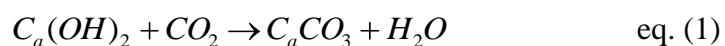


Figura 14: Desenvolvimento de incrustações em fissuras nos pilares parede

No pilar parede nº6 do viaduto entre os postos de acostagem 9/10 (viaduto mais a sul) foi possível observar uma zona do pilar imediatamente abaixo do chão (enterrada) por se encontrar uma pequena vala aberta. O betão armado dessa zona apresentava-se em bom estado, sem fissuração nem delaminação e sem armaduras expostas corroídas (Figura 15).



a) Pilar parede nº6



b) Aspecto do betão armado da zona enterrada

Figura 15: Zona enterrada do pilar parede nº6 do viaduto entre os postos de acostagem 9/10 (sul)

Foram ainda observadas algumas intervenções realizadas na zona da ligação dos pilares com a estrutura metálica apresentando degradação visível. Parece ter consistido na pintura ou revestimento superficial do betão com um produto, de cor cinzenta escura, semelhante à também aplicada nos perfis metálicos do tabuleiro (Figura 16).



Figura 16: Intervenção existente, degradada, na zona de ligação dos pilares com o tabuleiro

Saliente-se ainda que, a ausência de impermeabilização do tabuleiro (Figura 17) ao facilitar o acesso da água no betão das lajes pré-fabricadas e dos pilares terá contribuído para aumentar a penetração da água para o interior do betão acelerando a penetração do ião cloreto e o fenómeno da corrosão do aço no seu interior.



Figura 17: Vista geral da superfície do tabuleiro dos viadutos

Na Figura 18 apresenta-se o registo da localização das fissuras verticais nos pilares parede dos dois viadutos, indicando a correspondente fotografia do Anexo II.

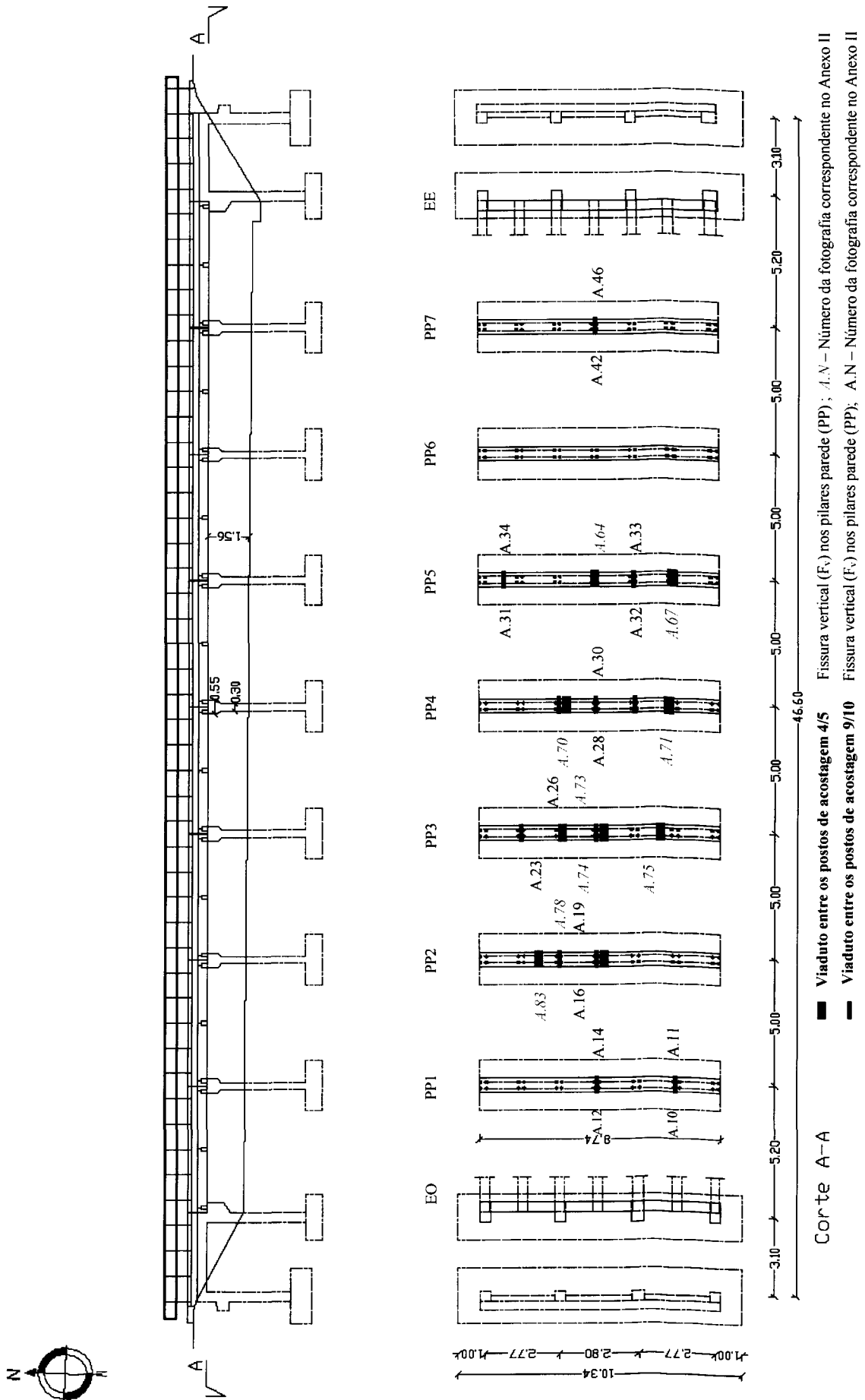


Figura 17: Registo das fissuras verticais nos pilares parede dos viadutos, com indicação da correspondente fotografia no Anexo II

2.3.1.2. Síntese da inspeção visual

Algumas das anomalias identificadas existem de forma generalizada nos dois viadutos, nomeadamente a exposição da armadura inferior transversal corroída na face inferior das lajes pré-fabricadas, a extremidade corroída dos espaçadores em cinco níveis no comprimento visível dos pilares parede e o corte e/ou esmagamento do betão de recobrimento na zona de contacto dos pilares com a estrutura metálica do tabuleiro.

2.3.2. Ensaios realizados *in-situ*

Simultaneamente com a inspeção visual do betão armado dos viadutos entre os postos de acostagem 4/5 e 9/10, foram realizados ensaios *in situ* para avaliar o nível de degradação do betão armado.

Na Figura 19 e na Figura 20 são identificados os locais de extracção das carotes e de colheita de amostras de pó seco de betão endurecido obtido por desgaste *in situ*. No Quadro 1 são indicados os ensaios realizados em laboratório sobre o betão das carotes extraídas (secção 2.4). No Anexo III apresentam-se os resultados obtidos nos ensaios realizados.



a) Face oeste do pilar parede nº3 – Viaduto 9/10

b) Face este do pilar parede nº3 – Viaduto 9/10

Figura 19: Locais de extracção de carotes (C1 a C5) e de colheita de pó seco de betão endurecido obtido por desgaste *in situ* (PG1 a PG4) do pilar parede nº 3 (PP3) do viaduto entre os postos de acostagem 9/10 (sul)



a) Face oeste do pilar parede n°7 – Viaduto 4/5

b) Face este do pilar parede n°7 – Viaduto 4/5

Figura 20: Locais de extracção de carotes (C6 a C10) e de colheita de pó seco de betão endurecido obtido por desgaste *in situ* (PG5 e PG6) do pilar parede n°7 (PP7) do viaduto entre os postos de acostagem 4/5 (norte)

Carote	Elemento estrutural	Localização	Tipo de ensaios ^(a) / Localização do provete de ensaio ^(b)
C1	Pilar Parede 3 (PP3) do Viaduto 9/10 (sul)	Zona inferior	CTH(M); RC(FE)
C2		Zona inferior	
C3		Zona superior	PC(FO,FE); TC(FO,FE); RC(M)
C4		Zona superior	
C5		Zona inferior	
C6	Pilar Parede 7 (PP7) do Viaduto 4/5 (norte)	Zona inferior	PC(FO,FE); TC(FO,FE); RC(M)
C7		Zona inferior	
C8		Zona inferior	CTH(FE)
C9		Zona superior	PC(FO,FE); TC(FO,FE); RC(M)
C10	Zona superior		
<p>^(a) CTH – Determinação do coeficiente de difusão dos cloretos por ensaio de migração RC – Determinação da resistência à compressão PC – Medição da profundidade de carbonatação TC – Determinação do teor de cloretos a várias profundidades</p>			
<p>^(b)</p>			

Quadro 1: Ensaio realizados em laboratório sobre as carotes extraídas dos viadutos

2.3.2.1. Medição da espessura do recobrimento das armaduras e perda de secção das armaduras

A espessura do recobrimento foi medida com um *covermeter* de detecção electro-magnética (Figura 21) ou directamente sobre a armadura exposta (Figura 22). Esta medição foi útil como parâmetro aferidor do controlo da qualidade da construção e importante para avaliar e estimar a durabilidade do betão armado dos viadutos com base no ambiente a que estão sujeitos, devido ao facto do início e progressão da corrosão das armaduras ser fortemente dependente da espessura do recobrimento.



Figura 21: Medição *in situ* da espessura do recobrimento com um *covermeter*



Figura 22: Medição *in situ* da espessura do recobrimento directamente sobre a armadura exposta

O critério de amostragem adoptado para a medição da espessura do recobrimento nos pilares parede e nos encontros foi: 1ª medição no topo do elemento, na zona do espessamento (1); 2ª medição na zona imediatamente abaixo (2); e, 3ª medição na base, perto do chão (3), como se ilustra na Figura 22. Refira-se que, nos pilares parede as zonas correspondentes às 2ª e 3ª medições coincidiram com as zonas onde foram extraídas as carotes (Figura 19 e Figura 20). As medições foram efectuadas alternando as faces oeste e este e faces norte e sul. Nos encontros, as medições incidiram sobre um dos pilares do extremo (norte ou sul) e num dos pilares do centro. No viaduto mais a norte, entre o posto de acostagem 4/5, no encontro oeste foram realizadas medições no pilar parede junto do terreno (Figura 23). No total foram efectuadas trezentas e quarenta e sete medições da espessura do recobrimento nos viadutos e duzentas e sessenta e três nos respectivos encontros.

Os resultados da espessura do recobrimento nos pilares parede e nos encontros dos dois viadutos são apresentados nos Quadros AIII.1 a AIII.4 do Anexo III.



Figura 23: Medição da espessura do recobrimento no pilar parede junto do terreno do encontro oeste do viaduto entre os postos de acostagem 4/5 (norte)

Para estimar o recobrimento mínimo das armaduras foram seguidas as recomendações indicadas em algumas normas (*fib bulletin 34*, ISO/WD 16204 e NP EN 13670) assumindo que o recobrimento mínimo corresponde ao valor abaixo do qual apenas se encontram 5% dos recobrimentos das armaduras (percentil 5 da população). Para o cálculo do recobrimento mínimo utilizou-se a expressão seguinte [Monteiro *et al*, 2011]:

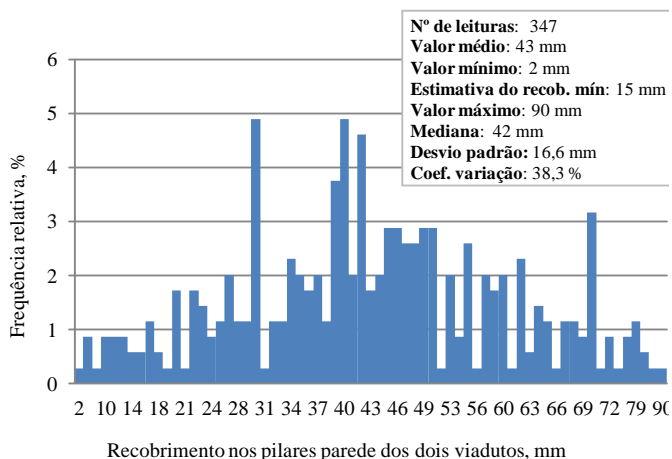
$$C_{\min} = \bar{C} - k \cdot s \quad \text{eq. (2)}$$

onde \bar{C} e s é a média e o desvio padrão dos N recobrimentos medidos e k o factor que depende de N e do nível de confiança assumido como 75%, considerando uma distribuição normal para a análise estatística dos resultados.

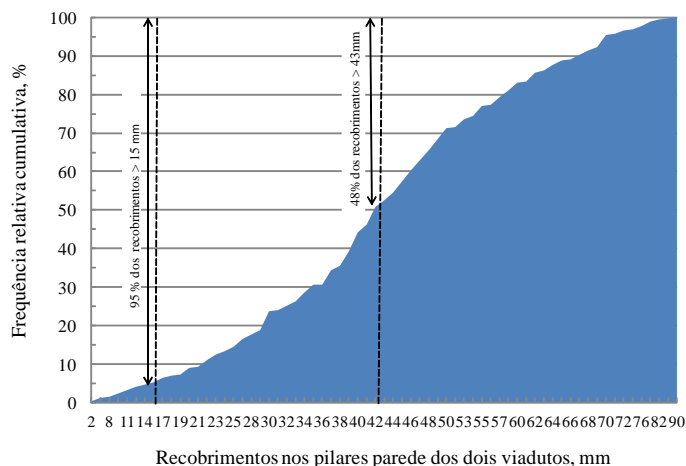
Na Figura 24 e na Figura 25 apresentam-se o histograma e a distribuição cumulativa dos resultados da medição da espessura do recobrimento, medidos *in situ* e nas carotes extraídas, respectivamente, nos pilares parede dos viadutos e nos encontros dos viadutos. Nestas Figuras são também indicados o número de resultados, os valores médio, mínimo e máximo, a mediana, o desvio padrão e o coeficiente de variação dos resultados, bem como a estimativa do recobrimento mínimo das armaduras.

Refira-se que os valores de 105 mm e 128 mm medidos em carotes extraídas do pilar parede 7 do viaduto entre os postos de acostagem 4/5 (norte) não foram considerados no histograma da Figura 25 por se considerar pertencerem a um nível de armaduras mais interior do pilar.

Nos Figuras AIII.1 a AIII.4 do Anexo III são apresentados os histogramas dos resultados por viaduto e por encontro.

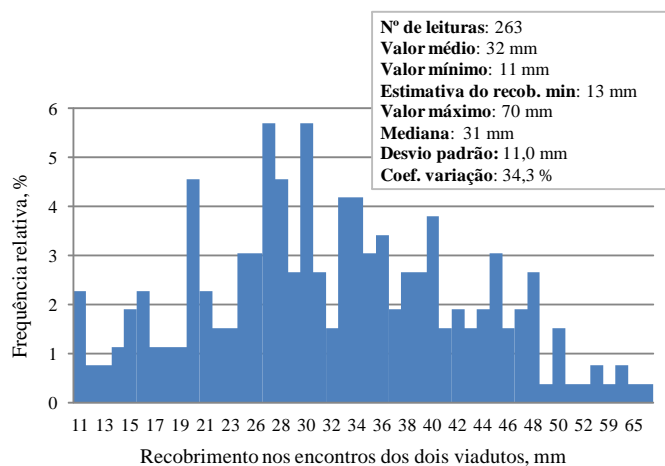


a) Histograma do recobrimento

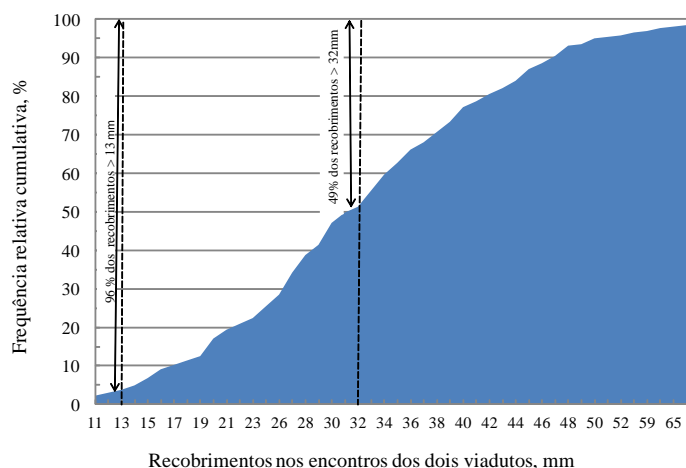


b) Distribuição cumulativa do recobrimento

Figura 24: Histograma e distribuição cumulativa do recobrimento das armaduras nos pilares parede dos viadutos



a) Histograma do recobrimento



b) Distribuição cumulativa do recobrimento

Figura 25: Histograma e distribuição cumulativa do recobrimento das armaduras nos encontros dos viadutos

O recobrimento médio das armaduras foi de 43 mm (com base em 347 resultados, Figura 24) e de 32 mm (com base em 263 resultados, Figura 25), respectivamente, nos pilares parede e nos encontros dos dois viadutos. Os recobrimentos medidos nos pilares parede e nos encontros dos viadutos conduziram a valores mínimos de 15 mm e 13 mm, respectivamente, considerados como percentil 5 dos valores obtidos.

Considera-se que a corrosão da maioria das armaduras que se encontram expostas resultou do recobrimento ter sido insuficiente, na generalidade inferior a 10 mm, ou ainda por estas armaduras com recobrimento inferior a 10 mm, ao corroerem, terem dado origem à delaminação do betão de recobrimento e acelerado o início da corrosão das armaduras mais interiores.

A redução de área da secção transversal das armaduras nas zonas com o betão de recobrimento delaminado é significativa, o que se traduzirá numa redução da sua resistência. Refira-se que esta redução não foi quantificada neste estudo.

Como ilustra a Figura 26, os varões de aço usados na construção dos viadutos não apresentavam nervuras. De acordo com a informação contida nos desenhos fornecidos pela Repsol, o aço é identificado como sendo A24.



Figura 26: Aspecto liso da superfície do varão de aço

2.3.2.2. *Extracção de carotes de betão*

Para avaliar a resistência à compressão *in situ*, o coeficiente de difusão dos cloretos, a profundidade de carbonatação e o teor de cloretos do betão foram seleccionadas quatro zonas dos viadutos, duas em cada viaduto, nas quais foram extraídas carotes de betão para serem ensaiadas em laboratório (Figura 19, Figura 20 e Quadro 1). No viaduto entre os postos de acostagem 9/10 (viaduto mais a sul) as zonas seleccionadas para a extracção foram zonas de betão são (Figura 19), enquanto no viaduto entre os postos de acostagem 4/5 foram zonas na proximidade de armaduras corroídas expostas (Figura 20-b, face este do pilar parede).

As carotes de betão foram extraídas com cerca de 92 mm e 100 mm de diâmetro, atravessando o pilar parede na totalidade da sua espessura, de 300 mm.

Refira-se que, como previsto no Plano de Trabalhos, após a extracção das carotes a Repsol foi responsável pela execução do enchimento das furações nos pilares parede dos viadutos, tendo em conta o ambiente agressivo em que estes se inserem.

Como se observa na Figura 19 e na Figura 20, foram extraídas 10 carotes de betão (Figura 27), cinco em cada viaduto, nas zonas do topo e da base dos pilares parede. No Anexo IV, as Figuras AIV.1 a AIV.3 mostram o aspecto geral das carotes extraídas dos viadutos.



