



**Pedro Miguel
Almeida Silva**

**Estudo de durabilidade: Os efeitos dos sais de
degelos em obras de arte.**



**Pedro Miguel
Almeida Silva**

**Estudo de Durabilidade: os efeitos dos sais de
degelo em obras de arte.**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, realizada sob a orientação científica do Doutor Miguel Morais, Professor Auxiliar e do Doutor Humberto Varum, professor associado com agregação do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro.

Gostaria de dedicar este trabalho à minha esposa, Ana.

o júri

presidente

Prof. Doutor Carlos Daniel Borges Coelho
professor auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro

Doutora Catarina Alexandra Louro Fernandes
Investigadora do Centro de Estudos da Construção da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Prof. Doutor Humberto Salazar Amorim Varum
professor associado c/ agregação do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro

Prof. Doutor Miguel Nuno Lobato de Sousa Monteiro de Morais
professor auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro

agradecimentos

Ao terminar este trabalho queria prestar o meu agradecimento a todos aqueles que de uma forma direta ou indireta contribuíram para a sua realização. No entanto não posso deixar de dirigir explicitamente este agradecimento:

- Aos meus orientadores Professor Miguel Morais e Professor Humberto Varum pela disponibilidade e acompanhamento ao longo deste trabalho.
- À concessionária de autoestradas, por ter permitido o uso dos resultados tanto das inspeções como dos ensaios de laboratório, sem os quais teria sido impossível a realização deste trabalho.
- Ao *Instituto Tecnico de Materiales y Construcciones*, pelo desafio e experiência profissional que foi executar todo o trabalho de campo, pelo auxílio técnico dos vários departamentos envolvidos na execução das diversas fases do estudo e também por permitirem o uso dos dados correspondentes.
- Aos meus familiares, em especial à minha mãe por ter sido a impulsionadora deste trabalho e também ao meu irmão e à minha sogra pelo seu estímulo ao longo destes anos no sentido de conseguir levar este trabalho até ao fim.
- À Ana pela compreensão e apoio demonstrados ao longo destes anos.

palavras-chave

Sais de degelo, durabilidade, ensaios e inspeções.

resumo

A durabilidade e a conservação de obras de arte constituem, atualmente, um importante desafio técnico e financeiro. Apesar da comunidade científica se encontrar sensível a esta problemática, existem ainda aspetos que carecem de um estudo mais aprofundado, como é o caso da metodologia aplicada na realização de um estudo de durabilidade de obras de arte, bem como das consequências da aplicação de sais de degelo para a manutenção da circulação rodoviária.

Tomando por base um caso de estudo de vinte obras de arte de uma autoestrada, no presente trabalho é sistematizada a metodologia seguida na elaboração do estudo do estado atual dessas estruturas, com o intuito de analisar as suas condições de durabilidade e de averiguar as causas das anomalias observadas. Em resultado do trabalho desenvolvido constata-se existirem evidências suficientes para afirmar que as anomalias relacionadas com processos de corrosão das armaduras terão sido desencadeadas por escorrências de água com sais de degelo.

Na presente tese é ainda analisado se os regulamentos vigentes por altura da construção das obras de arte do caso de estudo seriam adequados para dotar estas estruturas de características técnicas que permitissem que as mesmas alcançassem o período de vida útil preconizado na fase de projeto.

keywords

Deicing salt, durability, concrete assays and inspections.

abstract

Both durability and conservation of structures are currently considered as technical and financial challenges. Although the scientific community is sensitive to this issue, some aspects require further study, such as the methodology applied in a durability study of bridges, as well as the consequences of using deicing salt for winter road maintenance.

Based on twenty case study structures located on a highway, in this thesis the methodology used in preparing a study of the current state of these structures is presented. This study aimed to analyse the conditions of the structures' durability and to investigate the causes of the observed anomalies. The results of this research provide sufficient evidence to conclude that the anomalies related to reinforcement corrosion processes had been triggered by the penetration of runoff water containing deicing salts.

In this thesis it is also addressed the adequacy of the regulations that were in force at the time of the construction of the case study structures, in terms of providing these structures with technical characteristics that would allow them to reach the design lifetime recommended in the design phase.

Índice

1. Introdução	1
1.1. Objetivos	2
1.2. Organização do trabalho	2
2. Importância, tipos e meios de inspeção.....	4
2.1. Inspeções de Rotina	4
2.2. Inspeções Principais	5
2.3. Inspeções Especiais	5
2.4. Meios auxiliares	6
2.4.1. Meios Humanos.....	6
2.4.2. Meios Materiais	6
2.5. Documentação da Estrutura.....	7
2.6. Sistemas de Gestão de Obras de Arte.....	7
3. Durabilidade das obras de arte — Principais condicionantes.....	9
3.1. Conceito de Vida Útil de uma Estrutura	9
3.2. Fatores que podem condicionar a vida útil de uma obra de arte	10
3.2.1. Fatores construtivos.....	10
3.2.2. Cargas de serviço e níveis de utilização das obras de arte	11
3.2.3. Meteorologia e condições ambientais	11
3.2.4. Manutenção	12
3.3. Processos de corrosão das armaduras.....	12
4. Descrição das estruturas do caso de estudo.....	16
4.1. Passagens Superiores p.k. 0 + 000	18
4.2. Viadutos situados no p.k. 3 + 590	20
4.3. Arco situado no p.k. 5+126	22
4.4. Passagem Superior no p.k. 6+090	23
4.5. Viadutos localizados no p.k. 12 + 718	25
4.6. Passagens Superiores no p.k. 14 + 590	26
4.7. Passagens Superiores no p.k. 16 + 090	30
4.8. Viadutos no p.k. 19 + 090	32
4.9. Viadutos localizados no p.k. 29 + 390	34
4.10. Viadutos situados no p.k. 32 + 090	35
4.11. Passagens Superiores situadas no pk. 62 + 100.....	37
5. Planificar um estudo de durabilidade.....	39
5.1. Revisão da documentação técnica existente.....	39
5.2. Inspeção detalhada da estrutura.....	40
5.3. Elaboração de um plano de abertura de janelas de inspeção — Recolha de informação.....	43
5.4. Realização de ensaios não destrutivos em obra.....	47
5.5. Campanha de ensaios em laboratório	50
6. Resultados e Discussão	53
6.1. Resultados da campanha de inspeções e ensaios.....	54
6.1.1. Resultados obtidos nas obras de arte não sujeitas a ensaios complementares. 54	
6.1.2. Resultados obtidos nas restantes obras de artes	61
6.2. Análise de resultados	71
7. Conclusões	79
7.1. Apreciações gerais.....	79
7.2. Considerações para trabalhos futuros.....	80
Bibliografia	81
Anexo	

Índice de Gráficos

Gráfico 1: Perfil longitudinal do terreno.....	17
Gráfico 2: Relação entre a concentração de iões cloreto e a profundidade do elemento, num perfil tipo de cloretos.....	52
Gráfico 3: Estado das armaduras passivas (vigas), das estruturas situadas no p.k. 0 + 000.	57
Gráfico 4: Estado das armaduras ativas (vigas), das estruturas situadas no p.k. 0 + 000.	57
Gráfico 5: Estado das armaduras nos capitéis, das estruturas situadas no p.k. 0 + 000....	58
Gráfico 6: Estado das armaduras nos pilares, das estruturas situadas no p.k. 0 + 000.	58
Gráfico 7: Estado das anomalias detetadas nas armaduras da estrutura situada no p.k. 5 + 126.	58
Gráfico 8: Estado das armaduras passivas (vigas), das estruturas situadas no p.k. 14 + 590.	59
Gráfico 9: Estado das armaduras ativas (vigas), das estruturas situadas no p.k. 14 + 590.	59
Gráfico 10: Estado das armaduras nos capitéis, das estruturas situadas no p.k. 14 + 590.	59
Gráfico 11: Estado das armaduras nos pilares, das estruturas situadas no p.k. 14 + 590.	59
Gráfico 12: Estado das armaduras ativas (vigas), das estruturas situadas no p.k. 16 + 090.	60
Gráfico 13: Estado das armaduras passivas (vigas), das estruturas situadas no p.k. 16 + 090.	60
Gráfico 14: Estado das armaduras passivas (vigas), das estruturas situadas no p.k. 62 + 100.	61
Gráfico 15: Estado das armaduras ativas (vigas), das estruturas situadas no p.k. 62 + 100.	61
Gráfico 16: Estado das armaduras nos capitéis, das estruturas situadas no p.k. 62 + 100.	61
Gráfico 17: Estado das armaduras nos pilares, das estruturas situadas no p.k. 62 + 100.	61
Gráfico 18: Regressões lineares entre a porosidade e a resistência à compressão do betão, por tipo de elemento.	66
Gráfico 19: Perfil de iões cloreto dos carotes retirados na laje do tabuleiro das estruturas pertencentes ao caso de estudo	69
Gráfico 20: Perfil de iões cloreto dos carotes retirados nas vigas interiores das estruturas pertencentes ao caso de estudo	69
Gráfico 21: Perfil de iões cloreto dos carotes retirados nas vigas exteriores sem anomalias das estruturas pertencentes ao caso de estudo	69
Gráfico 22: Perfil de iões cloreto dos carotes retirados nas vigas exteriores com anomalias das estruturas pertencentes ao caso de estudo	70
Gráfico 23: Perfil de iões cloreto dos carotes retirados nos capitéis das estruturas pertencentes ao caso de estudo	70
Gráfico 24: Perfil de iões cloreto dos carotes retirados nos pilares das estruturas pertencentes ao caso de estudo	70