Figura 27: Carote 1: Viaduto entre o posto de acostagem 9/10; Pilar Parede Nº3; ($\varnothing = 101$ mm; comp. máx= 330 mm); Dimensão do agregado $> 1/3 \varnothing$

2.3.2.3. Colheita de amostras de pó de betão endurecido obtido por desgaste *in situ*

Para determinar o perfil de cloretos no betão armado dos viadutos foram efectuadas seis colheitas de amostras de pó obtido por desgaste *in situ* do betão a várias profundidades nos pilares paredes dos dois viadutos. As zonas seleccionadas para realizar a colheita coincidiram com as zonas de extracção das carotes de betão (Figura 19 e Figura 20), tendo sido efectuada uma colheita em cada face do pilar parede em cada zona de extracção.

Após a fixação ao betão do equipamento para desgaste (Figura 28), deu-se início ao desgaste de uma secção circular de 73 mm de diâmetro desde a superfície do betão até à profundidade de 10 mm (desgaste de 1ª camada de betão de 10 mm de espessura). Refira-se que alguma sujidade superficial no betão fora previamente retirada por escovagem. A segunda colheita de pó obtido por desgaste correspondeu à camada de betão compreendida entre a profundidade de 12 mm até à profundidade de 22 mm (desgaste de uma camada de betão de 10 mm de espessura). Por último, a terceira colheita correspondeu ao desgaste da camada de betão compreendida entre a profundidade de 24 mm até 29-30 mm (desgaste de uma camada de betão de 5-6 mm de espessura). Os sacos com as amostras de pó colhidas foram identificados e conservados fechados na sala de laboratório até à data do ensaio.



Figura 28: Colheita de amostras na face este do pilar parede 3, do viaduto entre os postos de acostagem 9/10

2.3.2.4. Medição da profundidade de carbonatação do betão

Em algumas arestas dos pilares parede dos viadutos removeu-se o betão de recobrimento, com o auxílio de um martelo, e a superfície de rotura exposta foi aspergida com a solução de fenolftaleína para determinar a profundidade de carbonatação do betão (Figura 29), de acordo com os procedimentos indicados no projecto de norma prEN 14360. A solução mantém a cor transparente nas zonas onde o hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) foi convertido em carbonato de cálcio (CaCO_3), com pH inferior a cerca de 9 (zonas carbonatadas). Onde o dióxido de carbono (CO_2) ainda não penetrou ou não reagiu/consumiu o hidróxido de cálcio, com pH superior a 9, a solução muda para cor-de-rosa. Como ilustra a Figura 29, a profundidade de carbonatação foi sempre muito reduzida e variou entre 1 a 2 mm, sendo por vezes superior devido à presença do agregado.



Figura 29: Profundidade de carbonatação do betão nos pilares parede do viaduto entre os postos de acostagem 4/5

2.4. ENSAIOS REALIZADOS EM LABORATÓRIO

Os ensaios realizados em laboratório respeitam às carotes extraídas dos pilares parede dos viadutos entre os postos de acostagem 4/5 e 9/10, como indicado no Quadro 1.

As carotes foram conservadas em sacos fechados até se dar início à preparação dos provetes de ensaio.

2.4.1. Ensaio de compressão em carotes extraídas

Da zona central das carotes foram obtidos por corte os provetes de ensaio para a determinação da resistência à compressão do betão (Figura 30).

O ensaio de compressão foi realizado segundo a NP EN 12504-1. Os provetes, com altura igual ao diâmetro, foram obtidos por corte, a que se seguiu a rectificação por desgaste das faces de ensaio. Os provetes foram ensaiados na condição de saturação, tendo permanecido em água a (20 ± 2) °C pelo menos durante 48 h antes do ensaio.

O excesso de vazios dos provetes foi estimado por comparação visual do número e dimensões dos poros expostos na superfície de corte, com fotografias padrão correspondentes a diferentes percentagens de excesso de vazios de acordo com a norma BS EN 12504-1.

Os resultados da resistência à compressão do betão e do índice de vazios das carotes são apresentados no Quadro 2. A Figura 31 mostra a flutuação em relação ao valor médio da tensão de rotura, de 70,3 MPa.



Figura 30: Provetes de ensaio obtidos das carotes extraídas dos viadutos

Provete	Dimensões do provete, mm		Data do ensaio	Condições da superfície (seca/húmida)	Massa saturada (kg)	$D_{Estimada\ máx}$ agregado (mm)	Secção (mm ²)	Massa volúmica saturada ¹ (kg/m ³)	Rotura		Índice de vazios ² (%)
	Diâmetro	Relação altura/diâmetro							Força (kN)	Tensão (MPa)	
1B Face este	100	1	2011-06-29	húmida	1,905	58	7854	2430	556	70,8	0,5
2 Meio	92	1	2011-06-29	húmida	1,515	54	6648	2480	510	76,7	0,5
3 Meio	92	1	2011-06-29	húmida	1,546	52	6648	2530	457	68,7 ³	0,5
4 Meio	92	1	2011-06-29	húmida	1,573	39	6648	2570	361	54,3 ⁴	0,5
5 Meio	93	1	2011-06-29	húmida	1,555	48	6793	2460	521	76,7	0,5
6 Meio	93	1	2011-06-29	húmida	1,545	36	6793	2450	492	72,4	0,5
7 Meio	93	1	2011-06-29	húmida	1,553	38	6793	2460	525	77,3	0,5
9 Meio	93	1	2011-06-29	húmida	1,538	50	6793	2430	468	68,9	0,5
10 Meio	93	1	2011-06-29	húmida	1,563	47	6793	2470	455	67,0 ⁵	1,0
V. méd					1,588	47	6863	2476	483	70,3	0,6
D.P											
C.V.											
¹ - A determinação do volume foi efectuada pela medição das dimensões do provete ² - BS EN 12504-1:2009 ³ - Armadura Ø8 mm, Dist. _{face} =20 mm, Dist. _{eixo} = 18 mm ⁴ - Armadura Ø12 mm, Dist. _{face} =28 mm, Dist. _{eixo} = 24 mm ⁵ - Armadura Ø12 mm, Dist. _{face} =34 mm, Dist. _{eixo} = 42 mm											

Quadro 2: Resultados do ensaio de compressão e da inspeção visual segundo a NP EN 12504-1

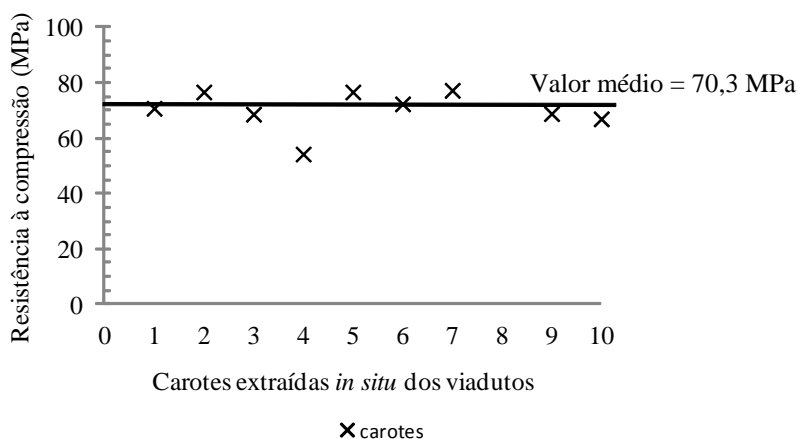


Figura 31: Resistência à compressão das carotes. Dispersão dos resultados

Da análise visual das carotes verifica-se que o agregado grosso do betão aplicado nos viadutos é seixo rolado de dimensão máxima de cerca de 35 mm, com areia rolada de quartzo, tendo-se observado a presença de conchas. O índice de vazios é o corrente, correspondendo a um valor médio de 0,6%. Foi possível verificar a presença duma malha de armaduras de profundidade variável (carotes 3 e 10).

2.4.2. Medição da profundidade de carbonatação em carotes

A profundidade de carbonatação foi medida em ambas as faces dos pilares parede, oeste e este, através da extracção de carotes atravessando o pilar parede de face a face, ao longo da toda a sua espessura. Assim sendo, os provetes de ensaio das extremidades das carotes foram usados para a medição da profundidade de carbonatação, de acordo com os procedimentos indicados no projecto de norma prEN 14360.

Como mostra a Figura 32, obteve-se a superfície de fractura por compressão diametral de modo a determinar a profundidade de carbonatação na face este e oeste. Na Figura 33 observam-se exemplos do andamento da frente de carbonatação para o interior do pilar parede.

Na secção transversal de uma das metades do provete de ensaio, imediatamente após a rotura, efectuou-se a aspersão de uma solução alcoólica de fenolftaleína, como indicador ácido-base. Como referido na secção 2.3.2.4., a solução mantém a cor transparente nas zonas com pH inferior a 9 (zonas carbonatadas) e muda para cor-de-rosa nas zonas com pH superior a cerca de 9. A outra metade do provete de ensaio foi usada para a determinação do perfil de cloretos (secção 2.4.3.).

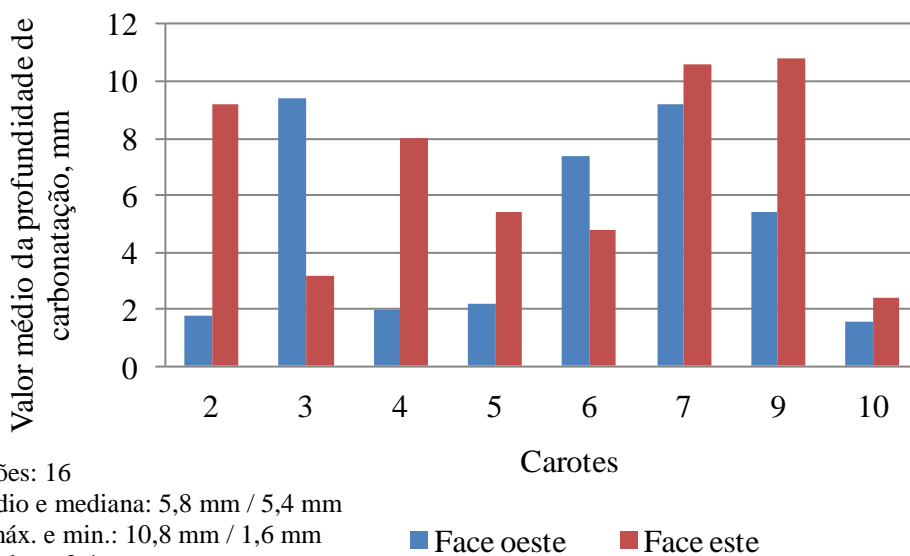


Figura 32: Obtenção da rotura da secção transversal dos provetes de ensaio



Figura 33: Aspecto da frente de carbonatação nas faces oeste (A) e este (B) dos pilares parede, a partir dos provetes de ensaio obtidos das carotes

A profundidade de carbonatação média do betão dos viadutos foi de 5,8 mm (n=16), com o valor mínimo de 1,6 mm e máximo de 10,6 mm. Como ilustra a Figura 34, os resultados sugerem uma tendência para uma maior profundidade na face este dos pilares parede, provavelmente associada às condições de exposição. No Quadro AIII.5 do Anexo III são apresentados os resultados obtidos e no Anexo IV as Figuras AIV.4 a AIV.5 mostram o aspecto da frente de carbonatação nas carotes extraídas.



Nº medições: 16
 Valor médio e mediana: 5,8 mm / 5,4 mm
 Valores máx. e mín.: 10,8 mm / 1,6 mm
 Desvio padrão: 3,4 mm
 Coef. Variação: 58,6 %

■ Face oeste ■ Face este

Figura 34: Valor médio dos resultados da profundidade de carbonatação em cada face dos pilares parede, medida em laboratório sobre as carotes extraídas dos viadutos

2.4.3. Determinação do teor de cloretos

A determinação do teor de cloretos a várias profundidades, de modo a conhecer o perfil do teor de cloretos do betão, foi efectuada em amostras obtidas por duas metodologias: a partir de carotes extraídas e por desgaste *in situ*. As zonas de colheita das amostras foram as mesmas para ambas as metodologias.

A análise do teor de cloretos no betão foi efectuada em termos de percentagem em relação à massa de cimento, de acordo com a definição do teor crítico⁵ indicado na NP EN 206-1 e na especificação LNEC 465. Assim sendo, tendo em conta as tensões de rotura obtidas (Quadro 2) e o valor da massa volúmica do betão de 2346 kg/m³ (betão seco), admitiu-se uma dosagem de cimento de 360 kg/m³ para o betão dos viadutos, pelo que os teores de cloretos obtidos no betão deverão ser multiplicados por 7, para serem expressos em percentagem da massa do cimento. Na análise de resultados, considerou-se um teor crítico de cloretos de 0,4% em relação à massa de cimento.

Em carotes extraídas

Como referido na secção 2.4.2., o provete de ensaio usado para a determinação do teor de cloretos no betão foi a outra metade do provete de ensaio usado para a medição da profundidade de carbonatação (Figura 33).

Como ilustra a Figura 35, da metade de cada provete de ensaio das extremidades das carotes (faces oeste (B) e este (A)) foram serradas quatro fatias (amostras) a diferentes distâncias do topo. A 1ª fatia correspondeu à camada desde a superfície da carote até 10 mm de profundidade, com 10 mm de espessura. A 2ª fatia correspondeu à camada compreendida entre a distância de 12 mm do topo até 22 mm de profundidade, também com 10 mm de espessura; a 3ª fatia à camada compreendida entre a distância de 24 mm do topo até à profundidade de 30 mm, com 6 mm de espessura; e, por último, a 4ª fatia correspondeu à camada compreendida entre a distância de 32 mm do topo até à profundidade de 52 mm, com 20 mm de espessura.

No Anexo IV, as Figuras AIV.6 a AIV.9 mostram o aspecto geral das fatias (amostras) obtidas de cada meio provete de ensaio das extremidades das carotes extraídas dos viadutos.

⁵ - Entende-se por teor crítico o valor do teor de cloretos acima da qual se assume haver condições para ocorrer a corrosão das armaduras



Figura 35: Provetes de ensaio obtidos da carote 2, da metade dos provetes dos topos, face oeste e face este

As fatias foram secas ao ar da sala de laboratório, partidas em fragmentos pequenos com dimensões não superiores a 7 mm, aproximadamente, e levadas ao moinho de bolas até toda a amostra passar no peneiro de 150 μm de abertura de malha. De seguida a amostra foi sujeita ao ensaio de determinação do teor de cloretos de acordo com a NP EN 196-2 (secção 14), com as seguintes alterações: a toma de amostra utilizada foi de 2,5 g e a amostra depois de atacada foi filtrada para um balão volumétrico de 250 ml. Seguidamente foi feita uma toma de 100 ml a partir do balão volumétrico, a qual foi posteriormente titulada.

No Anexo III, os Quadros AIII.6 a AIII.9 apresentam os resultados obtidos do ensaio de determinação do teor de cloretos, em percentagem da massa do betão, nas várias fatias (amostras) em profundidade, desde o topo da carote (superfície do betão) até cerca de 50 mm de profundidade.

Em amostras de pó de betão endurecido obtido por desgaste *in situ*

As amostras de pó seco de betão endurecido dos pilares parede dos viadutos colhidas *in situ* pelo método de desgaste foram conservadas em sacos fechados na sala condicionada até à data de ensaio (Figura 36).

As amostras de pó foram secas ao ar da sala de laboratório e destas foram retiradas as tomas para ensaio. O teor de cloretos foi determinado conforme indicado na NP EN 196-2 (secção 14) e com as mesmas alterações já referidas para a determinação do teor de cloretos a partir de carotes extraídas.

No Anexo III, o Quadro AIII.10 apresenta os resultados obtidos do ensaio de determinação do teor de cloretos, em percentagem da massa do betão, nas várias camadas obtidas por desgaste em profundidade, desde a superfície do betão até cerca de 30 mm de profundidade.



Figura 36: Sacos com as colheitas de pó seco do betão endurecido obtido por desgaste *in situ*

Na Figura 37 apresenta-se o perfil médio do teor de cloretos do betão, com base em 22 amostras (16 a partir de carotes extraídas e 6 por desgaste *in situ*). Na Figura 38 apresentam-se os perfis do teor de cloretos obtidos a partir de cada carote extraída e de cada colheita de pó obtido por desgaste *in situ* nas zonas superior e inferior dos pilares parede dos dois viadutos, e, nas Figura 39 e Figura 40, os resultados da zona superior e da zona inferior, separadamente.

Como ilustram a Figura 37 e a Figura 38, a maior variação nos resultados obtidos foi na superfície do betão, como seria de esperar. O perfil médio de cloretos praticamente estabilizou à profundidade de 27 mm, no valor médio de 0,23 % em relação à massa do cimento, presumindo-se que corresponda ao teor de cloretos contido no betão (soma das contribuições dos materiais constituintes). Parece, assim, que os betões aplicados nos viadutos já continham, na altura da colocação, um teor de cloretos relativamente elevado. De facto, verificou-se numa das carotes extraídas a presença de conchas, o que sugere que as areias utilizadas tenham provido da zona costeira e que estas não tenham sido devidamente lavadas (secção 2.4.5.).

Da análise da Figura 39 e da Figura 40, verificou-se uma penetração ligeiramente superior no betão da zona superior dos pilares parede (Figura 39), relativamente à obtida na zona inferior, junto ao chão (Figura 40), sobretudo à superfície, sugerindo que a contaminação de cloretos parece diferir ligeiramente em altura. Na generalidade, pode afirmar-se que a contaminação de cloretos a partir da face este não difere significativamente da obtida na face oeste dos pilares parede.

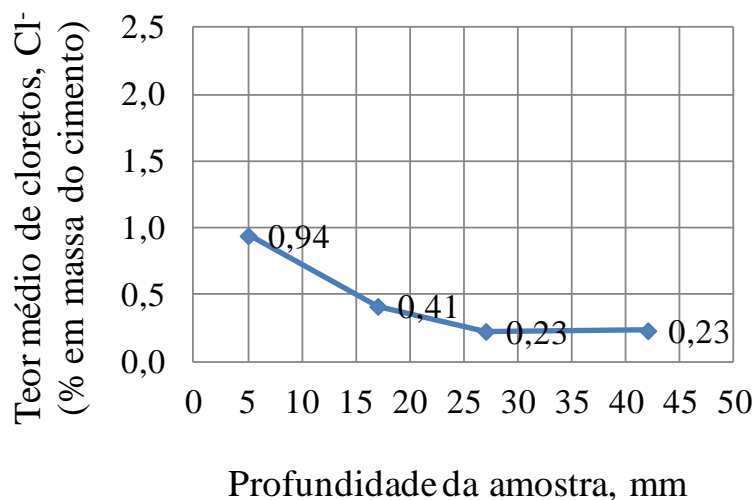


Figura 37: Perfil do teor médio de cloretos no betão dos pilares parede dos dois viadutos com cerca de 30 anos de idade

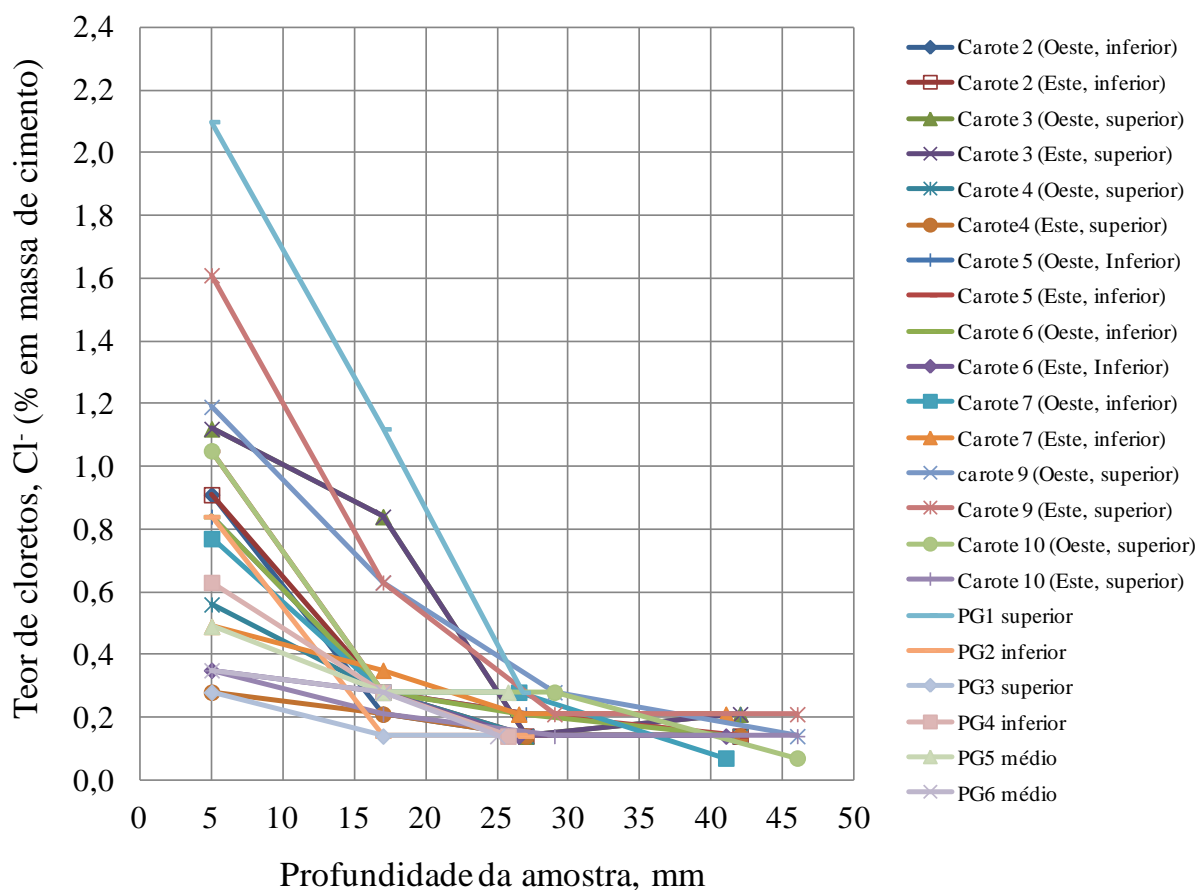


Figura 38: Perfis do teor de cloretos a partir de cada carote extraída e de cada colheita de pó obtido por desgaste *in situ*, do betão dos pilares parede com cerca de 30 anos de idade

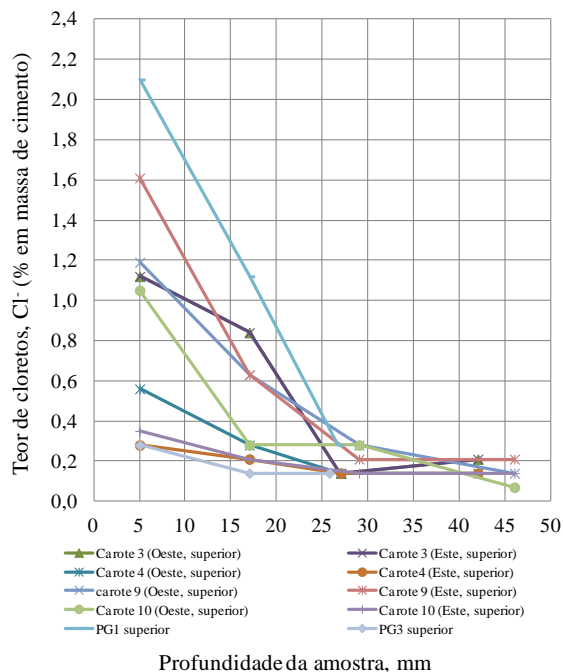


Figura 39: Perfis do teor de cloretos somente considerando os resultados obtidos na zona superior do pilar parede

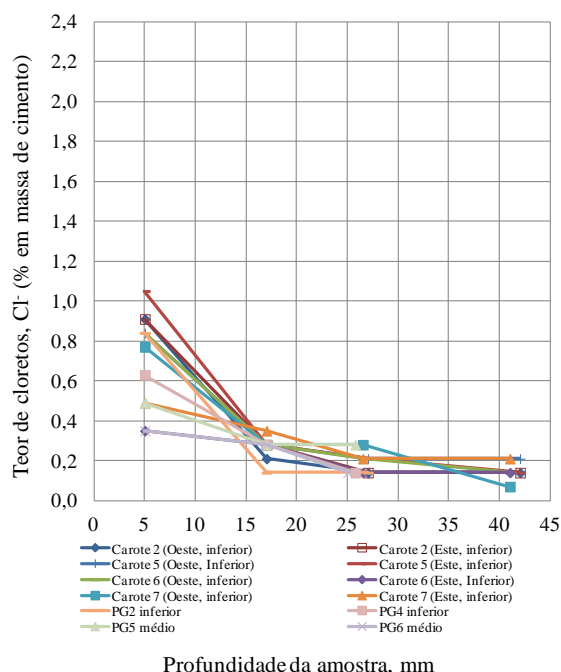


Figura 40: Perfis do teor de cloretos somente considerando os resultados obtidos na zona inferior e média do pilar parede

2.4.4. Determinação do coeficiente de difusão dos cloretos em carotes por ensaio de migração

De modo a avaliar a resistência à penetração dos cloretos no betão são dos viadutos, ou seja, a resistência do betão inicial sem contaminação (apenas com o teor de cloretos contido nos materiais constituintes do betão), foram ensaiados provetes da zona do meio das carotes extraídas onde o ião cloreto ainda não terá penetrado, com base nos resultados dos perfis de cloretos agora obtidos (Figura 37 e Figura 38).

Para tal, foi determinado o coeficiente de difusão dos cloretos no betão por ensaio de migração em regime não estacionário, segundo o método descrito na especificação LNEC E 463. Foram usados três provetes cilíndricos com altura igual a metade do diâmetro (50 mm), provenientes das carotes C1 e C8 (Quadro 1, Figura 41).



Figura 41: Provetes de ensaio usados para a determinação do coeficiente de difusão dos cloretos (L=50 mm; Ø ≈ 100 mm)

O princípio do método consiste em aplicar, entre os topos do provete, um potencial eléctrico, o que vai forçar, por migração, o transporte dos iões cloreto através do betão. Após determinado período de ensaio, parte-se o provete por tracção comprimindo-o diametralmente e pulveriza-se uma das secções rectangulares obtidas com uma solução de nitrato de prata. A partir do precipitado branco visível de cloreto de prata mede-se a profundidade de penetração e, com base nessa medida, calcula-se o coeficiente de difusão dos cloretos, segundo a equação seguinte (LNEC E 463):

$$D_{mig} = \frac{0,0239(273 + T).L}{(U - 2).t} \left(x_d - 0,0238 \cdot \sqrt{\frac{(273 + T).Lx_d}{U - 2}} \right) \text{ eq. (3)}$$

sendo,

D_{mig} – o coeficiente de difusão dos cloretos obtido pelo ensaio de migração, $\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$;

U – o valor absoluto da voltagem aplicada, V;

T – o valor médio das temperaturas inicial e final na solução anódica, °C;

L – a espessura do provete, mm;

X_d – o valor médio da profundidade de penetração, mm;

t – a duração do ensaio, horas.

No Quadro 3 apresentam-se os resultados obtidos do coeficiente de difusão dos cloretos no betão dos viadutos com cerca de 30 anos de idade, pelo ensaio de migração (LNEC E 463).

Identificação do provete	Intensidade da corrente (mA)		Temperatura da solução (°C)		Tensão aplicada (V)	Prof. penetração média x_d (mm)	LNEC E 463 Coef. de Difusão D_{mig} ($\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$)
	I(inicial)	I(final)	T(inicial)	T(final)			
C1O	17,9	17,6	20,0	20,0	30	10	4,31
C1E	17,1	16,7	20,0	20,0	30	13	5,75
C8E	16,0	15,9	20,0	20,0	30	13	5,86
Valor médio							5,31
Desvio Padrão							0,86
Coef. de variação, %							16,3

Quadro 3: Coeficiente de difusão dos cloretos segundo o ensaio de migração (LNEC E 463), no betão dos viadutos com cerca de 30 anos de idade

2.4.5. Observação do betão ao MEV

Por observação ao MEV da superfície de fractura de um pedaço de betão da zona do meio de uma das carotes extraídas (zona do interior do pilar parede) não foi detectado na pasta de cimento qualquer vestígio de cinza volante não hidratada (Figura 42, Figura 43), pelo que é pouco provável que tenha sido usada esta adição tipo II no betão.

Face à data da construção da obra e à resistência à compressão obtida nas carotes, assume-se que o cimento utilizado terá sido o CEM I⁶.

As observações realizaram-se num MEV, JEOL JSM-6400, tendo-se utilizado tensões de feixe electrónico de 15 keV. A superfície de fractura do provete de ensaio foi recoberta com uma película de ouro de forma a tornar a superfície a observar condutora ao feixe de electrões do MEV.

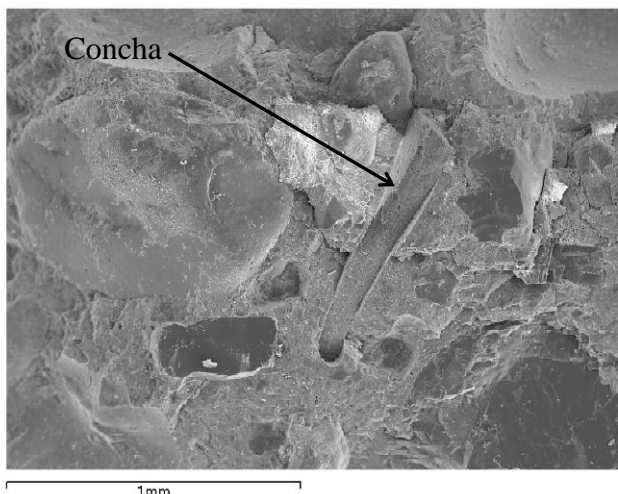


Figura 42: Aspecto geral da amostra de betão, onde são visíveis agregados rolados de quartzo e conchas

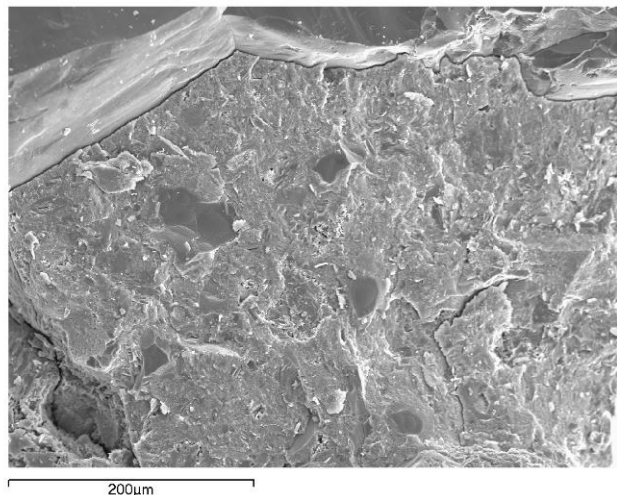


Figura 43: Aspecto de pormenor da pasta de cimento, onde não se detectou a presença de partículas de cinza volante

2.4.6. Análise dos resultados

Analisando os resultados da espessura do recobrimento das armaduras, apresentados na Figura 24 e Figura 25, verificou-se que o recobrimento médio das armaduras, de 43 mm (com base em 347 resultados) e de 32 mm (com base em 263 resultados), respectivamente, nos pilares parede e nos encontros dos dois viadutos, é inferior ao valor mínimo do recobrimento nominal exigido ao betão armado para uma vida útil de 50 anos, para a classe de exposição ambiental XS1, de 45 mm, de acordo com os Quadros 6 e 7 da especificação LNEC E 464 (Quadro 4).

⁶ - Cimento portland com 95-100 % de clínquer e 0-5 % de constituintes minoritários, segundo a NP EN 197-1

Os recobrimentos mínimos de 15 mm (pilares parede) e de 13 mm (encontros), considerados como o percentil 5 dos valores obtidos, são largamente inferiores ao exigido naquela especificação – recobrimento mínimo de 35 mm, que corresponde a um recobrimento mínimo nominal de 45 mm.

	LNEC E 464 Limites de composição sob acção do CO ₂		LNEC E 464 Acção do Cl ⁻
Tipo de cimento	Cimento I (Referência); CEM II/A ⁽¹⁾		CEM I; CEM II/A ⁽²⁾
Classe de exposição	XC2	XC4	XS1
Mínimo recobrimento nominal (mm) ⁽³⁾	35	40	45
Máxima razão água/cimento	0,65	0,60	0,45
Mínima dosagem de cimento, C (kg/m ³)	240	280	360
Mínima classe de resistência	C25/30 LC25/28	C30/37 LC30/33	C40/50 LC40/44

(1) Não aplicável aos cimentos II/A-T e II/A-W e aos cimentos II/B-T e II/B-W, respectivamente

(2) Não aplicável aos cimentos II-T, II-W, II-B-L e II-B-LL

(3) $C_{nom} = C_{min} + C_{dev}$, com $C_{dev} = 10$ mm (Anexo B da especificação LNEC E 464:2007)

Quadro 4: Limites da composição e da classe de resistência do betão sob acção do dióxido de carbono e dos cloretos, para uma vida útil de 50 anos, segundo a LNEC E 464.

Como mostra o Quadro 5, para estimar a resistência à compressão *in situ* do betão dos viadutos a partir dos resultados dos ensaios de compressão obtidos nas carotes extraídas (Quadro 2) foi seguida a metodologia indicada na norma EN 13791. Tendo sido consideradas quatro localizações de ensaio, duas na zona inferior e outras duas na zona superior dos pilares parede (n=4), por aplicação da tabela 2 da secção 7.3.3. da norma EN 13791 resulta que a classe de resistência *in situ* do betão dos viadutos com cerca de 30 anos de idade (idade actual) deve ser C55/67. Considerando um coeficiente de endurecimento de 1,35 entre os 28 dias e a idade do betão à data do ensaio e, aplicando novamente a secção 3.3.3. da EN 13791, obtém-se que a classe de resistência *in situ* do betão a considerar aos 28 dias de idade deveria ser C40/50.

Localização de ensaio	Carotes extraídas	Classe de resistência dos viadutos <i>in situ</i> com 30 anos de idade, segundo secção 7.3.3 da EN 13791	Classe de resistência dos viadutos <i>in situ</i> aos 28 dias de idade, segundo secção 7.3.3 da EN 13791
Nº1	C1B; C2M; C5M	n=4; k=7	$f_{ck, is, cube}$
Nº2	C3M; C4M	$f_{is, min} = 61,5$ MPa	n=4; k=7
Nº3	C6M; C7M	$f_{m, is} = 69,8$ MPa	$f_{is, min} = 45,6$ MPa
Nº4	C9M; C10M	$f_{ck, is} = 62,8$ MPa	$f_{m, is} = 51,7$ MPa
		C55/67	$f_{ck, is} = 44,7$ MPa
			C40/50

Quadro 5: Resistência estimada do betão dos viadutos *in situ*, com 30 anos e aos 28 dias de idade

Verifica-se portanto que, para as classes de exposição XC4 e XS1 onde se insere o betão armado dos viadutos, a que correspondem as classes de resistência mínima para uma vida útil de 50 anos de, respectivamente, C30/37 e C40/50 (Quadro 4), a resistência do betão *in situ* poderia considerar-se suficiente.

No que respeita ao fenómeno da carbonatação, encontrando-se a frente de carbonatação à profundidade média de 6 mm, considera-se que a alcalinidade do betão que envolve as armaduras será em geral elevada, com pH superior a cerca de 9, e que permite manter a passividade das armaduras, na ausência de teores de cloretos elevados.

Admitindo que a profundidade de carbonatação (X , mm) cresce com a razão quadrada do tempo (t , anos), é possível estimar em termos médios o factor k de penetração do CO_2 ($\text{mm}/t^{1/2}$) através da equação seguinte:

$$x = k\sqrt{t} \quad \text{eq. (4)}$$

que, no caso dos viadutos k assume o valor de $1,06 \text{ mm}\cdot\text{ano}^{-1/2}$, considerando X o valor médio de 6 mm e para t o valor de 30 anos. Este baixo valor do coeficiente de carbonatação é coerente com o valor médio da tensão de rotura do betão *in situ*, de 70,3 MPa (Quadro 2). Refira-se que, em estudos realizados no LNEC se obteve para um betão C20/25 com 36 anos de idade, um coeficiente de carbonatação de $6,67 \text{ mm}\cdot\text{ano}^{-1/2}$, tendo o valor médio da profundidade de carbonatação atingido 40 mm.

A Figura 44 ilustra a estimativa da evolução da profundidade média de carbonatação do betão armado dos pilares parede dos viadutos, atingindo-se a profundidade média de carbonatação de 10 mm daqui a 50 anos (cerca de 80 anos de idade). Saliente-se que esta análise foi realizada em termos médios e não foi tida em conta a incerteza associada ao modelo de previsão.

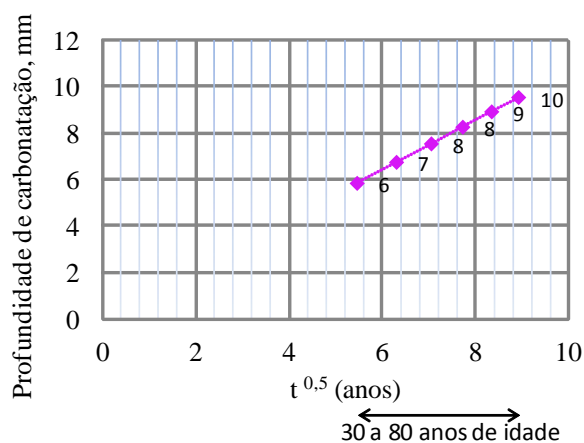


Figura 44: Evolução da profundidade média de carbonatação *in situ*

Para a análise do teor de cloretos obtido, apresentam-se na Figura 45 os perfis de cloretos no betão dos pilares parede versus o recobrimento médio das armaduras nos pilares parede (43 mm, Figura 24) e nos encontros (32 mm, Figura 25), as profundidades onde o teor crítico de cloretos de 0,4% não é, em média e individualmente, ultrapassado, bem como a profundidade média de carbonatação no betão.