Índice de Tabelas

Tabela 1: Identificação das estruturas objeto de estudo.....	17
Tabela 2: Armaduras passivas em vigas das estruturas situadas no p.k. 0 + 000.	57
Tabela 3: Armaduras ativas em vigas das estruturas situadas no p.k. 0 + 000.	57
Tabela 4: Armadura de capitéis das estruturas situadas no p.k. 0 + 000.	57
Tabela 5: Armadura de pilares das estruturas situadas no p.k. 0 + 000.	57
Tabela 6: Armaduras nos arcos da estrutura situada no p.k. 5 + 126.....	58
Tabela 7: Armaduras ativas em vigas das estruturas situadas no p.k. 14 + 590.	59
Tabela 8: Armaduras passivas em vigas das estruturas situadas no p.k. 14 + 590.	59
Tabela 9: Armadura de capitéis das estruturas situadas no p.k. 14 + 590.	59
Tabela 10: Armadura de pilares das estruturas situadas no p.k. 14 + 590.	59
Tabela 11: Armaduras ativas em vigas das estruturas situadas no p.k. 16 + 090.	60
Tabela 12: Armaduras passivas em vigas das estruturas situadas no p.k. 16 + 090.	60
Tabela 13: Armaduras passivas em vigas das estruturas situadas no p.k. 62 + 100.	60
Tabela 14: Armaduras ativas em vigas das estruturas situadas no p.k. 62 + 100.	60
Tabela 15: Armadura de capitéis das estruturas situadas no p.k. 62 + 100.	60
Tabela 16: Armadura de pilares das estruturas situadas no p.k. 62 + 100.	60
Tabela 17: Limites à concentração de iões cloreto na massa do betão impostos pela norma EN 206-1 2000 (<i>Concrete Part 1: Specification, performance production and conformity</i>)	68

Índice de Figuras

Figura 1: Início dos processos de corrosão das armaduras por carbonatação do betão de recobrimento.....	14
Figura 2: Picaduras na armadura por ataque de íões cloreto.....	15
Figura 3: Vista em planta das passagens superiores	18
Figura 4: Secção transversal e longitudinal das P.S. p.k. 0 + 000	19
Figura 5: Alçado lateral e vista inferior de uma das Passagens Superiores no p.k. 0 + 000	20
Figura 6: Planta longitudinal de um dos viadutos.....	21
Figura 7: Perfil longitudinal.....	21
Figura 8: Secção transversal.....	22
Figura 9: Vista de um alçado lateral de um dos viadutos	22
Figura 10: Perfil transversal e longitudinal do arco	23
Figura 11: Vista geral da estrutura.....	23
Figura 12: Passagem inferior vista em planta	24
Figura 13: Secção transversal da passagem superior	24
Figura 14: Vista inferior da Passagem Superior no p.k. 6 + 090	25
Figura 15: Alçado longitudinal dos dois viadutos.....	26
Figura 16: Secção transversal dos viadutos	26
Figura 17: Vista das duas estruturas à data da realização dos trabalhos de campo	26
Figura 18: Vista em planta das passagens inferiores situadas no p.k. 14 + 590	27
Figura 19: Secção transversal da passagem superiores no sentido A (em cima) e no sentido B (em baixo)	28
Figura 20: Pormenor da secção transversal do tabuleiro da passagem superior correspondente ao sentido B (em cima) e do tabuleiro da passagem superior relativo ao sentido A (em baixo).	28
Figura 21: Alçado e vista inferior das passagens inferiores.....	29
Figura 22: Vista em planta das passagens superiores situadas no p.k. 16 + 090	31
Figura 23: Secção transversal das passagens superiores.....	31
Figura 24: Alçado lateral.....	32
Figura 25: Vista inferior de uma das estruturas	32
Figura 26: Secção longitudinal dos Viadutos localizados no p.k. 19 + 090	33
Figura 27: Secção transversal tipo e nomenclatura utilizada	33
Figura 28: Alçado dos Viadutos.....	34
Figura 29: Secção longitudinal dos Viadutos localizados no p.k. 29 + 390	34
Figura 30: Secção transversal de um dos Viadutos.....	35
Figura 31: Alçado dos Viadutos.....	35
Figura 32: Alçado de um dos Viadutos situados no p.k. 32 + 090	36
Figura 33: Secção transversal dos Viadutos.....	36
Figura 34: Vista inferior dos Viadutos.....	36
Figura 35: Vista em planta das passagens superiores localizadas no p.k. 62 + 100	37
Figura 36: Secção transversal tipo das passagens superiores.....	38
Figura 37: Alçado e vista inferior de uma das passagens superiores.....	38
Figura 38: Escorrências em pilares e capitéis, provenientes da junta de dilatação existente no tabuleiro da obra de arte localizada no 12+718 sentido B.....	41
Figura 39: Deterioração da junta de dilatação, que propicia as escorrências de água e subsequente degradação dos materiais constituintes.	41
Figura 40: Deterioração da junta de dilatação e escorrências de água através da mesma.	42
Figura 41: Danos no tabuleiro do viaduto, situado no p.k. 19 + 090 sentido B, devido a escorrências de água pela cornija.	42

Figura 42: Danos em vigas interiores associados a filtrações de água através da laje do tabuleiro da estrutura sita no p.k. 3 + 590.	43
Figura 43: Danos em vigas causados por um sistema de drenagem em mau estado de conservação. Obra de arte localizada no p.k. 29 + 390 sentido B.	43
Figura 44: Vista de uma janela de inspeção realizada para determinar a configuração das armaduras e a sua secção residual.	45
Figura 45: Início dos processos de corrosão na armadura ativa no viaduto localizado no p.k. 12 + 718 sentido B.	46
Figura 46: Rotura de alguns cabos de pré-esforço no viaduto localizado no p.k. 3 + 590 sentido A.	46
Figura 47: Medida in situ da profundidade de betão carbonatado numa janela de inspeção realizada na estrutura sita no p.k. 32 + 090 sentido A.	46
Figura 48: Esclerómetro.	47
Figura 49: Ensaio <i>pull-out</i>	48
Figura 50: Ensaio <i>Pull-off</i>	49
Figura 51: Extração de carotes no viaduto localizado no p.k. 19 + 090.	52
Figura 52: Escorrências de água e o estado do banzo inferior da viga (face exterior)	55
Figura 53: Estado da armadura na zona com escorrências. Armadura passiva com corrosão intensa e armadura ativa com indícios de corrosão (sem perda de secção nominal).	55
Figura 54: Escorrência de água na cabeça de uma viga junto a um dos encontros, sob uma junta de dilatação.	55
Figura 55: Detalhe do destacamento do betão e corrosão das armaduras, numa zona de apoio intermédio sob uma junta de dilatação.	55
Figura 56: Estado de um capitel de um pórtico intermédio.	56
Figura 57: Vista de uma janela de inspeção cujas armaduras apresentavam corrosão (sem perda de secção).	56
Figura 58: Esquina da face lateral com a inferior com corrosão de um capitel, cuja armadura apresenta corrosão.	56
Figura 59: Armaduras de um pilar com picaduras.	56
Figura 60: Fissuração da face inferior e longitudinal da viga exterior, quer em zonas reparadas como na face original.	62
Figura 61: Detalhe da Figura 60, com fissuras na zona reparada.	62
Figura 62: Destacamento do betão de recobrimento das armaduras.	62
Figura 63: Estado da zona de apoio.	62
Figura 64: Estado de um pilar de uma das estruturas.	63
Figura 65: Detalhe de uma zona em bom estado.	63
Figura 66: Vista de um capitel com escorrências de água e manchas de corrosão.	63
Figura 67: Outro capitel com escorrências de água e manchas de corrosão.	63
Figura 68: Três janelas de inspeção realizadas numa viga exterior da estrutura localizada no p.k. 3 + 590: uma em zona com escorrências de água e as restantes progressivamente mais afastadas da primeira. Pormenor da terceira janela de inspeção.	64
Figura 69: Detecção das armaduras, através da utilização de um pacómetro.	66
Figura 70: Extração de um carote num pilar.	66
Figura 71: Extração de um carote numa viga.	66

1. Introdução

A durabilidade e a conservação de obras de arte constituem, na atualidade, um desafio técnico e financeiro muito importante, sobretudo no que respeita a estruturas de betão armado e/ou pré-esforçado.

Em resultado de uma série de acontecimentos ocorridos nas últimas décadas, a comunidade científica encontra-se particularmente sensível à problemática da manutenção e conservação de obras de arte, bem como para a reformulação das exigências regulamentares a adotar na construção de novas estruturas.

No entanto e embora se assista de facto a alterações aos regulamentos e às especificações de trabalho para as novas estruturas de betão armado, as estruturas já existentes não são abrangidas diretamente por estes ajustamentos. Nesse sentido, quando são detetadas anomalias em obras de arte existentes, é necessário adotar soluções de intervenção que visem reparar e, sempre que possível, melhorar as características da estrutura e/ou dos respetivos materiais constituintes, à luz dos novos regulamentos.

Existem diversas publicações e diversos trabalhos desenvolvidos sobre a temática de manutenção e conservação de obras de arte: por exemplo, Cruz [9] debruçou-se sobre a inspeção, o diagnóstico, a monitorização e conservação de pontes, Almeida, Cruz e Brito [5] analisaram sistemas de gestão de pontes, Tanaka et al. [24] desenvolveram um estudo sobre recobrimentos de armaduras de estruturas localizadas em ambientes marítimos. No entanto parece existir pouca informação sobre, especificamente, a metodologia a seguir na abordagem a um estudo de durabilidade ou mesmo sobre os efeitos em obras de arte decorrentes de condicionalismos ambientais introduzidos pelo Homem, como é o caso do uso intensivo de saís de degelo.

Deste modo, nesta tese serão analisados os efeitos do uso de saís de degelo na durabilidade de um conjunto de obras de arte de uma autoestrada.

Por questões de confidencialidade, não será revelada a localização das obras de arte estudadas, sendo omitidos quaisquer elementos que possam conduzir à sua identificação.

1.1.Objetivos

Através desta tese pretende-se sistematizar a metodologia aplicada na realização de um estudo de durabilidade de vinte obras de arte e verificar se os sais de degelo utilizados na manutenção da circulação rodoviária, das vias de comunicação onde estas estruturas se inserem, têm um efeito de causalidade sobre anomalias relacionadas com processos de corrosão das armaduras.