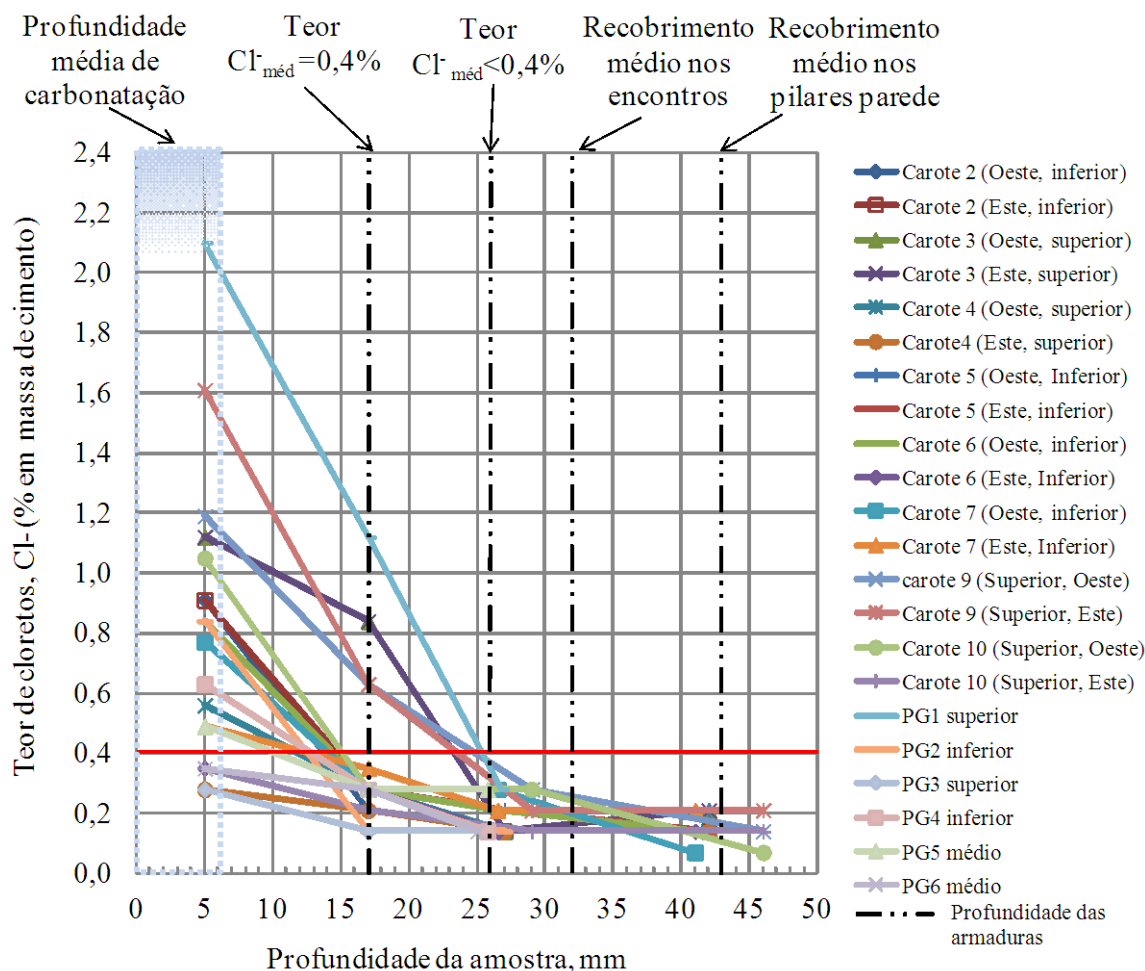


Figura 45: Perfis de cloretos no betão dos pilares parede, em carotes extraídas e obtido por desgaste *in situ*, versus recobrimento médio das armaduras e profundidade média de carbonatação do betão

Verifica-se que o teor crítico de cloretos, admitido de 0,4%, não é ultrapassado à profundidade média das armaduras quer nos pilares parede (de 43 mm) quer nos encontros (32 mm) dos viadutos. As armaduras mais superficiais, a 13 mm (encontros) e 15 mm (pilares parede), valores considerados como o percentil 5 dos valores obtidos, estão claramente na zona de elevado teor de cloretos. Na generalidade das amostras o teor crítico de cloretos é largamente ultrapassado até à profundidade de 17 mm (Figura 37), considerando-se que o risco de corrosão até essa profundidade não pode ser ignorado, mesmo atendendo a que o limite de 0,4 % seja, em geral, conservador, justificando assim a corrosão observada visualmente.

Para a profundidade das armaduras entre 17 mm e 26 mm o teor de cloretos pode ser superior ao crítico. No entanto, 86 % das armaduras nos pilares parede (Figura 24) e 75 % nos encontros (Figura 25) têm recobrimentos maiores que 25 mm, podendo considerar-se que se encontram, por agora, protegidas da corrosão.

No que respeita ao fenómeno de penetração dos cloretos, a partir do perfil do teor médio de cloretos no betão (Figura 37) e tendo em conta a equação (5), com base na 2ª lei de Fick da difusão, foi possível estimar por análise de regressão não linear e com base no método dos mínimos quadrados, o coeficiente de difusão dos cloretos no betão dos viadutos aos 30 anos de idade, D , e o teor de cloretos à superfície, C_s .

$$C(X, t) = C_s - (C_s - C_0) \cdot \operatorname{erf} \left(\frac{X}{2 \cdot \sqrt{D \cdot t}} \right) \quad \text{eq. (5)}$$

sendo,

$C(X, t)$ – teor de cloretos, em % da massa do cimento, à profundidade X (m) e para um tempo de exposição aos cloretos t (s);

C_s – teor de cloretos à superfície do betão, em % da massa do cimento, para $t = 0$ s, suposta constante;

C_0 – teor inicial de cloretos no betão (em % da massa do cimento). Considerou-se igual a 0,23%, o valor obtido no perfil do teor médio de cloretos aos 30 anos de idade à profundidade de 42 mm;

X – profundidade no betão (m);

D – coeficiente de difusão dos cloretos no betão (m^2/s);

erf – função de erro (Anexo E, LNEC E 465).

Os valores estimados do coeficiente de difusão dos cloretos (D) e do teor de cloretos à superfície (C_s), no betão dos viadutos com cerca de 30 anos de idade, foram de, respectivamente, $7,8 \times 10^{-14} \text{ m}^2/\text{s}$ e 1,3 %.

Como referido na secção 6.2.2. b) da especificação LNEC E 465, considerando que este coeficiente de difusão dos cloretos no betão ($D = 7,8 \times 10^{-14} \text{ m}^2/\text{s}$) diminui com o tempo de exposição segundo a equação (6), foi possível estimar o seu valor aos 28 dias de idade (D_0 , $t_0=28$ dias).

$$D = k_{D,C} \cdot k_{D,RH} \cdot k_{D,T} \cdot \left(\frac{t_0}{t} \right)^n \cdot D_0 = 0,768 \cdot \left(\frac{t_0}{t} \right)^{0,55} \cdot D_0 \quad \text{eq. (6)}$$

sendo,

$k_{D,C}$ – factor que tem em conta a influência das condições de cura. Considerando que na altura da colocação do betão nos viadutos se praticou um número de dias de cura normalizada, k toma o valor de 2,4;

$k_{D,RH}$ – factor que tem em conta a influência da humidade relativa ambiente (RH). Para a classe de exposição ambiental XS1, k toma o valor de 0,4;

$k_{D,T}$ – factor que tem em conta a influência da temperatura. Considerando a temperatura média do betão de 15°C com base na temperatura média ambiente da zona costeira onde se inserem os viadutos, k toma o valor de 0,8;

D_0, t_0 – coeficiente de difusão potencial (m^2/s) obtido pelo ensaio de migração (LNEC E 463), determinado na idade de referência $t_0=28$ dias;

n – factor que tem em conta o decréscimo de D ao longo do tempo. Para a classe de exposição ambiente XS1 e para betão fabricado com o cimento CEM I, n toma o valor de 0,55.

O valor estimado do coeficiente de difusão no betão aos 28 dias de idade (D_0) foi de $2,7 \times 10^{-12} m^2/s$. Consultando o Quadro A.8 da Especificação LNEC E 465 pode observar-se que este valor estimado do coeficiente de difusão no betão aos 28 dias de idade ($2,7 \times 10^{-12} m^2/s$), é inferior ao máximo exigido para as estruturas com um recobrimento mínimo de 20 mm, usando um betão com cimento CEM I e razão A/C > 0,4 e para um tempo de vida útil de 50 anos ($3,3 \times 10^{-12} m^2/s$), pelo que, em princípio, a qualidade do betão seria suficiente para garantir a durabilidade de 50 anos se os recobrimentos da especificação LNEC E 464 fossem assegurados.

Por último, a Figura 46 ilustra a estimativa da evolução do perfil do teor médio de cloretos no betão dos pilares parede dos viadutos, com base nas equações (5) e (6) e considerando os valores estimados de C_s (1,3%) e D_0 ($2,7 \times 10^{-12} m^2/s$).

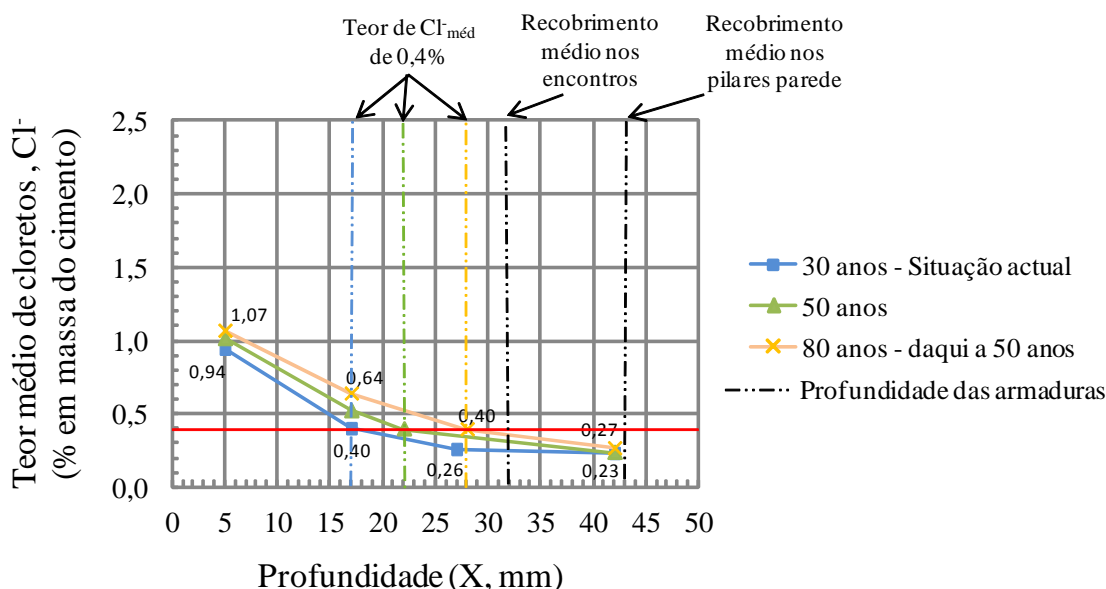


Figura 46: Evolução do perfil do teor médio de cloretos no betão *in situ*

Observa-se que se atinge o valor crítico do teor de cloretos, admitido de 0,4%, à profundidade de 22 mm daqui a 20 anos (cerca de 50 anos de idade) e à profundidade de 28 mm daqui a 50 anos (cerca de 80 anos de idade). Saliente-se que esta análise foi realizada em termos médios e não foi tida em conta a incerteza associada ao modelo de previsão.

2.5. CONCLUSÕES DO CAPÍTULO 2

A análise dos documentos disponíveis, a visita de inspecção e os resultados dos ensaios efectuados permitiram uma avaliação do estudo actual do betão armado dos viadutos, da qual se salientam as seguintes conclusões mais relevantes:

1. As anomalias principais identificadas nos viadutos foram cinco: armaduras expostas e extremidade do espaçadores corroídas expostas, corte e ou esmagamento do betão de recobrimento na zona de contacto com a estrutura metálica, fissuras verticais e inclinadas.
2. O recobrimento médio das armaduras de 43 mm nos pilares parede e de 32 mm nos encontros, respectivamente obtido com base em 347 e 263 medições, é inferior ao mínimo recobrimento nominal exigido actualmente ao betão para uma vida útil de 50 anos (45 mm) para a classe de exposição XS1, a mais crítica para a durabilidade do betão armado dos viadutos (Quadro 4). De igual modo, os recobrimentos mínimos de 15 mm (pilares parede) e de 13 mm (encontros), considerados como o percentil 5 dos valores obtidos, não satisfazem o valor mínimo exigido ao betão para uma vida útil de 50 anos (35 mm) para a classe de exposição XS1 (Quadro 4).
3. Em certas armaduras corroídas, observou-se uma redução apreciável da secção, embora não se tivesse efectuado a sua quantificação.
4. O valor médio da resistência à compressão *in situ* do betão foi de 70,3 MPa (n=9, Quadro 2) e o mínimo de 54,3 MPa, a que corresponde a classe de resistência *in situ* do betão de C55/67, de acordo com a EN 13791. À data da construção dos viadutos, a classe de resistência *in situ* do betão seria C40/50, admitindo um coeficiente de endurecimento de 1,35 entre os 28 dias e a idade do betão à data do ensaio, de acordo com a EN 13791. Para as classes de exposição XC4 e XS1 onde se insere o betão armado dos viadutos, a que correspondem as classes de resistência mínima para uma vida útil de 50 anos de, respectivamente, C30/37 e C40/50 (Quadro 4), a resistência do betão *in situ* poderia considerar-se suficiente.
5. A profundidade média de carbonatação do betão dos viadutos foi de 5,8 mm, com o valor mínimo de 1,6 mm e máximo de 10,6 mm, podendo afirmar-se que o fenómeno da carbonatação do betão nos viadutos não é condicionante para a evolução da degradação do betão armado, ou seja, para a progressão da corrosão das armaduras no interior do betão dos viadutos. Pela estimativa da evolução da profundidade média de carbonatação do betão armado dos pilares parede dos viadutos (Figura 44), atinge-se a profundidade média de carbonatação de 10 mm daqui a 50 anos (cerca de 80 anos de idade).

6. O valor do coeficiente de difusão dos cloretos no betão aos 30 anos de idade (D_{mig}) foi de $5,3 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$.

O valor estimado do coeficiente de difusão dos cloretos no betão aos 28 dias de idade ($D_{0,mig}$) foi de $2,7 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$. De acordo com o Quadro A.8 da Especificação LNEC E 465 este valor estimado é inferior ao máximo exigido para as estruturas com um recobrimento mínimo de 20 mm, usando um betão com cimento CEM I e razão A/C > 0,4 e para um tempo de vida útil de 50 anos ($3,3 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$), pelo que, em princípio, a qualidade do betão dos viadutos seria suficiente para garantir a durabilidade de 50 anos se os recobrimentos da especificação LNEC E 464 fossem assegurados.

Pela estimativa da evolução do perfil do teor médio de cloretos no betão dos pilares parede dos viadutos (Figura 46), atinge-se o valor crítico do teor de cloretos, admitido de 0,4%, à profundidade de 22 mm daqui a 20 anos (cerca de 50 anos de idade) e à profundidade de 28 mm daqui a 50 anos (cerca de 80 anos de idade).

7. O teor crítico de cloretos, considerado de 0,4% em massa do cimento, é ultrapassado para profundidades inferiores a 17 mm (Figura 37), que justifica a corrosão já observada. As armaduras mais superficiais, até à profundidade de 17 mm (Figura 37), estão claramente em zona com elevado teor de cloretos, considerando-se que o risco de corrosão até essa profundidade não pode ser ignorado, mesmo atendendo a que o limite de 0,4 % possa ser conservador. Para a profundidade das armaduras entre 17 mm e 26 mm o teor de cloretos pode ser superior ao crítico. No entanto, 86 % das armaduras nos pilares parede (Figura 24) e 75 % nos encontros (Figura 25) têm recobrimentos maiores que 25 mm, podendo considerar-se que se encontram, por agora, protegidas da corrosão.

3. CAUSAS DA DEGRADAÇÃO DO BETÃO DOS VIADUTOS

A degradação do betão armado dos viadutos considera-se ter resultado dos seguintes factores principais associados às anomalias observadas:

1. recobrimento insuficiente com maior incidência na face inferior das lajes pré-fabricadas, na zona de espessamento dos pilares e em algumas zonas ao longo do comprimento visível dos pilares, que deu origem às armaduras corroídas expostas (Figura 2 a Figura 4);
2. deficiente pormenorização da zona de contacto dos pilares com a estrutura metálica do tabuleiro, que deu origem ao corte e/ou esmagamento do betão de recobrimento dessa zona e à fissuração inclinada e vertical na zona de espessamento do pilar (Figura 5 a Figura 7);
3. deficiente controlo da fissuração associada à retracção do betão, sobretudo no comprimento visível do pilar, que deu origem à fissuração vertical no pilar (Figura 8 e Figura 9);
4. ausência da impermeabilização do tabuleiro, facilitando o acesso e a penetração de água nas lajes pré-fabricadas e nos pilares, que teve como consequência acelerar o processo de corrosão das armaduras no betão (Figura 17).

4. NÍVEL DE DEGRADAÇÃO DO BETÃO DOS VIADUTOS

Com base na observação macroscópica efectuada no decorrer da inspecção *in situ* salientam-se os seguintes aspectos:

- não existem elementos de betão armado sem degradação visível (Figura 47);
- a totalidade das lajes pré-fabricadas apresenta degradação visível em mais de metade da área exposta do elemento, face inferior (Figura 48);
- a maioria dos pilares parede apresentava degradação visível em menos de metade da área exposta, mas esta abrangia todo o pilar, i. e., quer a zona de espessamento quer o restante comprimento visível do pilar. Nos pilares parede PP1 e PP7 do viaduto 4/5 e PP6 e PP7 do viaduto 9/10 a degradação visível ocorria concentrada na zona de espessamento (Figura 49); e, nos restantes 10 pilares parede a degradação abrangia a totalidade do pilar (Figura 47 e Figura 50);
- a maioria dos pilares dos encontros dos viadutos apresentavam degradação visível concentrada na zona de contacto com o tabuleiro.

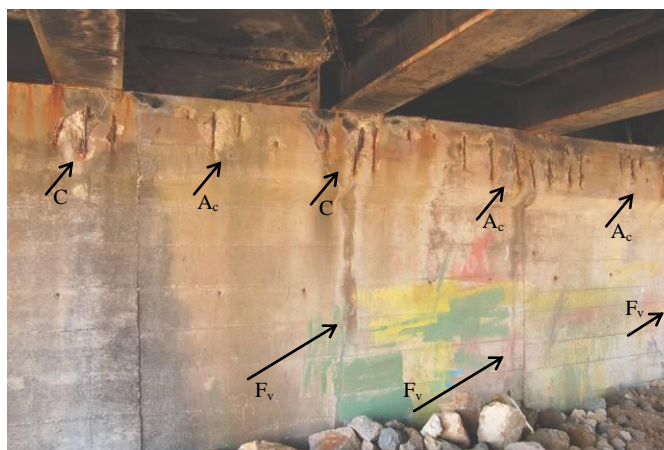


Figura 47: Degradação do betão armado em menos de metade da área exposta do pilar parede 3 (PP3), ocorrendo na zona de espessamento e no restante comprimento visível do pilar. Viaduto 4/5



Figura 48: Degradação do betão armado em mais de metade da área exposta da laje pré-fabricada do tabuleiro do viaduto 9/10 (face inferior)



Figura 49: Degradação do betão armado em menos de metade da área exposta e concentrada na zona de espessamento do pilar parede 1 (PP1) do viaduto 9/10



Figura 50: Degradação do betão armado em menos de metade da área exposta e abrangendo a totalidade do pilar parede 2 (PP2) (zona de espessamento e restante comprimento visível). Viaduto 4/5

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A estrutura de betão armado que constitui os viadutos localizados entre os postos de acostagem 4/5 e 9/10 da APS, construídos em finais da década de 70 ou início da década de 80, apresenta degradação visível em todos os elementos de betão armado.

Foi efectuada uma inspecção visual pormenorizada *in situ* com registo das fissuras verticais visíveis e a observação pontual do betão armado da zona do pilar enterrada, imediatamente abaixo do terreno. Os ensaios realizados *in situ* incluíram a medição da espessura do recobrimento, colheita de pó seco de betão endurecido obtido por desgaste *in situ* e a extracção de carotes. Os ensaios realizados em laboratório sobre as carotes extraídas e as amostras de pó de betão endurecido obtido por desgaste *in situ*, dos pilares parede, contemplaram a determinação da profundidade de carbonatação, do perfil do teor de cloretos do betão, do coeficiente de difusão de cloretos e da resistência à compressão do betão.

Com base na inspecção visual *in situ*, a totalidade das lajes pré-fabricadas apresenta degradação na generalidade da área exposta do elemento (face inferior), enquanto na maioria dos pilares parede existe também degradação, mas seguramente em menos de metade da área exposta do elemento; no entanto, esta ocorre quer na zona de espessamento quer no restante comprimento visível do pilar. Nos encontros a degradação concentra-se sobretudo na zona de contacto com o tabuleiro. Não se observaram elementos sem degradação visível.

A degradação do betão armado observada resulta, por um lado, do deficiente controlo do recobrimento das armaduras durante a construção dos viadutos e da ausência de impermeabilização do tabuleiro. Por outro lado, a degradação observada resulta também de efeitos estruturais em fase de serviço, em consequência do tipo de ligação da estrutura metálica do tabuleiro ao betão armado dos pilares, sem aparelho de apoio, e ao deficiente controlo da fissuração associada à retracção do betão.

A degradação nos viadutos é condicionada pela corrosão do aço induzida por cloretos, verificando-se reduzida progressão da profundidade da carbonatação no betão.

Relativamente aos pilares e encontros de betão armado dos viadutos inseridos em área costeira exposta à chuva (classes de exposição ambiental XS1 e XC4), considera-se que a classe de resistência *in situ* do betão aos 28 dias de idade de C40/50 satisfaz o estabelecido na Especificação LNEC 464 para uma vida útil de 50 anos, face às acções ambientais. No entanto, os recobrimentos medidos nestes elementos estruturais conduziram a um valor mínimo de 14 mm, considerado como o percentil 5 dos valores obtidos, pelo que não é satisfeito o exigido

naquela especificação – recobrimento mínimo de 35 mm, que corresponde a um recobrimento mínimo nominal de 45 mm.

O valor estimado do coeficiente de difusão no betão aos 28 dias de idade ($D_0=2,7 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$) é inferior ao máximo exigido para as estruturas com um recobrimento mínimo de 20 mm, usando um betão com cimento CEM I e razão A/C > 0,4 e para um tempo de vida útil de 50 anos ($3,3 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$) com base no modelo da especificação LNEC E 465, pelo que, em princípio, a qualidade do betão seria suficiente para garantir a durabilidade de 50 anos se os recobrimentos da especificação LNEC E 464 fossem assegurados.

O teor crítico de cloretos, considerado de 0,4% em massa do cimento, é ultrapassado para profundidades inferiores a 17 mm, justificando assim a corrosão observada visualmente, face aos recobrimentos medidos.

BIBLIOGRAFIA

[1] - Porto de Sines - <http://www.skyscrapercity.com/>

[2] - Clima Sines - <http://www.sines.pt/PT/concelho/geografia/clima/Paginas/default.aspx>

[3] - Meteoprog.com.pt Arquivo do tempo real em Sines - <http://www.meteoprog.com.pt/pt/fwarchive/Sines/>

Concrete Society Technical Report N.º.22. Third edition (1992) Non-structural cracks in concrete.

Magne Maage, Steinar Helland, Jan Erik Carlsen Selmer AS (1995) Practical non-steady state chloride transport as a part of a model for predicting the initiation period. Proceeding of the International RILEM Workshop: Chloride Penetration into Concrete. France. Edited by L.O. Nilsson, J.P. Ollivier.

Monteiro A, Gonçalves A (2011) Assessment of concrete cover in structures. Part 1 – Statistical tolerance analysis approach, fib CEB-FIP Workshop: Performance-based Specifications for Concrete, Leipzig, Alemanha, pp14-16.

RILEM TC 154-EMC: Electrochemical techniques for measuring metallic corrosion. Materials and Structures, Vol. 33, December 2000, pp 603-611.

REFERÊNCIAS NORMATIVAS

fib bulletin 34 (2006) Model code for service life design, fib secretariat, Lausanne, 110 pp.

NP EN 13670 (2011) Execução de estruturas de betão.

EN 13791: 2007 - Assessment of in-situ compressive strength in structures and precast concrete components.

prEN 14630: 2006 - Products and systems for the protection and repair of concrete structures – Test methods – Determination of carbonation depth in hardened concrete by the phenolphthalein method.

NP EN 206-1: 2004 - Betão. Parte 1: Especificação, Desempenho, Produção e Conformidade.

NP EN 196-2: 2006 - Métodos de ensaio de cimentos. Parte 2: Análise química dos cimentos.

NP EN 12504-1: 2009 - Ensaio do betão nas estruturas. Parte 1: Carotes. Extracção, exame e ensaio à compressão.

LNEC E 463: 2004 - Betões. Coeficiente de difusão dos cloretos. Método de migração em regime não estacionário

LNEC E 464: 2007 - Betões. Metodologia prescritiva para uma vida útil de projecto de 50 e de 100 anos face às acções ambientais.

BS EN 12504-1: 2009 – Testing concrete in structures. Part 1: Cored specimens – Taking, examining and testing in compression.

ISO/WD 16204 (2010) Durability – Service life Design of concrete structures.

A realização dos ensaios físicos ao betão esteve a cargo dos técnicos Vítor Fialho e Gil Rosa. As análises químicas estiveram a cargo da técnica Margarida Miranda. O desenho gráfico esteve a cargo do bolseiro de investigação João Feiteira.

Lisboa, em Novembro de 2011

VISTOS

O Chefe do Núcleo de Betões



António Bettencourt Ribeiro
Investigador Principal

O Director do Departamento Materiais

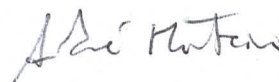


Arlindo Gonçalves
Investigador Coordenador

AUTORIA



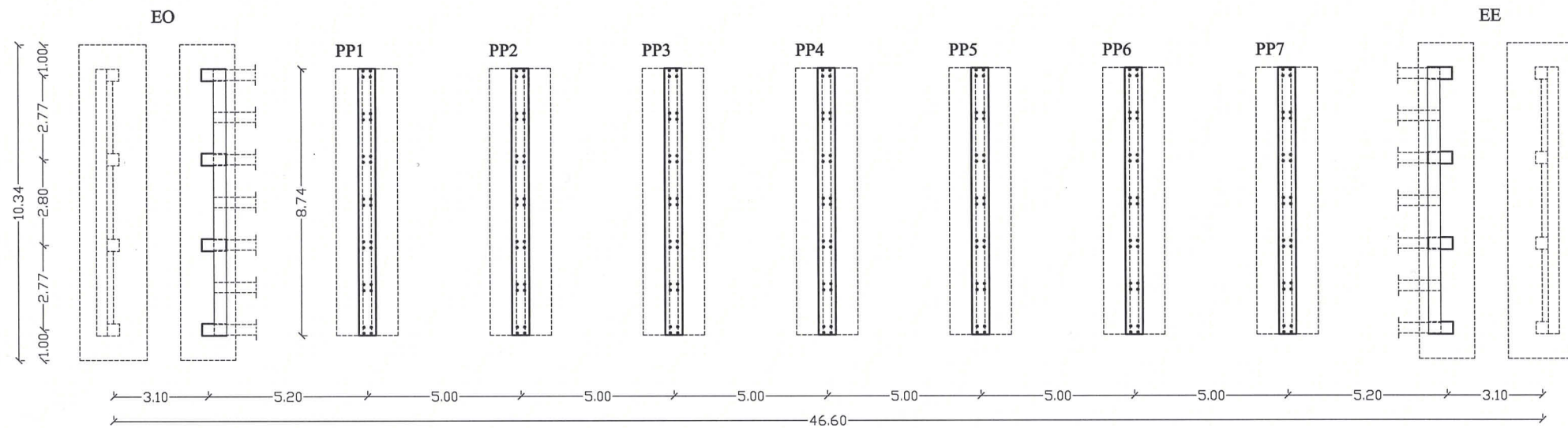
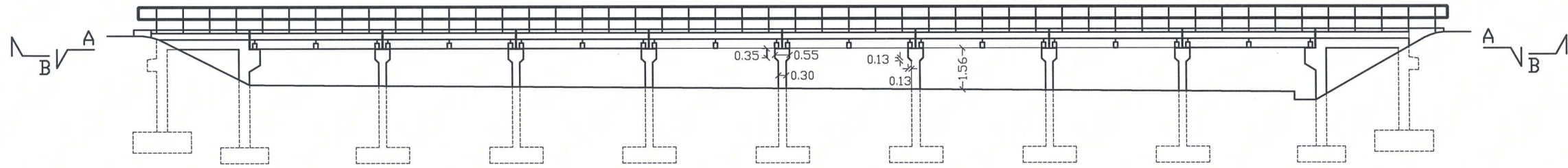
Maria Sofia Ribeiro
Investigadora Auxiliar



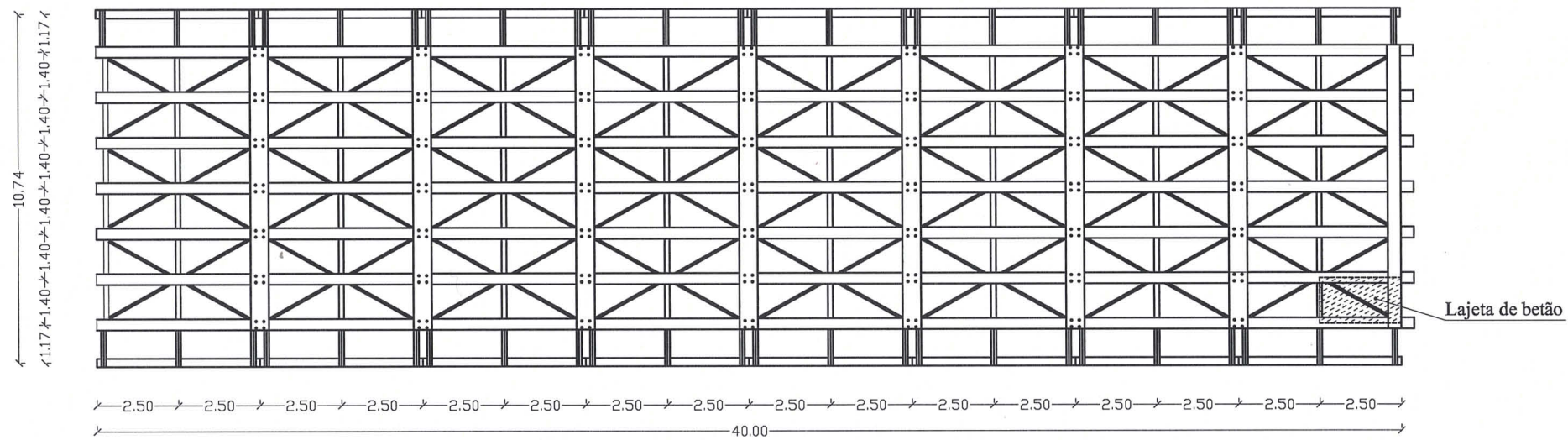
André Monteiro
Bolsheiro de Doutoramento

ANEXO I


PEÇAS DESENHADAS – PLANTA E CORTES



Corte A-A



Corte B-B

 MINISTÉRIO DAS OBRAS PÚBLICAS, TRANSPORTES E COMUNICAÇÕES LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL		
Cliente: REPSOL POLÍMEROS, LDA Zona: PORTO DE SINES	Título do Estudo: Avaliação da Degradação do Betão Armado dos Viadutos entre os Postos de Acostagem 4/5 e 9/10	
Escala: 1/200 Outubro/11	Planta geral e cortes	Proc. 0202/01/18374 Des. N.º 1

ANEXO II

REGISTO FOTOGRÁFICO – LEVANTAMENTO
E REGISTO DAS OBSERVAÇÕES
EFFECTUADAS

VIADUTO ENTRE O POSTO DE ACOSTAGEM 9/10 - ENCONTRO OESTE



Fig. A.1: Pilar norte, face norte



Fig. A.2: Face oeste da viga de travamento

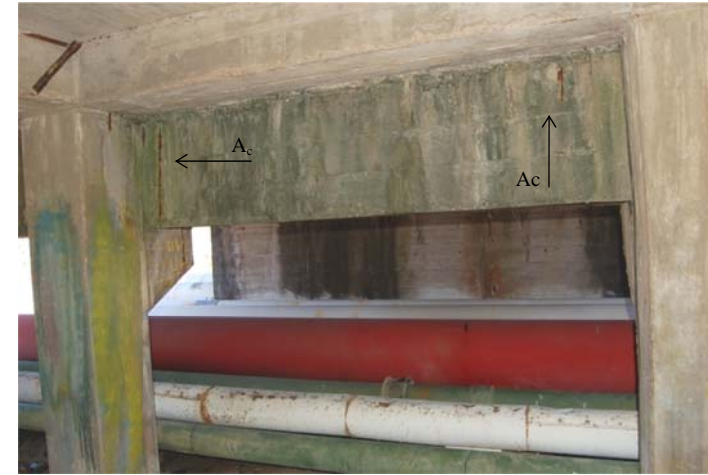


Fig. A.3: Face oeste da viga de travamento



Fig. A.4: Pilar sul, face oeste



Fig. A.5: Pilar sul, faces oeste e norte: armadura corroída exposta



Fig. A.6: Remoção do betão de recobrimento delaminado na face oeste



Fig. A.7: Pormenor da redução de secção das armaduras

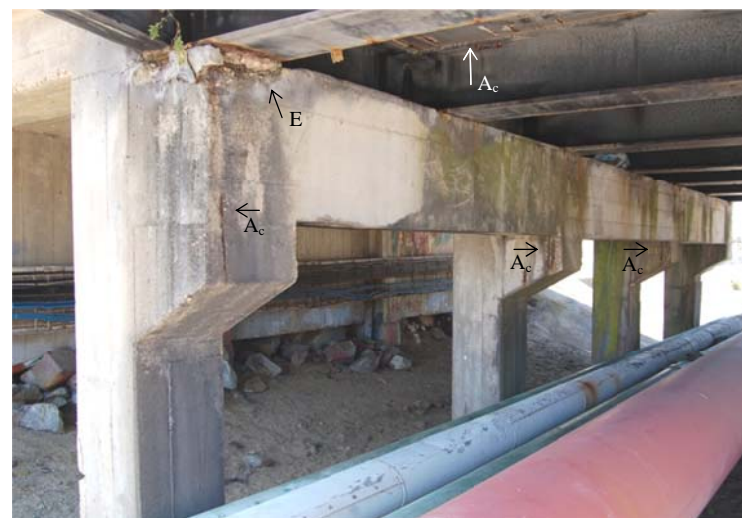


Fig. A.8: Pilar sul, face este da viga de travamento dos pórticos



Fig. A.9: Pilar norte, face este da viga de travamento

Esmagamento do betão de recobrimento na zona de contacto com a estrutura metálica (E); Armadura exposta corroída (Ac)

PILAR PAREDE 1

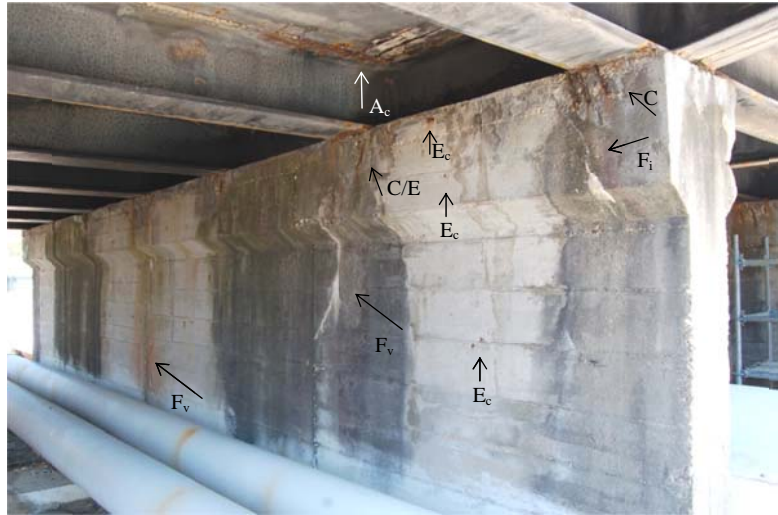


Fig. A.10: Faces sul e oeste



Fig. A.11: Faces sul e este



Fig. A.12: Faces norte e oeste



Fig. A.13: Faces norte e este



Fig. A.14: Extremidade norte da face este

PILAR PAREDE 2



Fig. A.15: Faces norte e oeste



Fig. A.16: Face oeste



Fig. A.17: Extremidade sul da face oeste



Fig. A.18: Extremidade sul da face oeste

Fissura inclinada no cachorro (F_i); Corte e/ou esmagamento do betão de recobrimento na zona de contacto com o tabuleiro (C/E); Fissura vertical (F_v); Armadura corroída exposta na face inferior da laje do tabuleiro (A_c); Extremidade do espaçador corroída exposta (E_c)



Fig. A.19: Faces sul e este



Fig. A.20: Face este: existência de reparação prévia degradada



Fig. A.21: Extremidade norte da face este



Fig. A.22: Faces norte e este

PILAR PAREDE 3



Fig. A.23: Faces norte e oeste



Fig. A.24: Face oeste



Fig. A.25: Faces sul e este



Fig. A.26: Extremidade norte da face este

PILAR PAREDE 4



Fig. A.27: Faces norte e oeste



Fig. A.28: Extremidade sul da face oeste



Fig. A.29: Faces sul e oeste



Fig. A.30: Faces sul e este

Fissura inclinada no cachorro (Fi); Corte e/ou esmagamento do betão de recobrimento na zona de contacto com o tabuleiro (C/E); Fissura vertical (Fv); Armadura corroída exposta (Ac); Extremidade do espaçador corroída exposta (Ec)

PILAR PAREDE 5



Fig. A.31: Faces norte e oeste



Fig. A.32: Extremidade sul da face oeste



Fig. A.33: Faces sul e este



Fig. A.34: Extremidade norte da face este

PILAR PAREDE 6



Fig. A.35: Faces norte e oeste



Fig. A.36: Face oeste



Fig. A.37: Face oeste



Fig. A.38: Faces oeste e sul



Fig. A.39: Faces sul e este

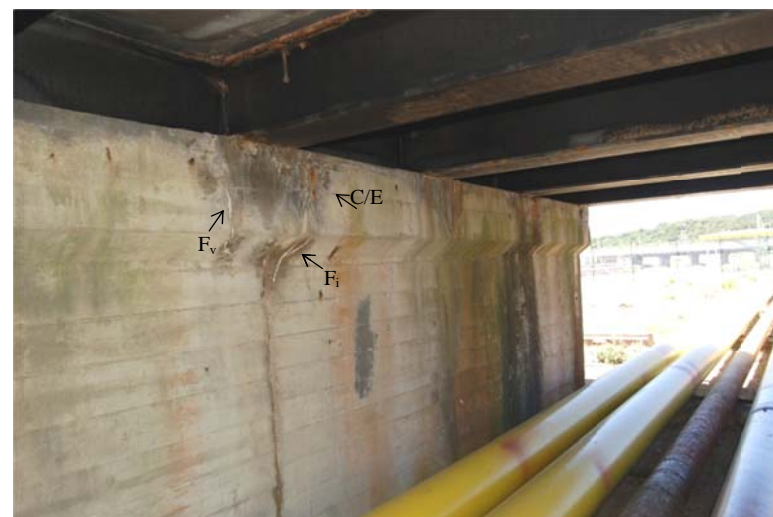


Fig. A.40: Extremidade da face este



Fig. A.41: Faces norte e este

Fissura inclinada no cachorro (F_i); Corte e/ou esmagamento do betão de recobrimento na zona de contacto com o tabuleiro (C/E); Fissura vertical (F_v); Armadura corroída exposta (A_e); Extremidade do espaçador corroída exposta (E_e)