Pretende-se ainda averiguar se os regulamentos vigentes por altura da construção das obras de arte em estudo seriam adequados para dotar estas estruturas de características técnicas que permitissem que as mesmas alcançassem o período de vida útil preconizado na fase de projeto. Para esse efeito, serão comparadas as características geométricas dos elementos constituintes e a sua composição com o que era exigido aquando da construção das obras de arte em questão.

1.2.Organização do trabalho

Começa-se por se caracterizar no capítulo 2 os vários tipos de inspeção que devem ser realizadas às obras de arte, de forma a avaliar o seu estado de conservação.

No capítulo 3 aborda-se a temática de durabilidade de estruturas e alguns dos fatores que podem influenciar a sua vida útil. Considerando as características das obras de arte constantes do caso de estudo, será dada especial ênfase a um dos processos que pode conduzir à redução da vida útil de uma estrutura: o processo de corrosão.

No quarto capítulo são caracterizadas com detalhe as obras de arte pertencentes ao caso de estudo, nomeadamente quanto à sua extensão, tipologia e localização.

O capítulo 5 merece especial destaque neste trabalho, uma vez que deu origem à publicação de um artigo [22] que foi apresentado no 1.º Congresso Nacional sobre Segurança e Conservação de Pontes, organizado pela Associação Portuguesa para a Segurança e Conservação de Pontes (ASCP). Nesta secção são detalhadas as etapas do estudo de durabilidade realizado, desde a fase inicial até à obtenção dos resultados, os quais permitiriam, num trabalho subsequente, estabelecer as recomendações sobre o estado das estruturas.

No capítulo 6 são apresentados e discutidos os resultados dos trabalhos efetuados no âmbito do estudo de durabilidade e as conclusões do trabalho efetuado são expostas no último capítulo, sendo aí também efetuadas algumas sugestões de trabalho futuro a ser realizado.

2. Importância, tipos e meios de inspeção

Uma das fases mais importantes na conservação das estruturas é a inspeção, conforme mencionado, por exemplo, nas publicações do Ministerio de Fomento de España [17], [18].

Entre os diversos tipos de inspeção destacam-se as **inspeções principais**: nestas fiscalizações devem-se analisar todos os elementos constituintes das estruturas e emitir um relatório sobre os resultados das inspeções efetuadas e sobre o estado atual de cada estrutura. No caso de existir informação sobre inspeções anteriores, esta deve ser também incluída nesse relatório.

No caso de serem detetadas anomalias, deve-se também estabelecer medidas corretivas ou recomendar a realização de uma **inspeção especial**.

É extremamente importante detetar com a maior antecedência possível a existência de anomalias ou de alterações possivelmente prejudiciais que possam afetar a durabilidade ou a **vida útil** de uma estrutura. A inspeção realizada de forma sistemática e contínua constitui o primeiro passo no estudo do comportamento das estruturas, podendo, caso seja necessário, realizar uma manutenção adequada e atempada. A deteção das anomalias numa fase inicial permite corrigir a possível evolução desfavorável de uma patologia, evitando danos maiores.

Toda a informação recolhida ao longo da vida de uma estrutura facilita e serve de base nos trabalhos de reparação, bem como em possíveis obras de reforço, alargamento, etc.

2.1. Inspeções de Rotina

As inspeções de rotina são realizadas por indivíduos responsáveis pela manutenção da via de comunicação, uma vez que possuem um bom conhecimento prático da obra, ainda que, por norma, estes indivíduos não tenham recebido formação específica sobre técnicas de inspeção de obras de arte.

Estas inspeções visam detetar atempadamente falhas que possam originar custos significativos na manutenção ou reparação.

Este tipo de inspeções é, ou deveria ser, uma vigilância quase contínua das estruturas.

2.2.Inspecções Principais

São inspeções mais profundas e detalhadas que as descritas no ponto anterior e implicam uma observação minuciosa de todos os elementos da obra de arte. Estas fiscalizações consistem fundamentalmente em inspeções visuais, sem recurso a meios auxiliares especiais.

Estas inspeções devem ser efetuadas por indivíduos especializados ou sob a supervisão de um técnico superior, acreditado para realizar este tipo de trabalhos.

O intervalo de tempo que pode decorrer entre inspeções depende do tipo da estrutura e dos seus antecedentes. Algumas normas recomendam que o intervalo médio seja de cinco anos, podendo esse período variar em função da deteção de anomalias noutras inspeções.

Este tipo de inspeções deve sempre ser documentado através de um relatório escrito, o qual deve seguir critérios consistentes ao longo do tempo.

A primeira inspeção principal deve ser efetuada antes da entrada em serviço da estrutura, ou antes da realização da primeira prova de carga, no caso de estruturas com mais de 8m de vão. Esta inspeção é fundamental para detetar algum defeito construtivo da estrutura, constituindo o *ponto zero* para todas as inspeções periódicas que se venham a realizar ao longo da *vida útil* da obra de arte em apreço.

2.3.Inspeções Especiais

As Inspeções Especiais efetuam-se no seguimento da ocorrência de situações particulares ou por recomendação de um relatório de Inspeção Principal.

As situações particulares que podem e devem originar uma inspeção deste tipo são, nomeadamente, a deteção de fissuras e/ou deformações significativas, a passagem de transportes especiais, sismos, incêndios, cheias ou qualquer outra ocorrência accidental.

Este tipo de inspeção não tem um carácter sistemático ou periódico.

A realização de uma inspeção especial, para além da inspeção visual de todos os elementos constituintes da estrutura, supõe a realização de um conjunto de ensaios complementares que requerem a utilização de técnicas e equipamentos específicos.

A realização deste tipo de ensaios implica, necessariamente, a presença de técnicos especialistas em diferentes áreas.

2.4.Meios auxiliares

A realização de inspeções principais ou especiais obriga à utilização de meios humanos e materiais especializados. Nos pontos seguintes serão abordadas com maior ênfase as inspeções principais.

2.4.1. Meios Humanos

As inspeções principais consistem basicamente em inspeções visuais detalhadas. Deste modo, é fundamental a objetividade e a capacidade de interpretação dos factos visualizados, pelo que é imprescindível que o inspetor cumpra os seguintes requisitos:

- Ter uma qualificação profissional adequada (conhecimentos teóricos sobre o modo de funcionamento resistente da estrutura, sobre os materiais, os métodos de construção, etc.);
- Ter conhecimento sobre as várias etapas de degradação e deterioração que uma estrutura pode apresentar;
- Ter na sua posse os dados necessários para preparar a realização de uma inspeção¹: os elementos que se vão inspecionar, o projeto “*as built*”, o histórico patológico da estrutura, os relatórios anteriormente emitidos (caso existam), etc.

2.4.2. Meios Materiais

No auxílio à realização das inspeções principais devem ser utilizados meios materiais convencionais tais como martelos, fitas métricas, binóculos, máquina fotográfica, régua de fissuras, lanterna, medidor de distâncias, etc.

De forma a formularem-se conclusões válidas a partir de inspeções principais é necessário respeitarem-se três condições fundamentais:

¹ Por este motivo é conveniente que toda a informação disponível sobre a estrutura conste da sua documentação.

- Poder ver, isto é, poder aceder a todos os elementos que se pretendem inspecionar e que sejam visíveis ou visitáveis; deste modo, pode ser necessário utilizar meios de acesso tais como escadas, andaimes, guias, etc.;
- Saber ver, para o qual é necessário uma equipa de inspeção qualificado e com experiência adequada;
- Saber o que se quer ver, isto é, as inspeções devem ser preparadas com antecedência, estudando o projeto, os possíveis incidentes que possam ter afetado a estrutura durante a sua construção e o histórico de manutenção/inspeções da estrutura.

2.5.Documentação da Estrutura

Conforme mencionado atrás, toda a informação relativa a uma estrutura deve estar compilada, incluindo nomeadamente documentação da fase de projeto e relatórios de operação e manutenção. Esta informação é fundamental na preparação das inspeções principais.

Durante a realização das inspeções deve-se verificar a informação constante da documentação da estrutura e caso existam características e/ou dados que não tenham sido documentados, os mesmos deverão ser incluídos nessa documentação.

2.6.Sistemas de Gestão de Obras de Arte

A implementação de um sistema de gestão de obras de arte tem como objetivo conhecer a cada momento o estado da estrutura, permitindo calendarizar a realização de inspeções técnicas e de trabalhos de manutenção.

Este tipo de sistemas permite a obtenção de benefícios financeiros, uma vez que a sua implementação permite reduzir custos de longo prazo: (i) as reparações são desfasadas, (ii) as consequências das anomalias/defeitos observados não chegam a atingir uma maior proporção e (iii) o custo das intervenções pode ser estimado.

A aplicação de um sistema de base de dados permite ainda estabelecer prioridades nas intervenções a realizar, com base num estudo de custos global e na avaliação do estado das estruturas.

Os sistemas de gestão de obras de arte devem permitir, com base nas inspeções periódicas: (i) definir o estado da estrutura; (ii) atribuir as verbas necessárias para as intervenções programadas; (iii) estabelecer, em função do estado de cada estrutura, a prioridade das intervenções; (iv) encontrar a melhor solução de intervenção para cada uma das estruturas e (v) contabilizar os custos com as intervenções e com o sistema de gestão. Das bases de dados do sistema de gestão deve constar um modelo de custos, de deterioração e de otimização.

3. Durabilidade das obras de arte — Principais condicionantes

As obras-de-arte podem estar expostas a processos de deterioração, dependendo do respetivo traçado e localização, do seu sistema estrutural, dos materiais utilizados, assim como da periodicidade e intensidade dos trabalhos de manutenção na super e infra-estruturas.

Seguidamente detalham-se os fatores que podem influenciar a vida útil de uma estrutura, dando especial enfoque aos tipos de processos de corrosão mais relevantes para a interpretação do caso de estudo.