PILAR PAREDE 7



Fig. A.42: Faces norte e oeste



Fig. A.43: Extremidade sul da face oeste



Fig. A.44: Extremidade sul da face oeste



Fig. A.45: Faces sul e este



Fig. A.46: Extremidade norte da face este



Fig. A.47: Faces norte e este

ENCONTRO ESTE



Fig. A.48: Pilar norte e face oeste da viga de travamento



Fig. A.49: Face oeste da viga de travamento



Fig. A.50: Face este da viga de travamento



Fig. A.51: Pilar sul, face sul

Fissura inclinada no cachorro (F_i); Corte e ou esmagamento do betão de recobrimento na zona de contacto com o tabuleiro (C/E); Fissura vertical (F_v); Armadura corroída exposta (A_c); Extremidade do espaçador corroída exposta (E_c)

VIADUTO ENTRE O POSTO DE ACOSTAGEM 4/5 - ENCONTRO ESTE



Fig. A.52: Pilar sul face sul



Fig. A.53: Pilar sul, face este



Fig. A.54: Face oeste da viga de travamento e pilar sul



Fig. A.55: Pilar norte e face norte

PILAR PAREDE 7



Fig. A.56: Faces norte e este



Fig. A.57: Faces norte e este



Fig. A.58: Face sul e oeste



Fig. A.59: Faces sul e oeste

PILAR PAREDE 6



Fig. A.60: Faces norte e oeste



Fig. A.61: Faces sul e oeste

Fissura inclinada no cachorro (F_i); Corte e/ou esmagamento do betão de recobrimento na zona de contacto com o tabuleiro (C/E); Fissura vertical (F_v); Armadura corroída exposta (A_c); Extremidade do espaçador corroída exposta (E_c)

PILAR PAREDE 5

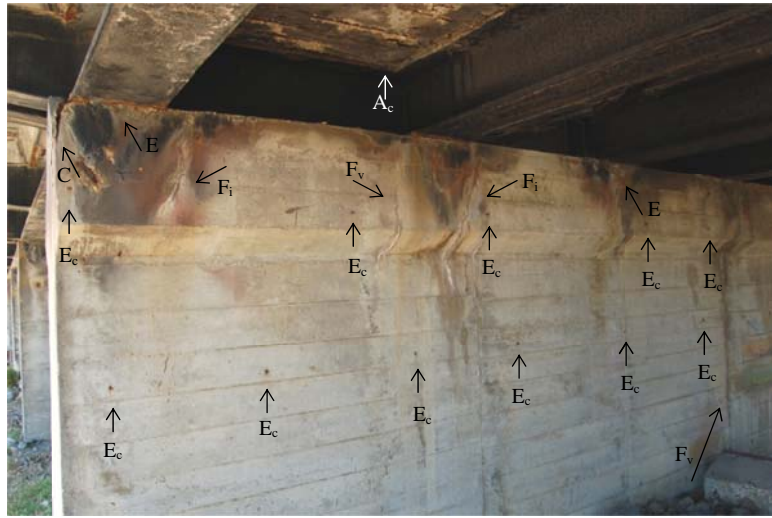


Fig. A.62: Faces sul e este



Fig. A.63: Face este



Fig. A.64: Face este



Fig. A.65: Faces norte e oeste



Fig. A.66: Face oeste: após remoção do betão delaminado



Fig. A.67: Faces sul e oeste



Fig. A.68: Faces sul e oeste

PILAR PAREDE 4



Fig. A.69: Faces norte e oeste



Fig. A.70: Face oeste



Fig. A.71: Extremidade sul da face oeste



Fig. A.72: Faces sul e oeste

Fissura inclinada no cachorro (F_i); Corte e/ou esmagamento do betão de recobrimento na zona de contacto com o tabuleiro (C/E); Fissura vertical (F_v); Armadura corroída exposta (A_c); Extremidade do espaçador corroída exposta (E)

PILAR PAREDE 3



Fig. A.73: Face este



Fig. A.74: Face oeste



Fig. A.75: Extremidade sul da face oeste



Fig. A.76: Faces sul e oeste

PILAR PAREDE 2



Fig. A.77: Face norte



Fig. A.78: Extremidade norte da face este



Fig. A.79: Faces sul e este

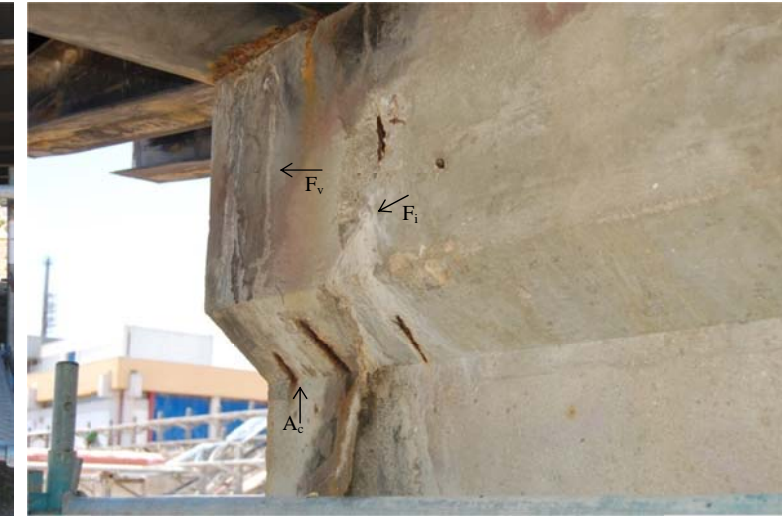


Fig. A.80: Extremidade sul da face este



Fig. A.81: Faces sul e oeste



Fig. A.82: Faces sul e oeste



Fig. A.83: Face oeste

Fissura inclinada no cachorro (Fi); Corte e/ou esmagamento do betão de recobrimento na zona de contacto com o tabuleiro (C/E); Fissura vertical (Fv); Armadura corroida exposta (Ac); Extremidade do espaçador corroida exposta (E)

PILAR PAREDE 1



Fig. A.84: Faces norte e este



Fig. A.85: Faces norte e este



Fig. A.86: Faces norte e oeste



Fig. A.87: Faces sul e este



Fig. A.88: Faces sul e oeste

ENCONTRO OESTE



Fig. A.89: Pilar sul e face este



Fig. A.90: Pilar parede junto ao terreno

Fissura inclinada no cachorro (F_i); Corte e/ou esmagamento do betão de recobrimento na zona de contacto com o tabuleiro (C/E); Fissura vertical (F_v); Armadura corroída exposta (A_c); Extremidade do espaçador corroída exposta (E_c)

ANEXO III

RESULTADOS DOS ENSAIOS

1º Pilar a Sul do Encontro Oeste - Leituras do recobrimento das armaduras medidas na estrutura

	Face sul	Face norte	Face Este	Face Oeste
1		15-30		
2	50	19-20	60	23
3		25	50	

Valores médios do recobrimento

Face sul	Face norte	Face Oeste	Face Este	P1 EO
	23			23
50	20	60	23	38
50	25	50	55	23

2º Pilar a Sul do Encontro Oeste - Leituras do recobrimento das armaduras medidas na estrutura

	Face sul	Face norte	Face Este	Face Oeste
1	45	21-28		
2	45	30-15	55-65	14
3	36-39	55-40-45	35-45	35

Valores médios do recobrimento

Face sul	Face norte	Face Oeste	Face Este	P2 EO
45	25			35
45	23	60	14	38
38	42	47	35	40
		40	50	35

1º Pilar Parede (PP1) Leituras do recobrimento das armaduras medidas na estrutura

	Face sul	Face norte	Face Oeste		Face Este				
			Zona sul	Meio vão	Zona norte	Topo sul	Meio vão	Topo norte	
1			35-23-32-33-36-35-37						
2			39-30-45-46-46-49-49-43-46-42						
3			53-47-47						

Valores médios do recobrimento

Face sul	Face norte	Face Oeste	Face Este	PP1
		33		33
		44	46	46
		49		

2º Pilar Parede (PP2) - Leituras do recobrimento das armaduras medidas na estrutura

	Face sul	Face norte	Face Oeste		Face Este			
			Zona sul	Meio vão	Zona norte	Topo sul	Meio vão	Topo norte
1					8			
2			27-14-39-49-57	22-43-42-50-34-47-53-58	25-24-27-28-30-24-18-27-34			
3	60		65-62	60	30-30-42-48			

Valores médios do recobrimento

Face sul	Face norte	Face Oeste	Face Este	PP2
		8		8
	60	35	42	51
60		50		

3º Pilar Parede (PP3) - Leituras do recobrimento das armaduras medidas na estrutura e em carotes

	Face sul	Face norte	Face Oeste		Face Este			
			Zona sul	Meio vão	Zona norte	Topo sul	Meio vão	Topo norte
1		37-40		40	40-36-35			
2	20	40	65-45-40-71-75	42-42	38-38	68-84		
3		40	29-35	44-37-30	40-25-42			

Valores médios do recobrimento

Face sul	Face norte	Face Oeste	Face Este	PP3
		39		39
20	20	40	40	51
		40	43	76
		35		45



carotes 2A e 5A



Quadro AIII.1: Espessura do recobrimento do viaduto entre o posto de acostagem 9/10. Viaduto mais a sul

Avaliação da Degradação do Betão Armado dos Viadutos entre os Postos de Acostagem 4/5 e 9/10 da APS
ANEXO III

4º Pilar Parede (PP4) - Leituras do recobrimento das armaduras medidas na estrutura								Valores médios do recobrimento				
	Face sul	Face norte	Face Oeste			Face Este		Face sul	Face norte	Face Oeste	Face Este	PP4
			Zona sul	Meio vão	Zona norte	Topo sul	Meio vão					
1												
2	10-55			30-35	20-30		33	41	29	32		36
3	35-60			40	30		48		35			

5º Pilar Parede - (PP5) Leituras do recobrimento das armaduras medidas na estrutura								Valores médios do recobrimento				
	Face sul	Face norte	Face Oeste			Face Este		Face sul	Face norte	Face Oeste	Face Este	PP5
			Zona sul	Meio vão	Zona norte	Topo sul	Meio vão					
1				41-50					46			46
2	54-60		14-12-10	50			57	53	22	33		43
3	55-40		22-20	64-65			48		43			

6º Pilar Parede - (PP6) Leituras do recobrimento das armaduras medidas na estrutura								Valores médios do recobrimento				
	Face sul	Face norte	Face Oeste			Face Este		Face sul	Face norte	Face Oeste	Face Este	PP6
			Zona sul	Meio vão	Zona norte	Topo sul	Meio vão					
1												
2				23-27-30-34	30-37					30	36	36
3				36-38-44	44-42					41		

7º Pilar Parede - (PP7) Leituras do recobrimento das armaduras medidas na estrutura								Valores médios do recobrimento				
	Face sul	Face norte	Face Oeste			Face Este		Face sul	Face norte	Face Oeste	Face Este	PP7
			Zona sul	Meio vão	Zona norte	Topo sul	Meio vão					
1												
2	64-70	55-32-43	20-22-22		34-47-48		67	68	43	46	41	52
3	68-70	50-45-44-55	36-40		53-53-57-57		69		49	49		

1º Pilar a Sul do Encontro Este - Leituras do recobrimento das armaduras medidas na estrutura				Valores médios do recobrimento									
	Face sul	Face norte	Face Este	Face Oeste	Face sul	Face norte	Face Oeste	Face Este	P1 EE				
										1	39-34-25		
2	20-20-18	35-27-25	30-35-31-36	44-43-44	19	19	29	25	33	36	44	43	31
3	18-20	20-20	38-40-40	44-40	19		20		39		42		

2º Pilar a Sul do Encontro Oeste - Leituras do recobrimento das armaduras medidas na estrutura				Valores médios do recobrimento								
	Face sul	Face norte	Face Este	Face Oeste	Face sul	Face norte	Face Oeste	Face Este	P1 EE			
										1	35-40-45	
2	30-27-27-20-16	45-29-30-30-27		25-35-22-31-36	24	24	32	32		30	34	30
3				39-40-30-42						38		

Quadro AIII.2: Espessura do recobrimento do viaduto entre o posto de acostagem 9/10. Viaduto mais a sul (Continuação)

1º Pilar a Sul do Encontro Oeste - Leituras do recobrimento das armaduras medidas na					Valores médios do recobrimento				
	Face sul	Face norte	Face Este	Face Oeste	Face sul	Face norte	Face Oeste	Face Este	PP1 EO
1	16	50	15		16	50	15		27
2	20	40-33-40	23-24	18-20-23	20	38	24	20	25
3	15	40-40-36	23-23		15	39	23	20	

2º Pilar a Sul do Encontro Oeste - Leituras do recobrimento das armaduras medidas na estrutura					Valores médios do recobrimento				
	Face sul	Face norte	Face Este	Face Oeste	Face sul	Face norte	Face Oeste	Face Este	PP2 EO
1									
2	36-34-34-35		14-15-21-20-21	28-36-36	35		18	33	31
3	39-35-39		26	34-34	38		26	34	

1º Pilar Parede - (PP1) Leituras do recobrimento das armaduras medidas na estrutura								Valores médios do recobrimento				
	Face sul	Face norte	Face Oeste			Face Este		Face sul	Face norte	Face Oeste	Face Este	PP1
			Zona sul	Meio vão	Zona norte	Topo sul	Meio vão					
1												
2	25-7-7		48-50	36-42-41	10-11-18					32		25
3	7-23-15-36		50-17	45	30-27-25				32	32		

2º Pilar Parede (PP2) - Leituras do recobrimento das armaduras medidas na estrutura								Valores médios do recobrimento				
	Face sul	Face norte	Face Oeste			Face Este		Face sul	Face norte	Face Oeste	Face Este	PP2
			Zona sul	Meio vão	Zona norte	Topo sul	Meio vão					
1												
2	43-40	27-30										43
3	70	32-30-30						42	29	30		

3º Pilar Parede (PP3) - Leituras do recobrimento das armaduras medidas na estrutura e								Valores médios do recobrimento				
	Face sul	Face norte	Face Oeste			Face Este		Face sul	Face norte	Face Oeste	Face Este	PP3
			Zona sul	Meio vão	Zona norte	Topo sul	Meio vão					
1												
2	48	45-23-58				64-70	55	45-23-58	48	53	57	55
3	57	70				68-62	55-55-55	70	57	61		

4º Pilar Parede (PP4) - Leituras do recobrimento das armaduras medidas na estrutura								Valores médios do recobrimento					
	Face sul	Face norte	Face Oeste			Face Este		Face sul	Face norte	Face Oeste	Face Este	PP4	
			Zona sul	Meio vão	Zona norte	Topo sul	Meio vão						Topo norte
1	60											60	
2	66-62	50	33-48	55-58-62	40-32	42-35		48-48	64	50	38	43	51
3	62-50	62-62-62-53	57-68	70	28-28-42-40	42-40		47-47	56	60	48	44	

5º Pilar Parede - (PP5) Leituras do recobrimento das armaduras medidas na estrutura								Valores médios do recobrimento					
	Face sul	Face norte	Face Oeste			Face Este		Face sul	Face norte	Face Oeste	Face Este	PP5	
			Zona sul	Meio vão	Zona norte	Topo sul	Meio vão						Topo norte
1													
2				40-42-37	24-31								37
3				44-50	30-28								

Quadro AIII.3: Espessura do recobrimento do viaduto entre o posto de acostagem 4/5. Viaduto norte

6º Pilar Parede -(PP6) Leituras do recobrimento das armaduras medidas na estrutura

	Face sul	Face norte	Face Oeste			Face Este		
			Zona sul	Meio vão	Zona norte	Topo sul	Meio vão	Topo norte
1	69-58-70	67-82-39	19-39	29-11	39-21-17	34-55-2	30-48-12	42-30
2	44-46-49	49-61	17-51-58	41-46-46	39-39-38-39	72-76-82	69-67-72	41-41
3	56-76-53-57	67-65-37	62-63	49-47	39-32-33	76-79-79	70-72-70	47-45-34-33

Valores médios do recobrimento

Face sul	Face norte	Face Oeste	Face Este	PP6
66	63	25	32	47
46	54	55	41	65
61	56	46	61	54

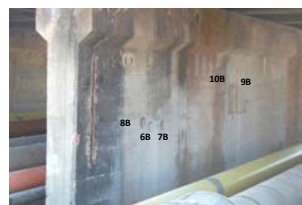
7º Pilar Parede -(PP7) Leituras do recobrimento das armaduras medidas na estrutura e em carotes

	Face sul	Face norte	Face Oeste			Face Este		
			Zona sul	Meio vão	Zona norte	Topo sul	Meio vão	Topo norte
1	34-39	79-54	42-39	22-29-12	39-11	32-15-17	40-37-20	29-27
2	60-64	39-54	22-40-105* 60-90	41-46	34-45	45-43-128* 64	20-47-	50-49
3	53-63-57	79-70-69	43-42	46-49	41-46	42	44-49	48-49

Valores médios do recobrimento

Face sul	Face norte	Face Oeste	Face Este	PP7
37	67	28	27	40
62	60	47	45	53
58	73	45	46	53

* - Nível de armaduras mais interior



1º Pilar a Sul do Encontro Este - Leituras do recobrimento das armaduras medidas na estrutura

	Face sul	Face norte	Face Este	Face Oeste
1	11-43-34-29	47-52-41-33		28-21-22
2	28-38-36	33-32	27-38-26	26-27-27
3	38-37-38-48	27-28-30	27-22-17	30-32-38

Valores médios do recobrimento

Face sul	Face norte	Face Oeste	Face Este	P1 EF
29	43		24	32
34	37	33	27	31
40	28	22	33	31

2º Pilar a Sul do Encontro Oeste - Leituras do recobrimento das armaduras medidas na estrutura

	Face sul	Face norte	Face Este	Face Oeste
1	16-22-13-12-16	70-49-41-42		21-23-16-15-11
2	27	33	51-46-48-43	11-11-11
3	30-33-36-37	39-27-26-30-28-37	41-48	11-12-13

Valores médios do recobrimento

Face sul	Face norte	Face Oeste	Face Este	P2 EF
16	51		17	28
27	31	47	11	30
34	31	45	12	30

Parede Muro- Fim do encontro

	1	P1	2	P2	3	P3	4	P4	5
1	37-28-16	26-25-26	36-34-34	19-47-47	31-29-30	44-44-46	32-34-33	28-27-28	43-21-29
2	42-47-31	38-37	20-26-33	46-25-45	29-28-31	47-48-48	32-27-28	24-27-30	33-48-41
3	40-40	29-42	25-30	46-27-26	30-28-19	48-39-31	34-33-34-33	30-31-33	59-60

Valores médios do recobrimento

Faces	Pilares	
31	34	33
33	35	36
36	35	36

Quadro AIII. 4: Espessura do recobrimento do viaduto entre o posto de acostagem 4/5. Viaduto norte (Continuação)

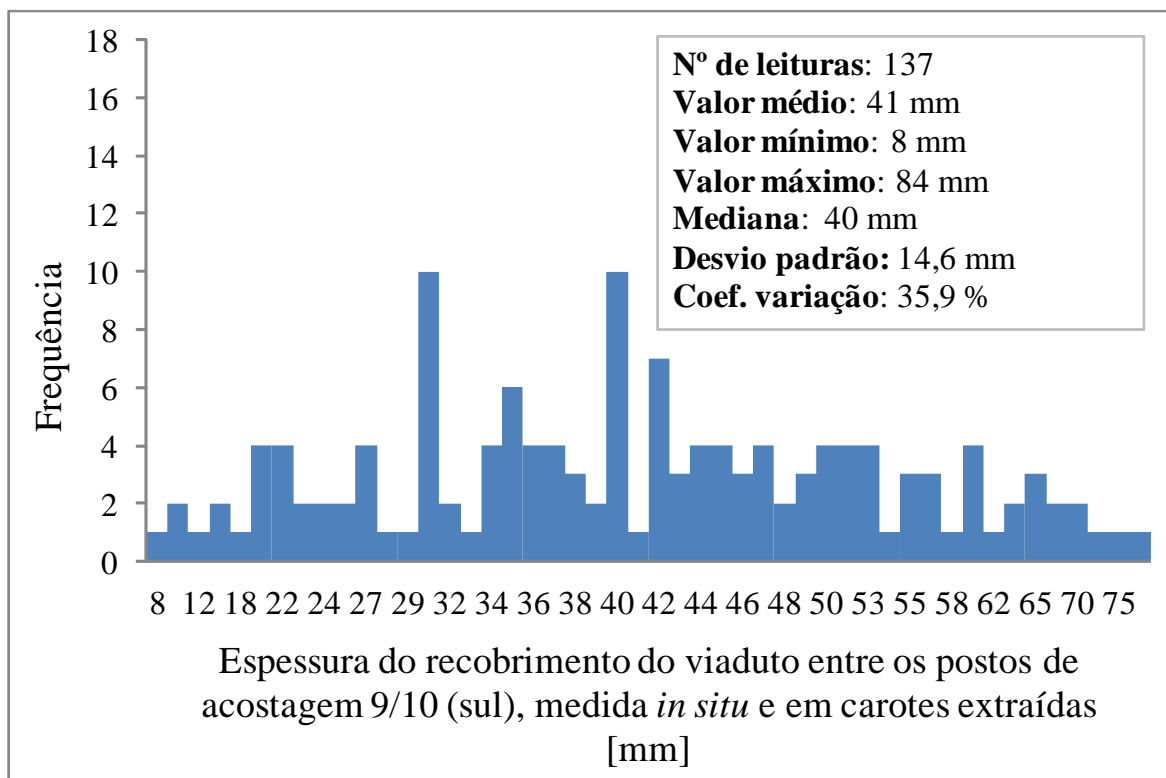


Figura AIII.1: Histograma dos resultados da espessura de recobrimentos do viaduto entre os postos de acostagem 9/10 (mais a sul)

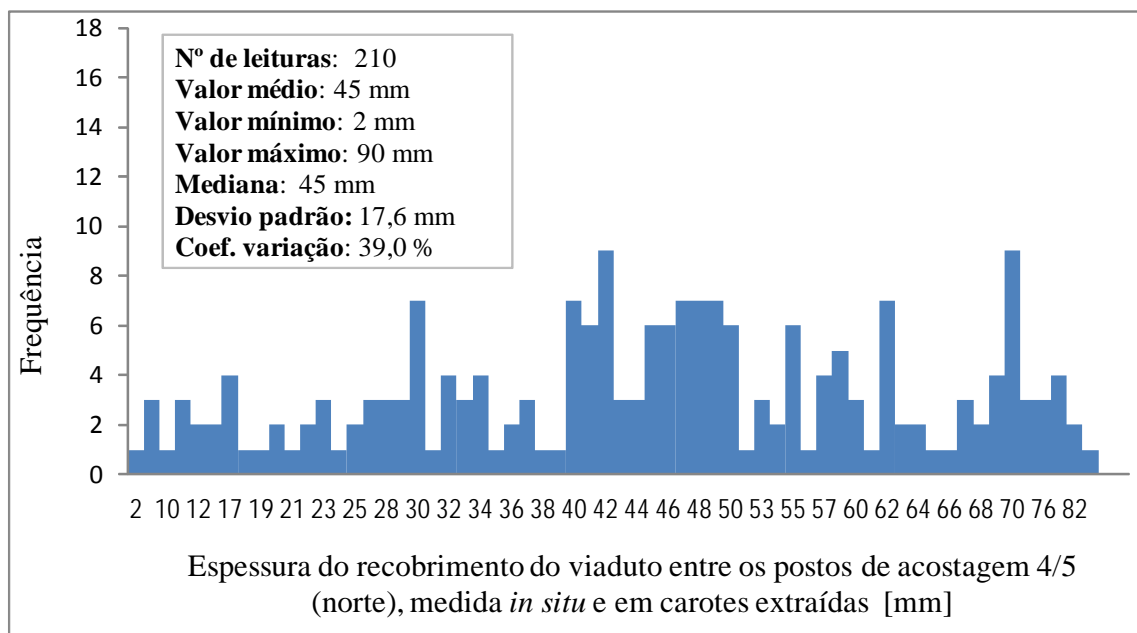


Figura AIII.2: Histograma dos resultados da espessura de recobrimentos do viaduto entre os postos de acostagem 4/5

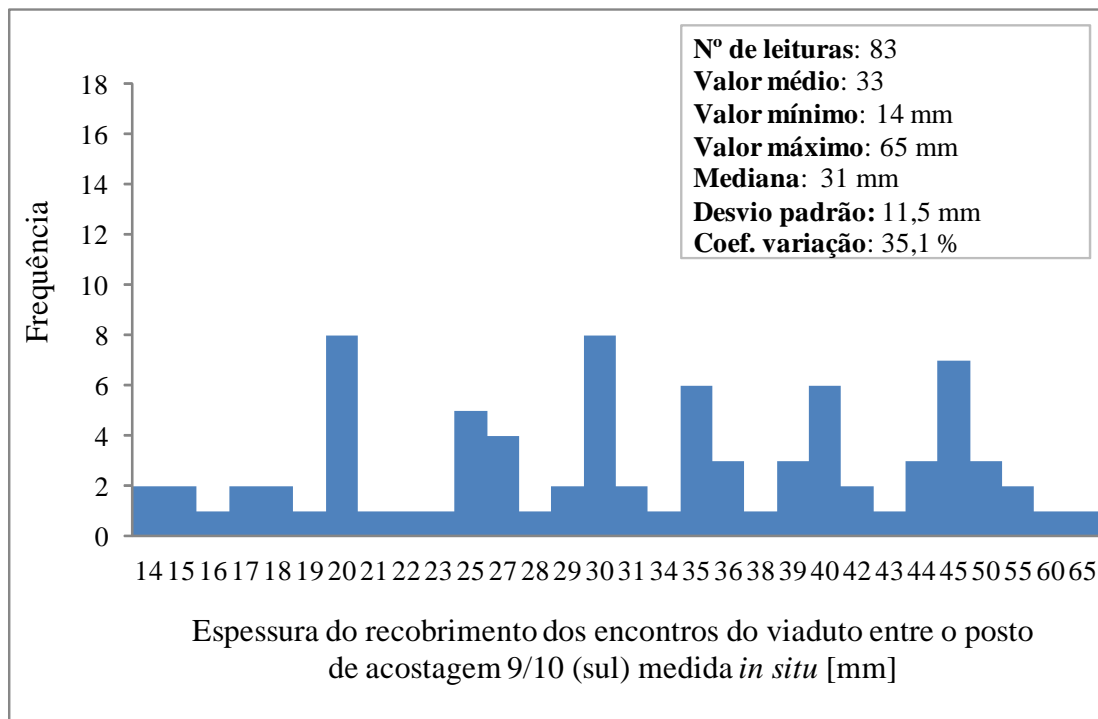


Figura AIII.3: Histograma dos resultados da espessura de recobrimentos dos encontros do viaduto entre os postos de acostagem 9/10

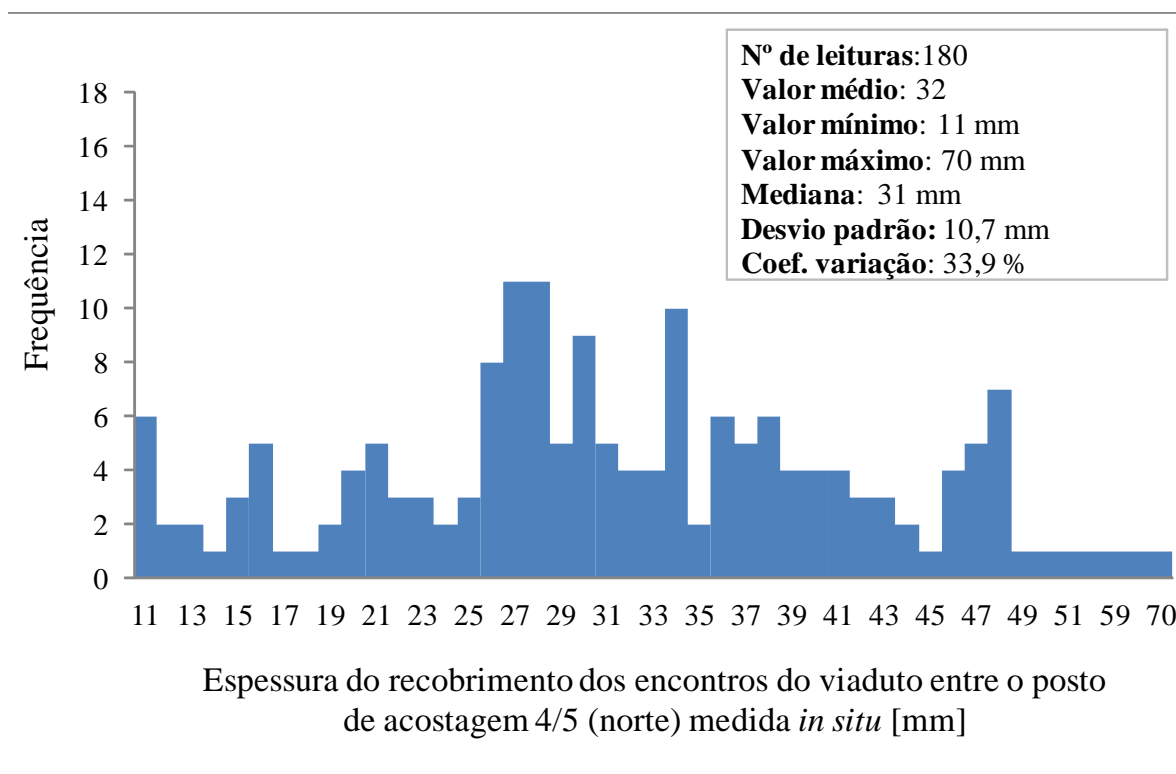


Figura AIII.4: Histograma dos resultados da espessura de recobrimentos dos encontros do viaduto entre os postos de acostagem 4/5

Identificação do provete	Data Ensaio	Dimensões do provete (mm)		Profundidade de carbonatação (mm)		
		Diâmetro	Altura	$d_{k,min}$	$d_{k,max}$	$d_{k,méd} (n=5)$
2A	2011-06-27	92	112	0	5	1,8
2B	2011-06-27	92	113	4	17 ¹	9,2
3A	2011-06-27	92	145	6	14	9,4
3B	2011-06-27	92	57	0	12	3,2
4A	2011-06-27	92	107	0	7	2,0
4B	2011-06-27	92	70	1	20	8,0
5A	2011-06-27	92	107	0	9	2,2
5B	2011-06-27	92	120	3	10	5,4
6A	2011-06-27	92	110	0	17	7,4
6B	2011-06-27	92	106	2	12	4,8
7A	2011-06-27	92	111	0	20	9,2
7B	2011-06-27	92	103	4	26 ¹	10,6
9A	2011-06-27	92	78	0	10	5,4
9B	2011-06-27	92	94	3	22	10,8
10A	2011-06-27	92	69	0	6	1,6
10B	2011-06-27	92	80	1	5	2,4

1 – Presença de um agregado

Quadro AIII.5: Resultados da profundidade de carbonatação em carotes extraídas dos pilares parede dos viadutos

Método de carotagem	Profundidade da amostra (mm)	Teor de cloretos, Cl ⁻ (% em massa do betão)	Localização da colheita da amostra
2A.1	0-10	0,13	Viaduto Sul (9/10) Face oeste do PP3 Zona inferior (3) Carote 2
2A.2	12-22	0,03	
2A.3	24-30	0,02	
2A.4	32-52	0,02	
Método de carotagem	Profundidade da amostra (mm)	Teor de cloretos, Cl ⁻ (% em massa do betão)	Localização da colheita da amostra
2B.1	0-10	0,13	Viaduto Sul (9/10) Face este do PP3 Zona inferior (3) Carote 2
2B.2	12-22	0,04	
2B.3	24-30	0,02	
2B.4	32-52	0,02	

Quadro AIII.6: Resultados obtidos na determinação do teor de cloretos em amostras (fatias) das carotes extraídas *in situ* a partir de carotes extraídas

Método de carotagem	Profundidade da amostra (mm)	Teor de cloretos, Cl ⁻ (% em massa do betão)	Localização da colheita da amostra
3A.1	0-10	0,16	Viaduto Sul (9/10) Face oeste do PP3 Zona superior (2) carote 3
3A.2	12-22	0,12	
3A.3	24-30	0,02	
3A.4	32-52	0,03	
Método de carotagem	Profundidade da amostra (mm)	Teor de cloretos, Cl ⁻ (% em massa do betão)	Localização da colheita da amostra
3B.1	0-10	0,08	Viaduto Sul (9/10) Face este do PP3 Zona superior (2) carote 3
3B.2	12-22	0,04	
3B.3	24-30	0,02	
3B.4	32-52	0,02	
Método de carotagem	Profundidade da amostra (mm)	Teor de cloretos, Cl ⁻ (% em massa do betão)	Localização da colheita da amostra
4A.1	0-10	0,07	Viaduto Sul (9/10) Face oeste do PP3 Zona superior (2) carote 4
4A.2	12-22	0,04	
4A.3	24-30	0,02	
4A.4	32-52	0,02	
Método de carotagem	Profundidade da amostra (mm)	Teor de cloretos, Cl ⁻ (% em massa do betão)	Localização da colheita da amostra
4B.1	0-10	0,04	Viaduto Sul (9/10) Face este do PP3 Zona superior (2) carote 4
4B.2	12-22	0,03	
4B.3	24-30	0,02	
4B.4	32-52	0,02	
Método de carotagem	Profundidade da amostra (mm)	Teor de cloretos, Cl ⁻ (% em massa do betão)	Localização da colheita da amostra
5A.1	0-10	0,12	Viaduto Sul (9/10) Face oeste do PP3 Zona inferior (3) carote 5
5A.2	12-22	0,04	
5A.3	24-30	0,03	
5A.4	32-52	0,03	

Quadro AIII.7: Resultados obtidos na determinação do teor de cloretos em amostras (fatias) das carotes extraídas *in situ* a partir de carotes extraídas (Continuação)

Método de carotagem	Profundidade da amostra (mm)	Teor de cloretos, Cl ⁻ (% em massa do betão)	Localização da colheita da amostra
5B.1	0-10	5	Viaduto Sul (9/10)
5B.2	12-22	17	Face este do PP3
5B.3	24-30	27	Zona inferior (3)
5B.4	32-52	42	carote 5
Método de carotagem	Profundidade da amostra (mm)	Teor de cloretos, Cl ⁻ (% em massa do betão)	Localização da colheita da amostra
6A.1	0-10	0,12	Viaduto Norte
6A.2	12-22	0,04	Face oeste do PP7
6A.3	24-29	0,03	Zona inferior (3)
6A.4	31-51	0,02	carote 6
Método de carotagem	Profundidade da amostra (mm)	Teor de cloretos, Cl ⁻ (% em massa do betão)	Localização da colheita da amostra
6B.1	0-10	0,05	Viaduto Norte
6B.2	12-22	0,04	Face este do PP7
6B.3	24-29	0,02	Zona inferior (3)
6B.4	31-51	0,02	carote 6
Método de carotagem	Profundidade da amostra (mm)	Teor de cloretos, Cl ⁻ (% em massa do betão)	Localização da colheita da amostra
7A.1	0-10	0,11	Viaduto Norte
7A.2	12-22	0,04	Face oeste do PP7
7A.3	24-29	0,04	Zona inferior (3)
7A.4	31-51	0,01	carote 7
Método de carotagem	Profundidade da amostra (mm)	Teor de cloretos, Cl ⁻ (% em massa do betão)	Localização da colheita da amostra
7B.1	0-10	0,07	Viaduto Norte
7B.2	12-22	0,05	Face este do PP7
7B.3	24-29	0,03	Zona inferior (3)
7B.4	31-51	0,03	carote 7

Quadro AIII.8: Resultados obtidos na determinação do teor de cloretos em amostras (fatias) das carotes extraídas *in situ* a partir de carotes extraídas (Continuação)

Método de carotagem	Profundidade da amostra (mm)	Teor de cloretos, Cl ⁻ (% em massa do betão)	Localização da colheita da amostra
9A.1	0-10	0,17	Viaduto Norte Face oeste do PP7 Zona superior (2) carote 9
9A.2	12-22	0,09	
9A.3	24-34	0,04	
9A.4	36-56	0,02	
Método de carotagem	Profundidade da amostra (mm)	Teor de cloretos, Cl ⁻ (% em massa do betão)	Localização da colheita da amostra
9B.1	0-10	0,23	Viaduto Norte Face este do PP7 Zona superior (2) carote 9
9B.2	12-22	0,09	
9B.3	24-34	0,03	
9B.4	36-56	0,03	
Método de carotagem	Profundidade da amostra (mm)	Teor de cloretos, Cl ⁻ (% em massa do betão)	Localização da colheita da amostra
10A.1	0-10	0,15	Viaduto Norte Face oeste do PP7 Zona superior (2) carote 10
10A.2	12-22	0,04	
10A.3	24-34	0,04	
10A.4	36-56	0,01	
Método de carotagem	Profundidade da amostra (mm)	Teor de cloretos, Cl ⁻ (% em massa do betão)	Localização da colheita da amostra
10B.1	0-10	0,05	Viaduto Norte Face este do PP7 Zona superior (2) carote 10
10B.2	12-22	0,03	
10B.3	24-34	0,02	
10B.4	36-56	0,02	

Quadro AIII.9: Resultados obtidos na determinação do teor de cloretos em amostras (fatias) das carotes extraídas *in situ* a partir de carotes extraídas (Continuação)