3.1. Conceito de Vida Útil de uma Estrutura

Entende-se por **vida útil** o período de tempo durante o qual uma estrutura mantém as suas características de funcionalidade, segurança, resistência e aspeto exterior, para as quais foi projetada.

A primeira variável que se deve considerar para calcular a vida útil de uma estrutura é o meio ou classe ambiental à qual vai estar exposta. O tipo de agente agressivo e a sua intensidade são os principais fatores que se devem ter em consideração, quer quando se projeta uma estrutura e a sua vida útil, como quando se calcula a vida útil residual de uma estrutura em serviço.

Para quantificar a vida útil de uma estrutura, deve-se ter em consideração os seguintes critérios:

- Identificar qual ou quais ações agressivas podem afetar a estrutura;
- Medir a intensidade dessas ações agressivas: concentração de sulfatos, reatividade dos aglomerados, ciclos de temperatura (caso estejam previstas temperaturas negativas), concentração de iões cloreto, humidade ambiental, etc.

A definição das classes e ambientes de exposição constam nos Eurocódigos.

Uma vez identificado o ambiente de exposição, deve-se definir o período de tempo durante o qual a estrutura deverá manter-se em serviço e qual o plano de manutenção respetivo.

De acordo com os Eurocódigos, o valor de referência para a vida útil de obras de arte é de 100 anos. No entanto, este valor pode depender de características específicas de cada estrutura.

3.2.Fatores que podem condicionar a vida útil de uma obra de arte

Os fatores que podem afetar a vida útil de uma estrutura podem ser divididos em quatro grandes grupos: fatores construtivos, evolução do tráfego, condições meteorológicas e manutenção das obras de arte.

Existem também alguns autores [21] que defendem que estes fatores poderão ser classificados em apenas dois grupos: um primeiro, os **fatores objetivos**, nos quais se incluem todos os que são independentes da atividade humana e um segundo grupo, os **fatores subjetivos**, que por contraposição abrange os fatores que dependem da atividade humana, tanto ao nível da engenharia de pontes, como de outros domínios.

Considerando o maior grau de desagregação da primeira classificação e as vantagens daí decorrentes, a partir daqui apenas serão feitas referências à primeira partição.

3.2.1. Fatores construtivos

Os fatores construtivos compreendem todos aqueles que, na fase de projeto ou de execução, poderão vir a afetar ou condicionar futuramente a vida útil da estrutura.

De facto, ao nível do projeto, podem ser contemplados elementos/pormenores que poderão proporcionar uma maior exposição à deterioração, podendo conduzir a uma degradação precoce. Adicionalmente, refira-se que a vida útil para a qual a estrutura é projetada naturalmente irá alterar / afetar as suas características.

Por outro lado, potenciais desvios entre o projeto e a sua execução, bem como a qualidade dos materiais utilizados poderão condicionar a durabilidade da estrutura.

3.2.2. Cargas de serviço e níveis de utilização das obras de arte

As cargas de serviço são fatores externos à estrutura, relacionados com o seu uso.

De facto, ao longo das últimas décadas as estruturas têm vindo a ser sujeitas a um tipo de utilização distinto: maior concentração de cargas de veículos pesados, intensidade de tráfego superior, bem como velocidades mais elevadas. Assim, algumas pontes mais antigas, não adaptadas para suportar tal tipo de cargas dinâmicas, sofrem uma deterioração mais rápida. Este aumento de cargas é também muitas vezes devido à não remoção do betuminoso antes da colocação de um novo ou, apesar de não ser tão frequente, ser “acertado” o releve / pendente do viaduto / ponte recorrendo a um aumento do betuminoso.

3.2.3. Meteorologia e condições ambientais

Nesta categoria pretende-se englobar o efeito da estação do ano, de variações de temperatura, chuva e pressão do vento.

Atente-se que as pontes, ao contrário de muitas outras estruturas, não estão geralmente cobertas nem por telhados, nem por outros elementos de proteção. Assim, o efeito deste tipo de fatores é, em muitos casos, mais importante para a durabilidade das estruturas que os efeitos causados pelo próprio tráfego. Com a exceção da temperatura e da pressão do vento, os restantes elementos não são geralmente considerados como parâmetros de dimensionamento e é quase impossível prever a sua influência ao longo dos anos, nem mesmo os danos que podem eventualmente causar.

A maioria deste tipo de fatores não pode ser controlada pela ação do ser humano. Porém, existem também condicionantes ambientais que são introduzidos pelo próprio Homem, como é o caso da poluição atmosférica, da dissolução de elementos químicos agressivos em cursos de água, por exemplo decorrentes da exploração mineira, e a colocação de saís de degelo sobre as estruturas.

3.2.4. Manutenção

Os fatores de manutenção estão relacionados com a qualidade e frequência das medidas preventivas, tais como substituição e limpeza dos sistemas de drenagem e de juntas de dilatação, substituição de neoprenos, etc.

De facto, a manutenção é um fator decisivo na durabilidade das estruturas: uma inadequada / desajustada manutenção leva a uma degradação precoce da estrutura ou origina custos de reparação muito superiores aos que seriam espectáveis no caso de anomalias serem detetadas e reparadas atempadamente.

Um dos principais motivos da deterioração de uma estrutura corresponde às infiltrações de água. Estas podem ser originadas por: (i) um pavimento em mau estado / permeável, (ii) uma desajustada configuração das juntas de dilatação, ou (iii) um sistema de drenagem obturado, em mau estado ou mal concebido / executado.

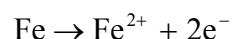
3.3. Processos de corrosão das armaduras

Conforme descrito no capítulo 1., as estruturas de betão armado e/ou pré-esforçado foram consideradas durante muito tempo como duradouras e requerendo uma manutenção mínima. No entanto, com o passar dos anos, muitas destas estruturas começaram a apresentar um quadro patológico que não correspondia às expectativas iniciais.

A origem destas anomalias está muitas vezes associada a uma degradação por corrosão das armaduras. A corrosão foi e é na maioria dos casos a origem da deterioração e de redução no período de vida útil estimado de muitas obras de arte.

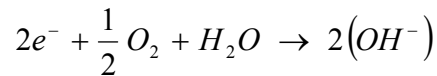
De forma simplificada, o processo de corrosão do aço das armaduras pode dividir-se em dois processos distintos:

- O processo anódico, no qual se produz a dissolução do ião ferro através da seguinte reação química



Os iões Fe^{2+} passam para a solução aquosa.

- O processo catódico, no qual a água e o oxigênio, juntamente com os elétrons provenientes do processo anódico, se juntam para formar íons hidróxido, através da seguinte reação química



Depois de sucessivas etapas, os íons ferro e hidróxido combinam-se para formar teoricamente óxido de ferro III (Fe_2O_3), ainda que o produto da oxidação esteja mais ou menos hidratado.

No processo de oxidação do aço, este pode aumentar até seis vezes o seu volume inicial. Tal fenómeno provoca tensões internas na massa do betão, as quais podem originar fissuras na espessura de recobrimento e, em algumas ocasiões, o destacamento do próprio betão.

Por sua vez, o destacamento do betão de recobrimento das armaduras faz com que estas fiquem expostas aos ataques ambientais, sem qualquer tipo de proteção, potenciando a evolução desta anomalia.

Conforme resulta das reações químicas *supra* enunciadas, a evolução destas exige a presença de ciclos de humidade e de secagem no betão em torno das armaduras. No entanto, a presença de água não é suficiente para que os processos de corrosão se desenvolvam: quer a alcalinidade do betão, como a existência de uma capa passiva nas armaduras impedem, numa fase inicial, o começo do processo de corrosão no aço.

Considerando estes condicionalismos, o início do processo de corrosão tem de ser despoletado por um qualquer evento. De seguida descrevem-se com maior detalhe dois deste tipo de originadores.

1. A espessura de betão carbonatado alcance a posição das armaduras. A carbonatação é um fenómeno que consiste na reação entre o dióxido de carbono atmosférico, que penetra na massa do betão desde o ambiente através da estrutura de poros, com a cal livre do próprio betão, originando carbonato de cálcio. Deste processo resulta a redução do pH do betão, desde o seu valor inicial, sensivelmente 13, até valores inferiores a 9. Esta redução do pH na massa do betão faz com que as armaduras deixem de estar protegidas pelo ambiente alcalino e que se originem os processos de oxidação / corrosão. Na

Figura 1 pode-se observar um caso exemplificativo de corrosão por carbonatação do betão de recobrimento.

2. Ataques de agentes agressivos (fundamentalmente cloretos) que destruam a capa passiva que protege as armaduras. Estes agentes agressivos podem provir tanto (i) do interior da massa de betão, por estarem presentes na massa do betão desde o seu endurecimento, como (ii) do exterior, por exemplo arrastados em escorrências e infiltrações de água contaminadas com sais de degelo provenientes desde o tabuleiro da estrutura. Na Figura 2 podem-se observar picaduras características do início de processos de corrosão localizados, os quais foram despoletados por ataque de iões cloreto.

Nas estruturas constantes do caso de estudo determinar-se-ão, por um lado, quais os pontos ou as localizações mais suscetíveis de apresentarem processos de corrosão, para enfoque da análise a efetuar e, por outro lado, a origem desses processos, já que os métodos de reparação e/ou reforço mais adequados em cada caso dependerão diretamente da origem das anomalias respetivas.

Os processos de reparação e/ou reforço serão abordados nos capítulos seguintes.



Figura 1: Início dos processos de corrosão das armaduras por carbonatação do betão de recobrimento.



Figura 2: Picaduras na armadura por ataque de íões cloreto.

4. Descrição das estruturas do caso de estudo

Por questões de confidencialidade apenas serão apresentados os dados referentes ao caso de estudo considerados mais relevantes para efeitos de enquadramento da presente tese, sem serem indicados quaisquer dados/detalhes que permitam identificar/situar as estruturas ou o dono da obra/concessionária correspondente.