Método de moagem	Profundidade da amostra (mm)	Teor de cloretos, Cl ⁻ (% em massa do betão)	Localização da colheita da amostra
PG1-1	0-10	0,30	Viaduto sul (9/10)
PG1-3	12-22	0,16	Face oeste do PP3
PG1-5	24-29,5	0,04	Zona superior (2)
Método de moagem	Profundidade da amostra (mm)	Teor de cloretos, Cl ⁻ (% em massa do betão)	Localização da colheita da amostra
PG2-1	0-10	0,12	Viaduto sul (9/10)
PG2-3	12-22	0,02	Face oeste do PP3
PG2-5	24-29,5	0,02	Zona inferior (3)
Método de moagem	Profundidade da amostra (mm)	Teor de cloretos, Cl ⁻ (% em massa do betão)	Localização da colheita da amostra
PG3-1	0-10	0,04	Viaduto sul (9/10)
PG3-3	12-22	0,02	Face Este do PP3
PG3-5	24- 27,5	0,02	Zona superior (2)
Método de moagem	Profundidade da amostra (mm)	Teor de cloretos, Cl ⁻ (% em massa do betão)	Localização da colheita da amostra
PG4-1	0-10	0,09	Viaduto sul (9/10)
PG4-3	12-22	0,04	Face este do PP3
PG4-5	24- 26,5	0,02	Zona inferior (3)
Método de moagem	Profundidade da amostra (mm)	Teor de cloretos, Cl ⁻ (% em massa do betão)	Localização da colheita da amostra
PG5-1	0-10	0,07	Viaduto norte (4/5)
PG5-3	12-22	0,04	Face oeste do PP7
PG5-5	24-27,5	0,04	Zona média
Método de moagem	Profundidade da amostra (mm)	Teor de cloretos, Cl ⁻ (% em massa do betão)	Localização da colheita da amostra
PG6-1	0-10	0,05	Viaduto norte (4/5)
PG6-3	12-22	0,04	Face este do PP7
PG6-5	24-26	0,02	Zona média

Quadro AIII.10: Resultados obtidos na determinação do teor de cloretos em amostras de pó de betão endurecido colhidas *in situ* por moagem

ANEXO IV

REGISTO FOTOGRÁFICO – CAROTES



Carote 1: Viaduto 1; Pilar Parede Nº3; ($\text{Ø} = 101 \text{ mm}$; comp. máx= 330 mm); Dimensão do agregado $> 1/3 \text{ Ø}$



Carote 2: Viaduto 1; Pilar Parede Nº3; ($\text{Ø} = 92 \text{ mm}$; comp. máx= 332 mm); Dimensão do agregado $> 1/3 \text{ Ø}$



Carote 3: Viaduto 1; Pilar Parede Nº3; ($\text{Ø} = 92 \text{ mm}$; comp. máx= 305 mm); Dimensão do agregado $> 1/3 \text{ Ø}$



Carote 4: Viaduto 1; Pilar Parede Nº3; ($\text{Ø} = 92 \text{ mm}$; comp. máx= 305 mm); Dimensão do agregado $> 1/3 \text{ Ø}$

Figura AIV.1: Aspecto geral das carotes 1 a 4



Carote 5: Viaduto 1; Pilar Parede N°3; ($\varnothing = 92$ mm; comp. máx= 331 mm); Dimensão do agregado $> 1/3 \varnothing$



Carote 6: Viaduto 2; Pilar Parede N°7; ($\varnothing = 92$ mm; comp. máx= 321 mm); Dimensão do agregado $> 1/3 \varnothing$



Carote 7: Viaduto 2; Pilar Parede N°7; ($\varnothing = 92$ mm; comp. máx= 321 mm); Dimensão do agregado $> 1/3 \varnothing$

Figura AIV.2: Aspecto geral das carotes 5 a 7



Carote 8: Viaduto 2; Pilar Parede N°7; ($\varnothing = 101$ mm; comp. máx= 94 mm); Dimensão do agregado $> 1/3 \varnothing$



Carote 9: Viaduto 2; Pilar Parede N°7; ($\varnothing = 92$ mm; comp. máx= 305 mm); Dimensão do agregado $> 1/3 \varnothing$



Carote 10: Viaduto 2; Pilar Parede N°7; ($\varnothing = 92$ mm; comp. máx= 303 mm); Dimensão do agregado $> 1/3 \varnothing$

Figura AIV.3: Aspecto geral das carotes 8 a 10



Carote 4: provetes 4B (face este), 4A (face oeste); carote 5: provetes 5B (face este), 5A (face oeste)



Carote 6: provetes 6B (face este), 6A (face oeste); carote 7: provetes 7B (face este), 7A (face oeste)

Figura AIV.4: Aspecto da frente de carbonatação do betão extraído dos viadutos



Carote 9: provetes 9B (face este), 9A (face oeste); carote 10: provetes 10B (face este), 10A (face oeste)
Figura AIV.5: Aspecto da frente de carbonatação do betão extraído dos viadutos

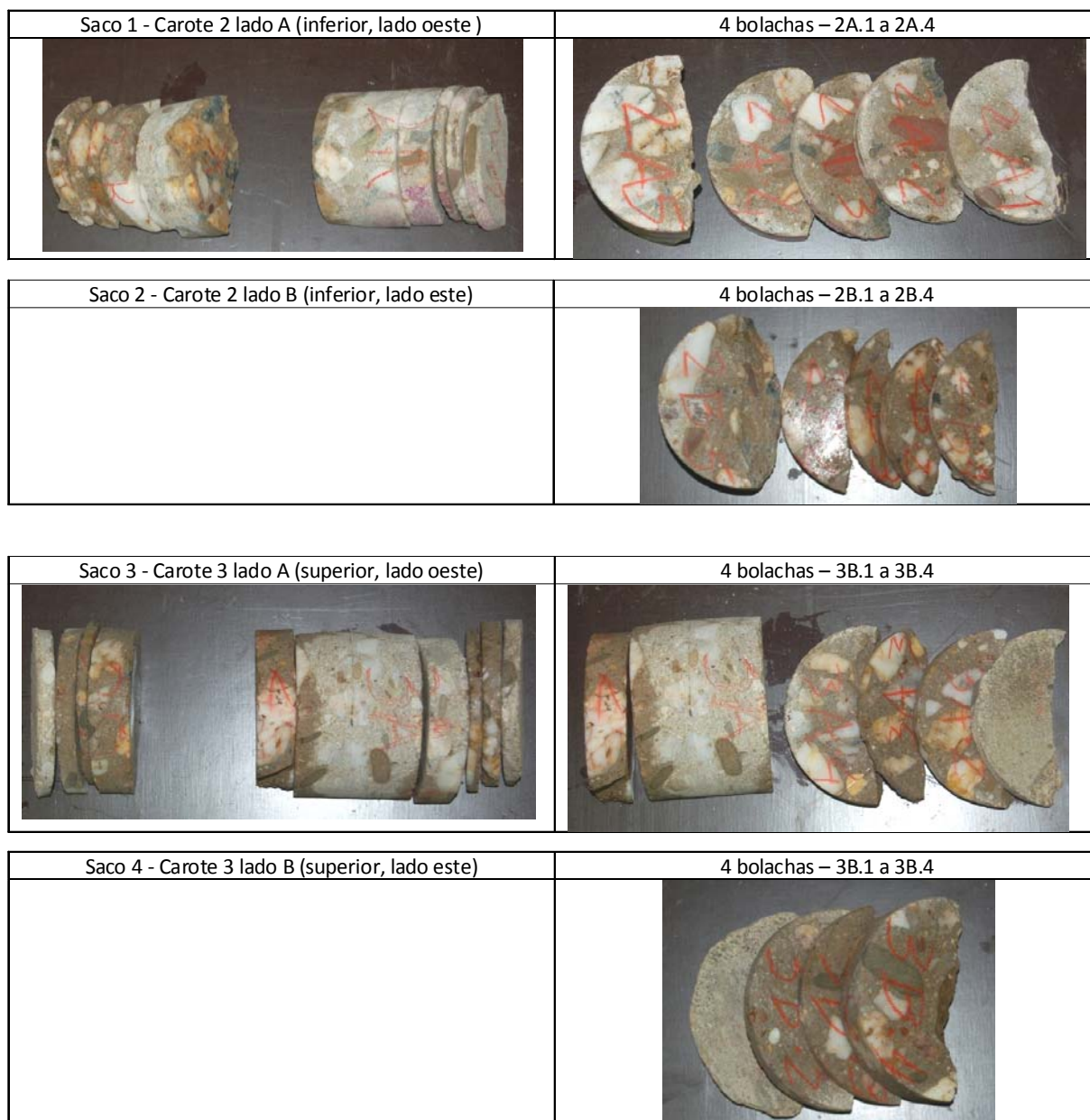


Figura AIV.6: Provetes de ensaio obtidos das carotes 2 e 3, da meia metade dos provetes dos topos, face oeste (B) e face este (A)

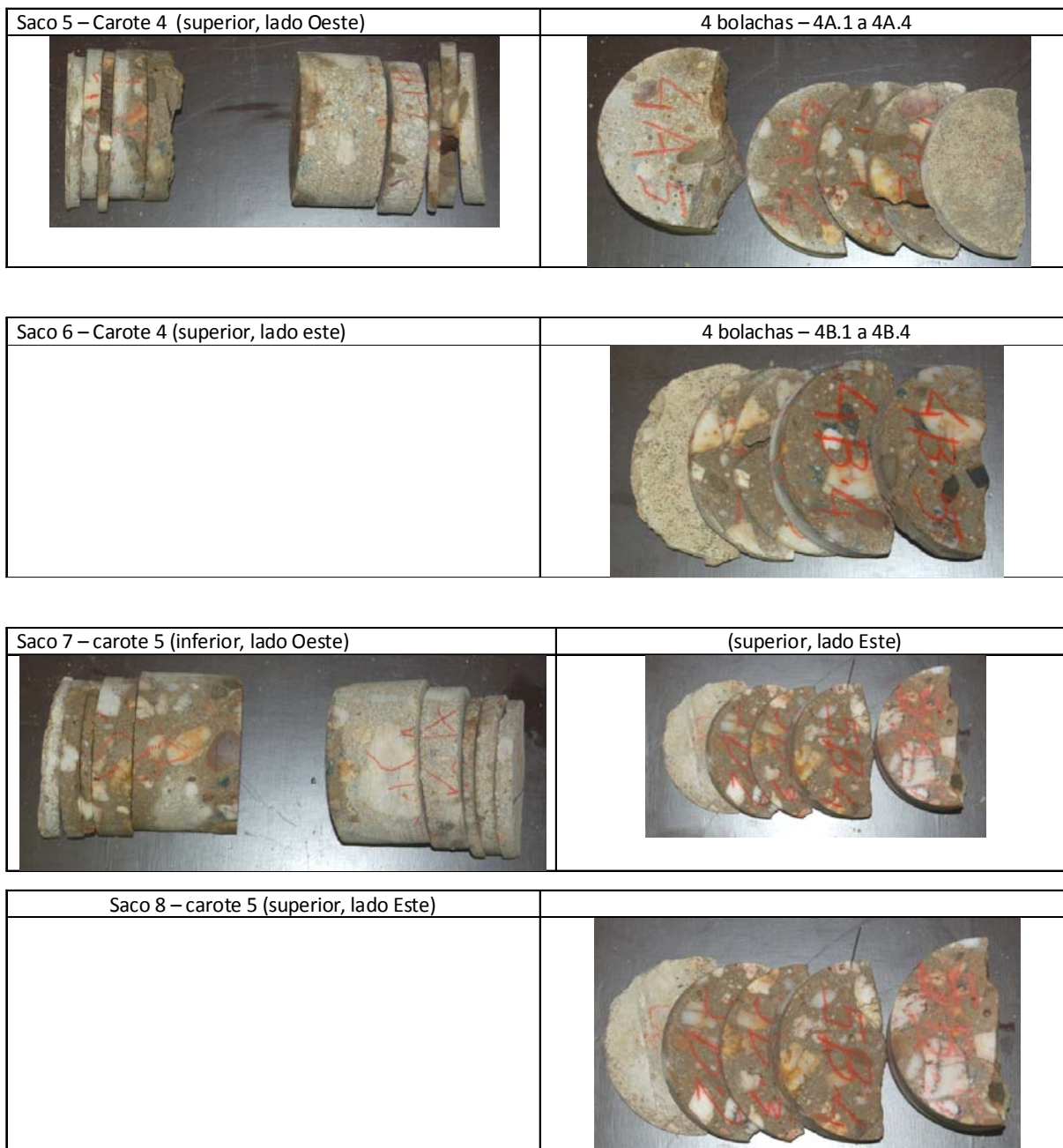


Figura AIV.7: Provetes de ensaio obtidos das carotes 4 e 5, da meia metade dos provetes dos topos, face oeste (B) e face este (A)

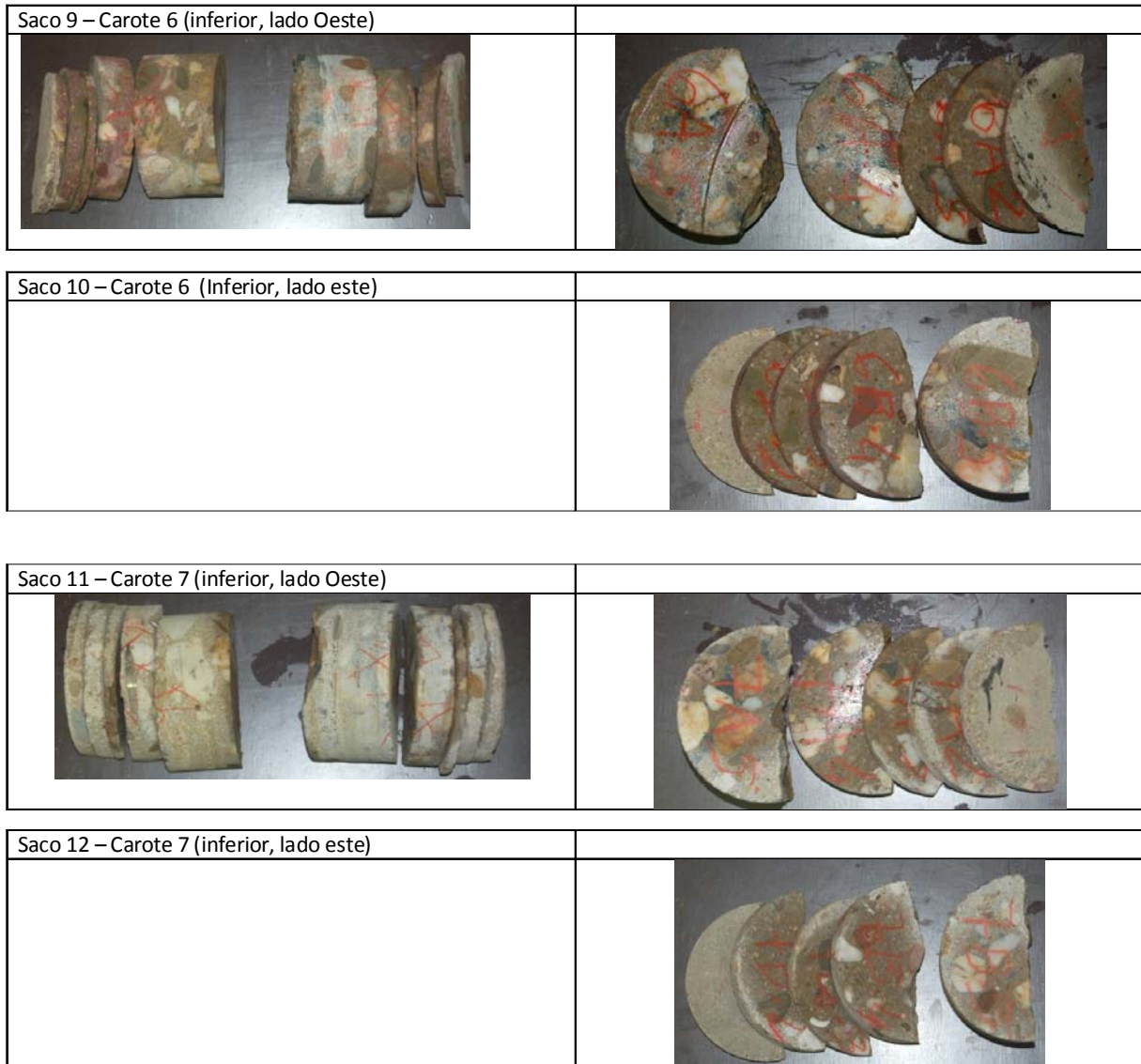


Figura AIV.8: Provetes de ensaio obtidos das carotes 6 e 7, da meia metade dos provetes dos topos, face oeste (B) e face este (A)

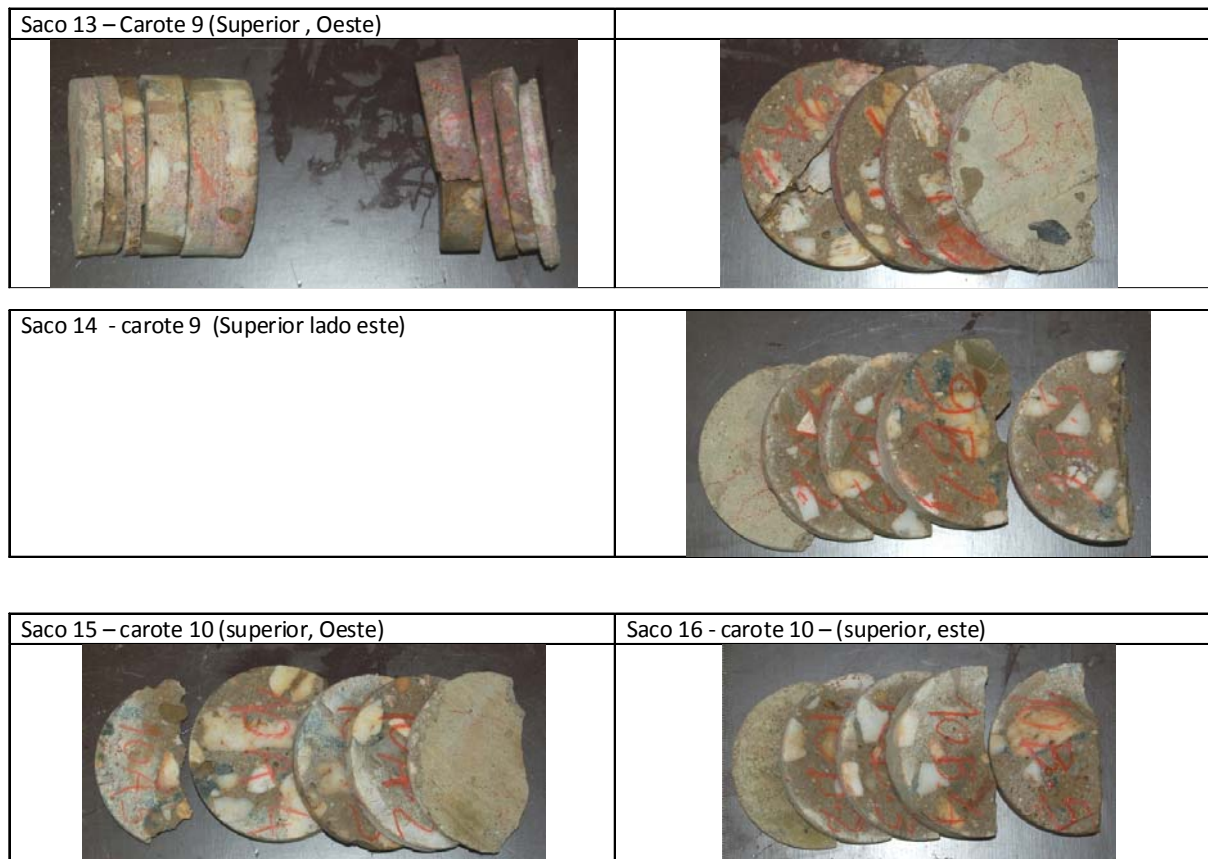


Figura AIV.9: Provetes de ensaio obtidos das carotes 9 e 10, da meia metade dos provetes dos topos, face oeste (B) e face este (A)