O caso de estudo objeto de análise nesta tese é constituído por 20 estruturas, 9 das quais possuem obras de arte gémeas, ou seja situadas sensivelmente na mesma localização mas com sentidos de tráfego opostos, e as restantes duas só com um sentido de tráfego.

As obras de arte estão localizadas num lanço de autoestrada com uma extensão de 62 km e com altitudes compreendidas entre os 847 e os 1235 m de altitude. O traçado da autoestrada atravessa um porto de alta montanha onde, sempre que as condições climáticas o exigem, são utilizados saís fundentes que impeçam / atrasem a formação de placas de gelo, de forma a manter as condições rodoviárias.

Para efeitos desta análise será considerada como referência de cada obra de arte o seu ponto quilométrico (p.k.). Deste modo, atribuiu-se o p.k. 0 + 000 à primeira estrutura objeto de estudo, tendo-se definido como localização do porto de montanha o p.k. 10 + 000.

Quanto ao sentido das estruturas, atribuiu-se a designação de sentido A ao sentido quilométrico ascendente, e de sentido B ao sentido quilométrico descendente.

A contagem dos vãos será executado no sentido ascendente do p.k. e as vigas serão numeradas da direita para a esquerda seguindo a mesma referência quilométrica.

Considera-se em qualquer um dos casos o encontro de menor p.k. como E1 ou encontro de entrada, e o de maior p.k. como E2 ou encontro de saída.

Seguindo o critério acima descrito, apresenta-se de seguida uma tabela descritiva das estruturas em estudo.

T	p.k.	D	H ₁	H ₂	i	L
P.S.	0+000	A e B	847	847	↘	3x18,5
Viaduto	3+590	A e B	1057	1082	↘	9x36,5
Arco	5+126	B	1137	1137	—	142
P.S.	6+090	A	1156	1157	↙	3x20
Viaduto	12+718	A e B	1241	1235	↘	7/8x27
P.S.	14+590	A e B	1196	1194	—	40,60
P.S.	16+090	A e B	1202	1202	↘	3x20
Viaduto	19+090	A e B	1148	1163	↙	10x36
Viaduto	29+390	A e B	1164	1167	↘↙ ²	6x36,5
Viaduto	32+090	A e B	1102	1103	↙	4x36,5
P.S.	62+100	A e B	995	996	↙	43,6

Tabela 1: Identificação das estruturas objeto de estudo

Legenda:

T – tipo de estrutura

p.k. – ponto quilométrico do encontro de entrada

D – sentido de tráfego (A ou B)

H₁- cota, em metros, do encontro de entrada (E1)

H₂- cota, em metros, do encontro de saída (E2)

i – inclinação transversal do tabuleiro, sentido ascendente do p.k.

L – comprimento da estrutura

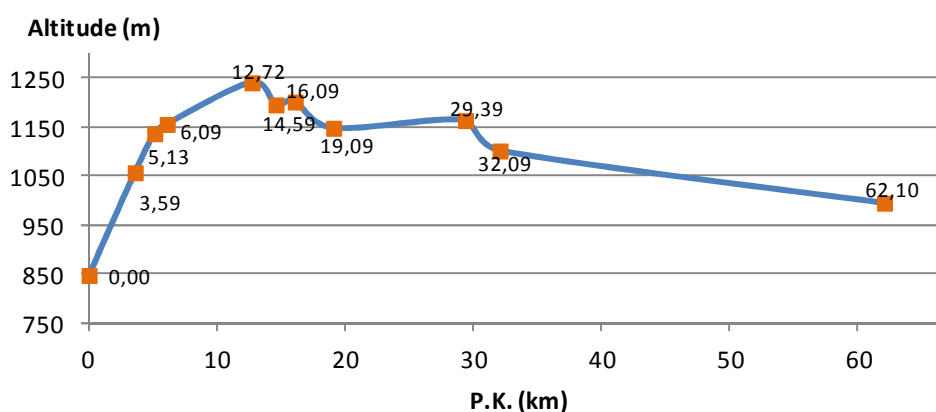


Gráfico 1: Perfil longitudinal do terreno

Por fim, refira-se que os trabalhos de campo decorreram entre Agosto de 2007 e Junho de 2008.

² Nesta estrutura a inclinação transversal inverte a direção no terceiro vão

4.1. Passagens Superiores p.k. 0 + 000

As passagens superiores situadas no p.k. 0 + 000 correspondem a duas estruturas similares que suportam ambos os sentidos de tráfego da citada auto estrada (um sentido por cada estrutura).

Cada estrutura é constituída por 3 vãos isostáticos de 18,5 metros cada, a eixo de pilares, e uma largura constante de 12,5 m, os quais alojam 2 faixas de rodagem. O tabuleiro inferior é constituído por 15 vigas por vão. Posteriormente foram executadas duas estruturas com 7,80 m de largura contíguas às já existentes, de forma a permitirem a ampliação do número de faixas de rodagem. Esta ampliação foi executada com 5 vigas, as quais não foram objeto de estudo de acordo com as instruções do dono de obra / concessionária.

Na Figura 3 pode-se observar uma vista em planta desta passagem inferior.

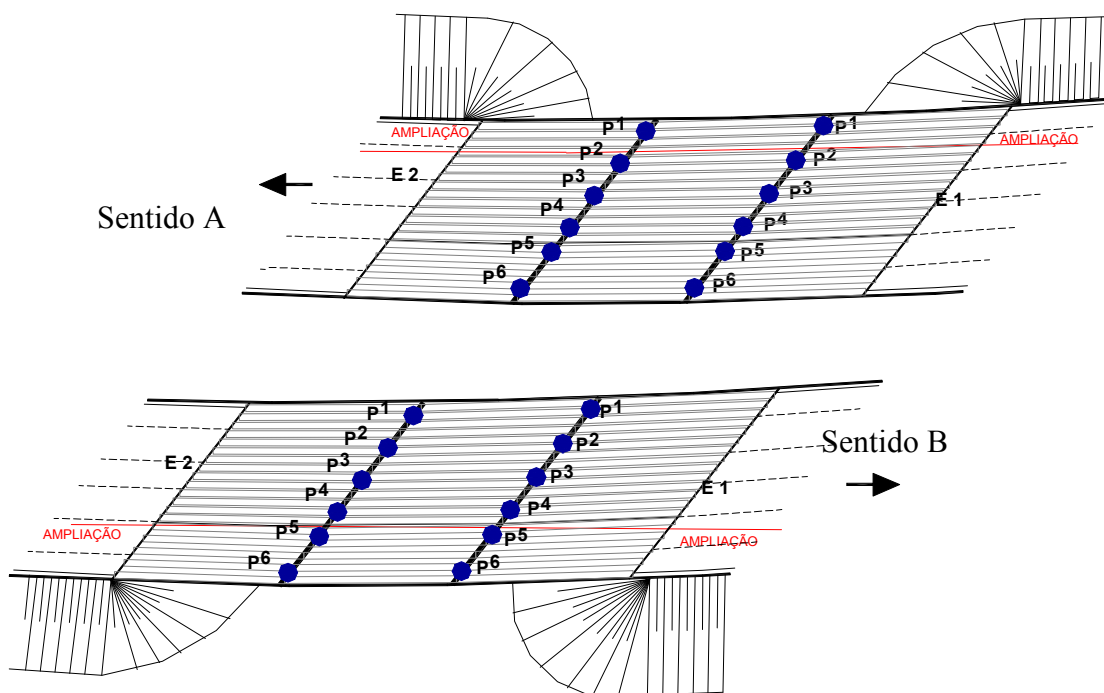
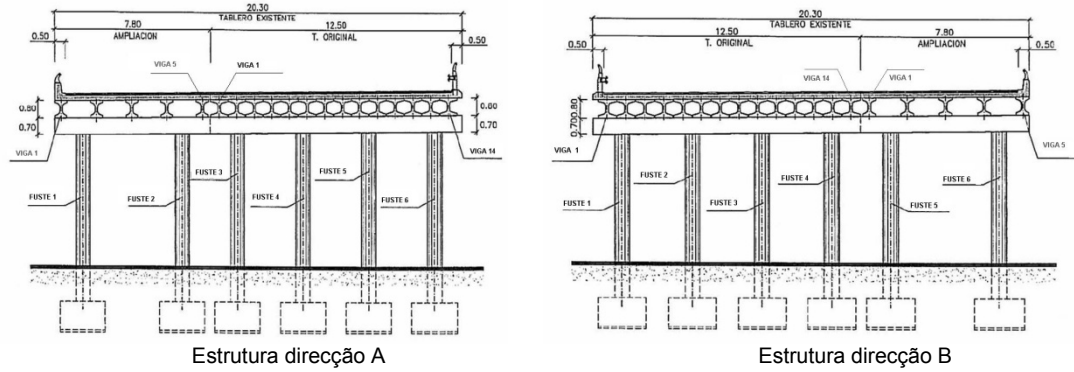
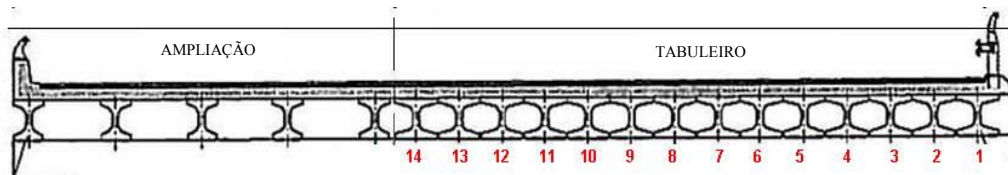


Figura 3: Vista em planta das passagens superiores

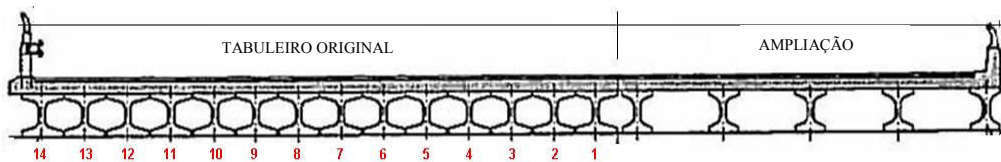
Na Figura 4 pode-se observar a secção transversal destas passagens superiores, identificando-se a nomenclatura utilizada para denominar os diferentes elementos construtivos.



Secção transversal dos apoios intermédios



Denominação utilizada para as vigas do sentido A



Denominação utilizada para as vigas do sentido B

Figura 4: Secção transversal e longitudinal das P.S. p.k. 0 + 000



Figura 5: Alçado lateral e vista inferior de uma das Passagens Superiores no p.k. 0 + 000

4.2. Viadutos situados no p.k. 3 + 590

Refira-se que o projeto e construção destes dois viadutos (sentidos A e B) datam de 1972. Ambos os viadutos são constituídos por nove vãos de 36,5 m entre eixos de pilares. O tabuleiro é formado por seis vigas em I, sobre as quais apoiam pré-lajes de fibrocimento e uma laje de betão armado.

As vigas são pré-fabricadas e de betão pós-tensado, o qual é constituído por 16 bainhas, cada uma com 12 cabos de 7 mm de diâmetro. As vigas estão unidas através de carlingas transversais sobre os apoios e noutras quatro secções equidistantes entre si.

O tabuleiro apoia em capitéis existentes sobre pilares de secção retangular. A secção dos pilares varia em função da altura. A transmissão de cargas ao terreno efetua-se através de sapatas. O apoio das vigas nos capitéis realiza-se através de chapas de ferro fundido.

À data de realização do trabalho de campo, o tabuleiro superior apresentava, sobre determinados pilares (1, 2, 4, 5, 7 e 8), continuidade na laje. A este respeito, refira-se que o projeto original indicava a existência de juntas de dilatação sobre todos os pilares. Porém, na informação recolhida sobre reparações históricas efetuadas à estrutura, não foi encontrada informação relativa a uma eventual supressão de juntas.

Seguidamente apresentam-se esquemas do perfil transversal e da secção longitudinal dos viadutos, bem como a vista de um dos alçados.

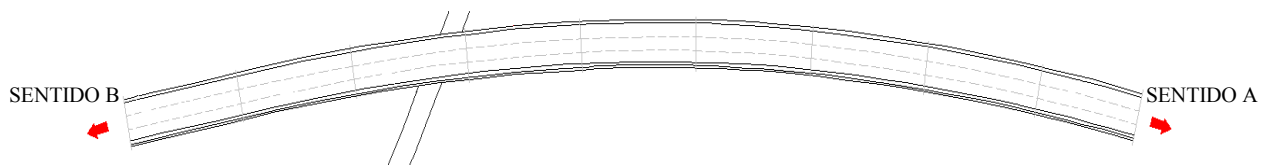


Figura 6: Planta longitudinal de um dos viadutos

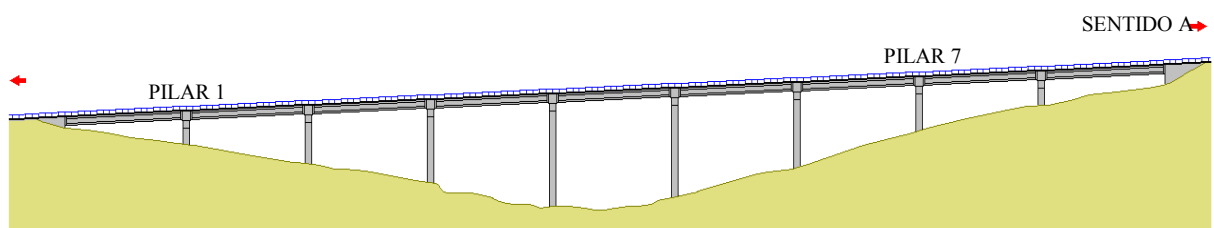


Figura 7: Perfil longitudinal

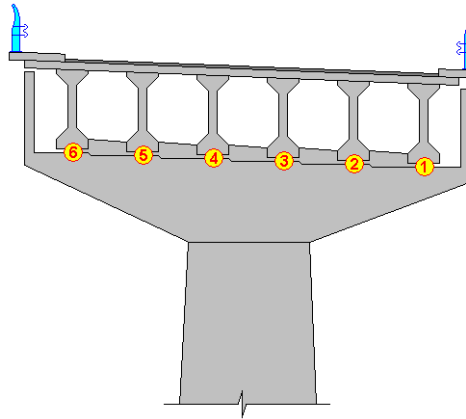


Figura 8: Secção transversal



Figura 9: Vista de um alçado lateral de um dos viadutos

4.3. Arco situado no p.k. 5+126

De acordo com o projeto original, este arco, construída na década de 70, é de betão armado com aproximadamente 142 m de comprimento e 13 m de largura. Sobre a estrutura passa um sentido da auto estrada, enquanto que no seu interior passa o trânsito correspondente ao sentido contrário.

Os aligeiramentos do arco podem ser observados na Figura 10 e na Figura 11.

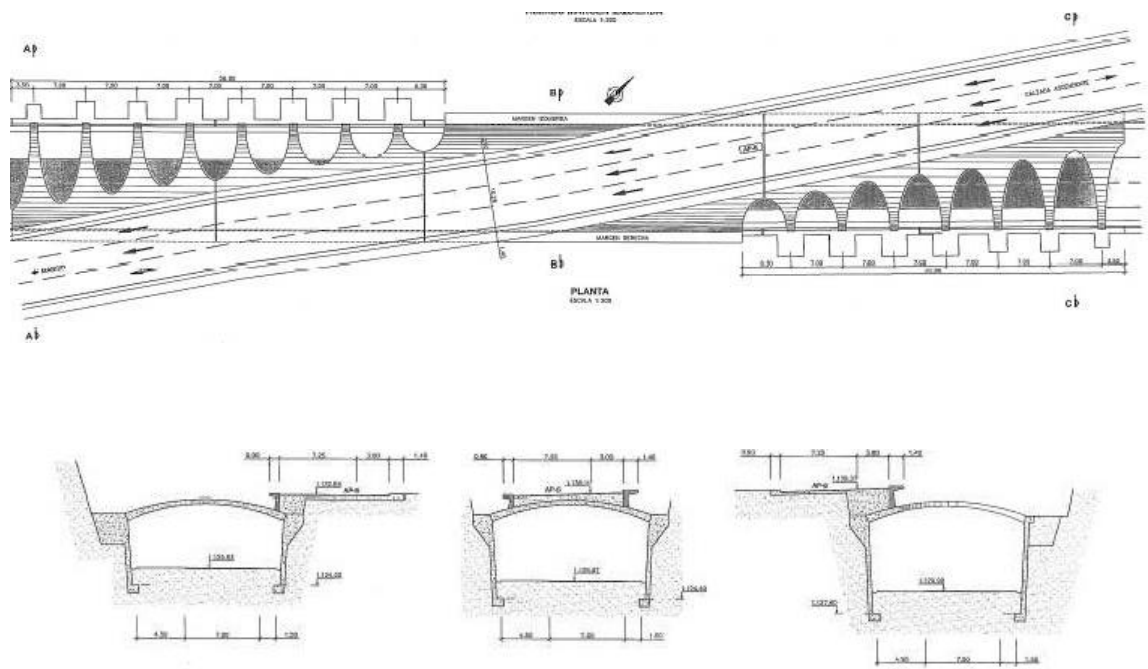


Figura 10: Perfil transversal e longitudinal do arco



Figura 11: Vista geral da estrutura

4.4. Passagem Superior no p.k. 6+090

A passagem superior situada no p.k. 6 + 090 corresponde a uma estrutura que suporta o sentido de tráfego A (sentido quilométrico ascendente).

A estrutura é composta por 3 vãos isostáticos de 20 m cada um a eixo de pilares.

O tabuleiro é constituído por treze vigas pré-fabricadas e pré-esforçadas com secção em I. A armadura ativa é formada por 26 cabos de 7Ø3mm de diâmetro. Sobre as vigas apoia uma laje de betão armado com 4 juntas estruturais, uma sobre cada encontro e duas sobre os apoios intermédios.

As vigas do tabuleiro apoiam, tanto nos encontros como nos apoios intermédios, sobre um capitel, o qual, por sua vez, apoia sobre quatro pilares de secção circular de 80 cm de diâmetro. A transmissão de cargas ao terreno é feita através de sapatas.

O projeto original desta obra data de Junho de 1972, não existindo qualquer informação adicional disponível relativamente à estrutura ou a trabalhos eventualmente realizados sobre a mesma, durante o período de tempo entretanto decorrido.

A Figura 12 apresenta uma vista em planta da passagem inferior, bem como a nomenclatura utilizada para designar os vãos e pilares. Por sua vez, na Figura 13 pode-se observar a secção transversal da estrutura, indicando-se a nomenclatura utilizada para designar as vigas. Na Figura 14 mostra-se uma vista da passagem inferior, na qual é possível observar alguns dos aspetos acima descritos.



Figura 12: Passagem inferior vista em planta

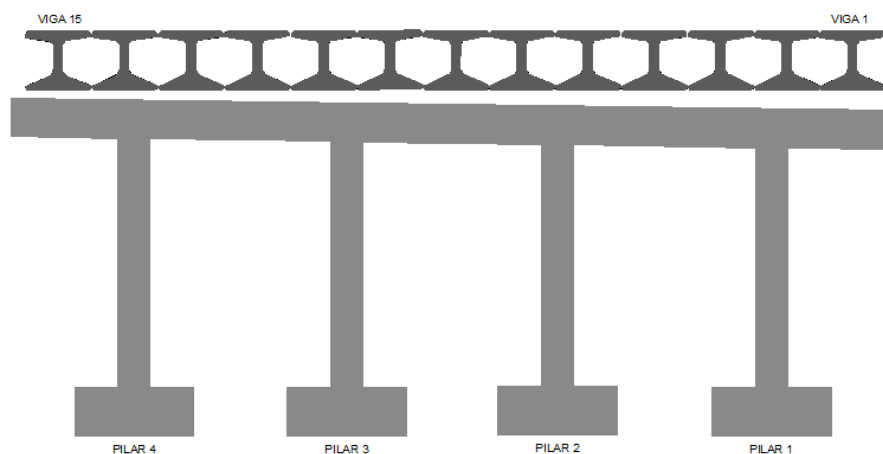


Figura 13: Secção transversal da passagem superior



Figura 14: Vista inferior da Passagem Superior no p.k. 6 + 090

4.5. Viadutos localizados no p.k. 12 + 718

O projeto destas estruturas data de 1970, tendo a sua construção sido concluída em 1972.

O viaduto correspondente ao sentido A é constituído por 8 vãos, enquanto o do sentido B possui 7. Cada vão apresenta 27 m entre eixos de apoios, sendo constituído por 5 vigas em V de secção oca e com paredes de rigidização no seu interior a cada 5 m.

As vigas, simplesmente apoiadas, são de betão armado pós-tensado e betonadas *in situ*. O betão pós-tensado é constituído por 10 bainhas de 12 cabos, cada um com 7 mm de diâmetro. As vigas do tabuleiro apoiam em capitéis através de chapas de ferro fundido e apoios a meia secção. Os pilares têm uma secção circular com um diâmetro de 1,65 m de diâmetro e apoiam no terreno através de uma sapata.

O tabuleiro dispõe de carlingas transversais sobre os apoios.

Os encontros são abertos e estão apoiados no terreno através de sapata contínua.

A armadura dos pilares e a armadura passiva da viga é constituída por varões de aço liso. Relativamente à armadura existente no tabuleiro existem dúvidas sobre a tipologia do aço: liso, estirado em frio ou os atuais B400, B500.

Seguidamente apresenta-se um alçado longitudinal e uma secção de cada viaduto, com a respetiva nomenclatura utilizada.

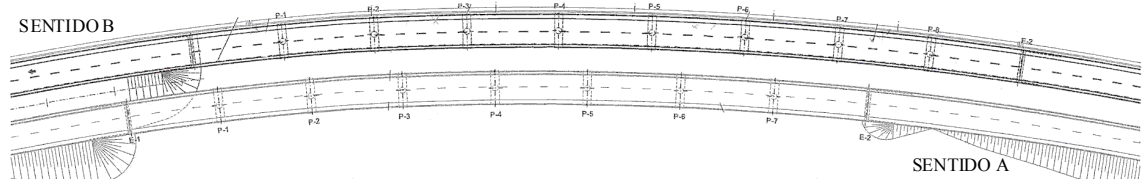


Figura 15: Alçado longitudinal dos dois viadutos

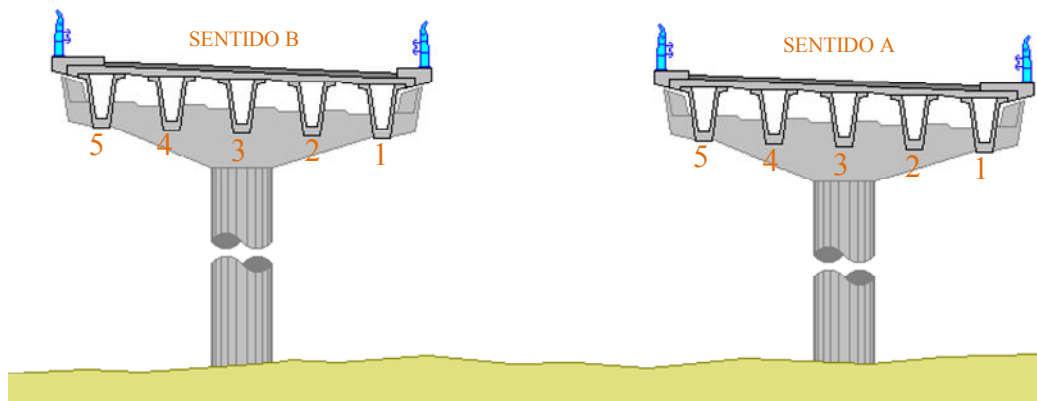


Figura 16: Secção transversal dos viadutos



Figura 17: Vista das duas estruturas à data da realização dos trabalhos de campo

4.6.Passagens Superiores no p.k. 14 + 590

Estas passagens superiores correspondem a duas estruturas similares que suportam ambos os sentidos de tráfego da auto estrada (um sentido por cada estrutura).

As estruturas são constituídas por 3 vãos isostáticos e o seu comprimento total é de 40,60 m. O tabuleiro original tem 11,50 m de largura e é constituído por 11 vigas por vão no sentido A e 7 vigas no sentido B.

Numa fase posterior e de forma a ampliar o número de faixas de rodagem, foram executadas duas estruturas com 7,25 m de largura, adjacentes às já existentes. Esta ampliação foi executada com 5 vigas.

Todas as vigas que constituem estas estruturas têm uma secção transversal em forma de I e são de betão pré-tensado.

As vigas apoiam em neoprenos que estão assentes em pórticos de betão armado intermédios e em encontros realizados através de uma solução de muro.

Na Figura 18 pode-se observar uma vista em planta destas passagens superiores e na Figura 19 a respetiva secção transversal. Na Figura 20 está identificada a nomenclatura utilizada para designar os elementos construtivos dos tabuleiros destas P.S.. Por último, a Figura 21 apresenta o alçado e uma vista inferior destas estruturas.

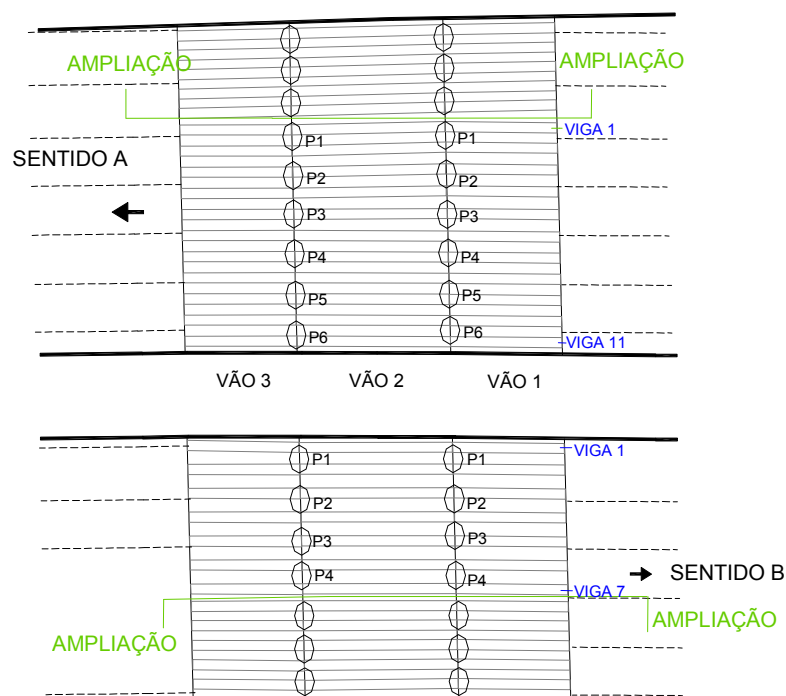


Figura 18: Vista em planta das passagens inferiores situadas no p.k. 14 + 590

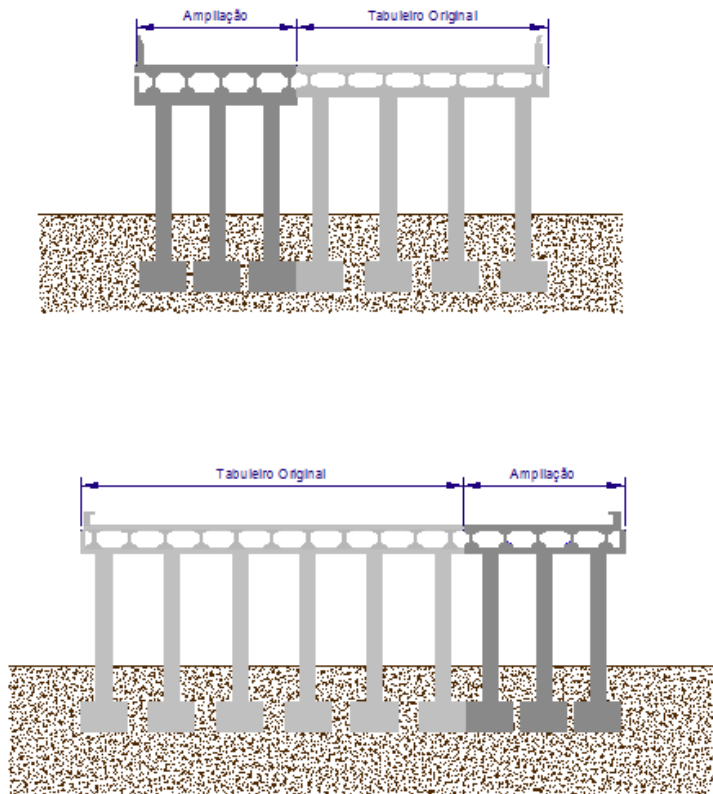


Figura 19: Secção transversal da passagem superiores no sentido A (em cima) e no sentido B (em baixo)

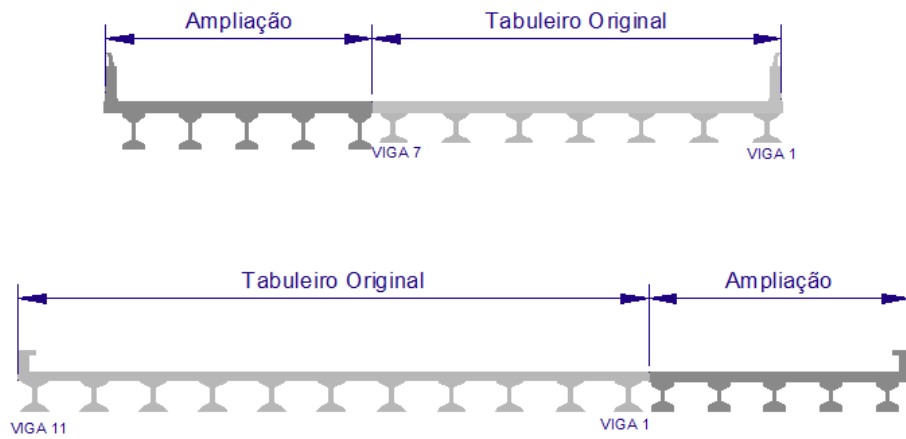


Figura 20: Pormenor da secção transversal do tabuleiro da passagem superior correspondente ao sentido B (em cima) e do tabuleiro da passagem superior relativo ao sentido A (em baixo).



Figura 21: Alçado e vista inferior das passagens inferiores

4.7.Passagens Superiores no p.k. 16 + 090

Estas passagens superiores foram construídas de acordo com projetos datados de 1972. Em 2004 realizaram-se obras de ampliação dos respectivos tabuleiros.

As estruturas são constituídas por três vãos de aproximadamente 20 m. Em cada um dos vãos o tabuleiro era originalmente constituído por treze vigas juntas entre si. A ampliação dos tabuleiros foi realizada utilizando sete vigas, no caso da estrutura correspondente ao sentido B, e quatro vigas, no caso da de sentido A. Sobre as vigas encontra-se apoiada uma laje de betão armado.

Na Figura 22 pode-se observar uma vista em planta e a secção longitudinal destas passagens superiores. Como se pode observar o traçado em planta das estruturas é curvo. Na Figura 23 observa-se uma secção transversal tipo do tabuleiro. Ambas as figuras foram extraídas dos projetos originais das estruturas facilitados pelo peticionário. Nas figuras apresentadas encontra-se também identificada a nomenclatura utilizada para designar os elementos estruturais.

Como se pode observar nas figuras todas as vigas que constituem o tabuleiro são pré-fabricadas e de betão pré-tensado com secção em I.

As vigas do tabuleiro apoiam, tanto nos encontros como nos apoios intermédios, sobre pórticos de betão armado.

Na Figura 25 pode ver-se uma vista de uma das passagens superiores onde são visíveis alguns dos aspetos acima referidos.

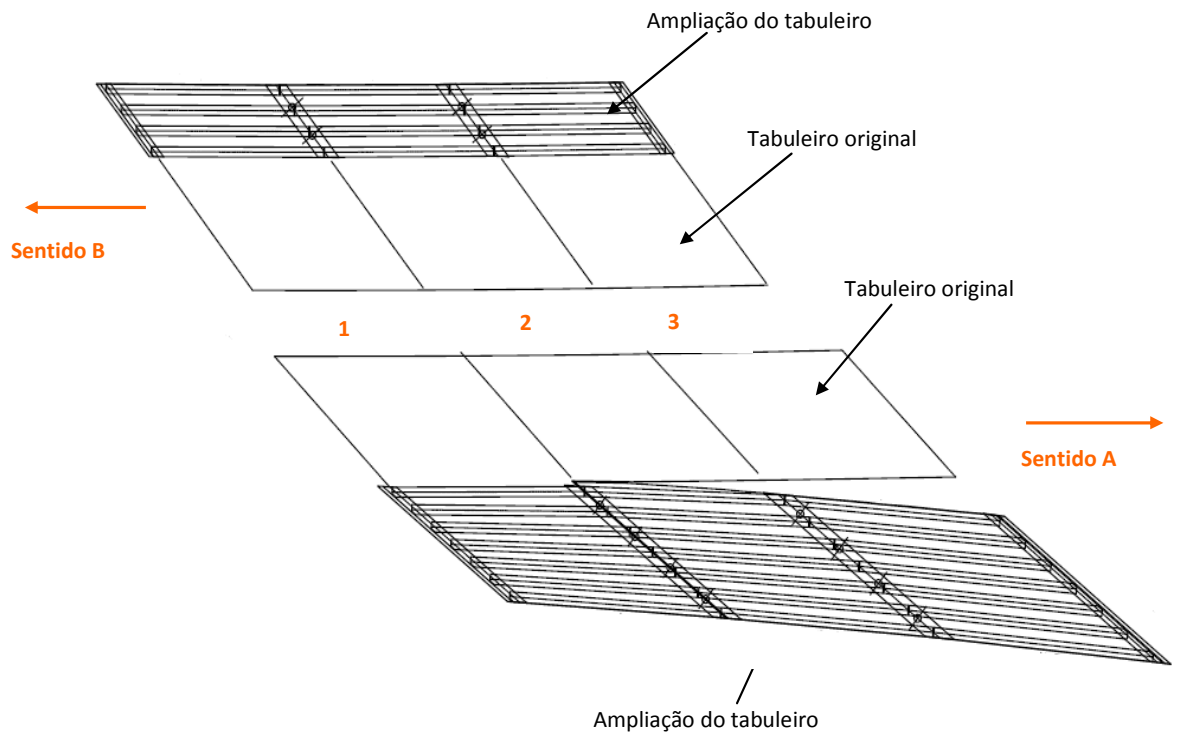


Figura 22: Vista em planta das passagens superiores situadas no p.k. 16 + 090

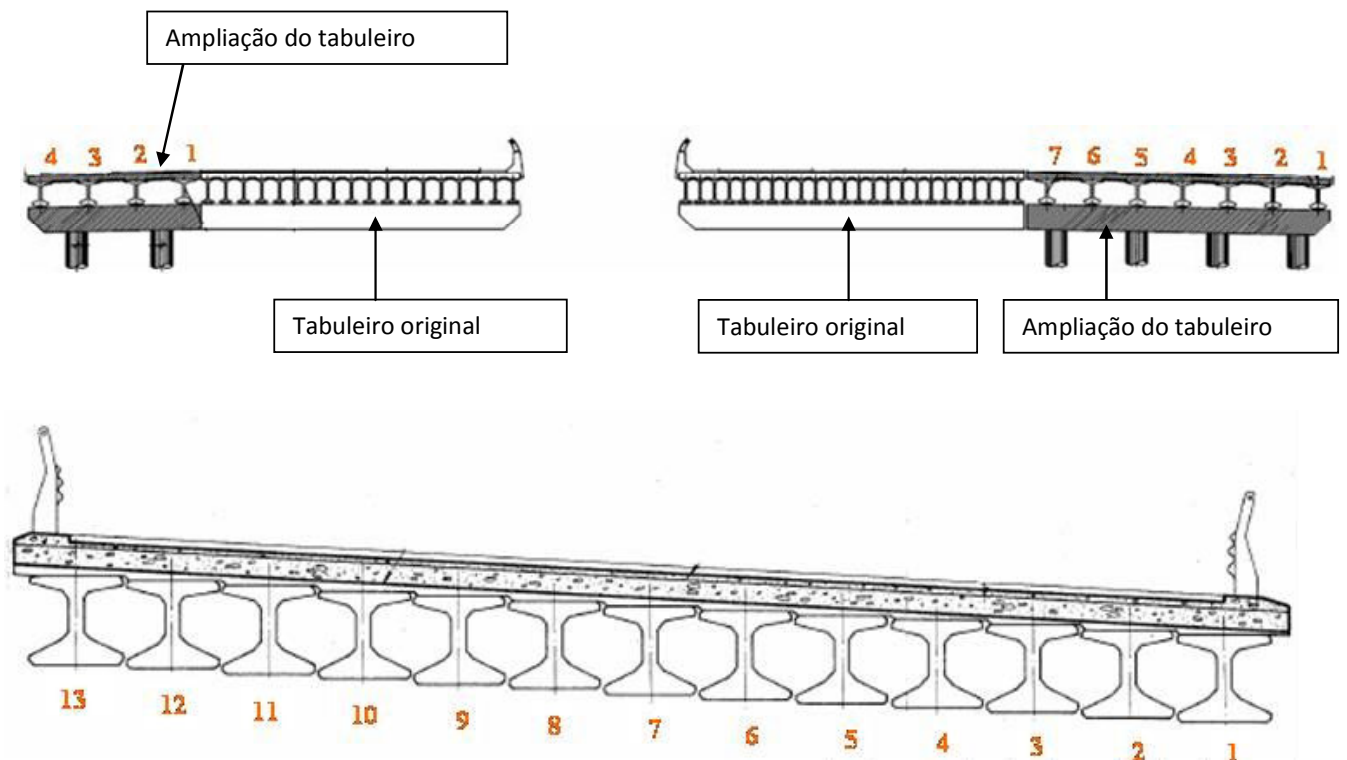


Figura 23: Secção transversal das passagens superiores



Figura 24: Alçado lateral



Figura 25: Vista inferior de uma das estruturas

4.8. Viadutos no p.k. 19 + 090

O projeto “*as built*” destes viadutos data de Julho de 1972.

Estas estruturas são constituídas por 10 vãos, cada um com aproximadamente 36 m a eixos de pilares. Cada vão é constituído por 5 vigas pré-fabricadas em forma de I de betão

armado pré-tensado, em que a armadura ativa é constituída por 16 bainhas de 12 cabos, cada um com 7 mm de diâmetro.

O tabuleiro de cada viaduto apoia sobre chapas de ferro fundido as quais por sua vez apoiam sobre os capitéis existentes sobre cada pilar. Os pilares têm uma geometria em planta retangular e a sua secção varia em função da altura.

A transmissão de cargas dos pilares ao solo é realizada através de sapatas.

Originalmente a estrutura apresentava uma junta de dilatação do tabuleiro sobre cada pilar. Atualmente apenas existem juntas nos encontros e sobre os pilares 3 e 7.

Nas figuras seguintes pode-se observar o traçado longitudinal e transversal dos viadutos, a geometria das vigas, bem como a nomenclatura utilizada no estudo desenvolvido.

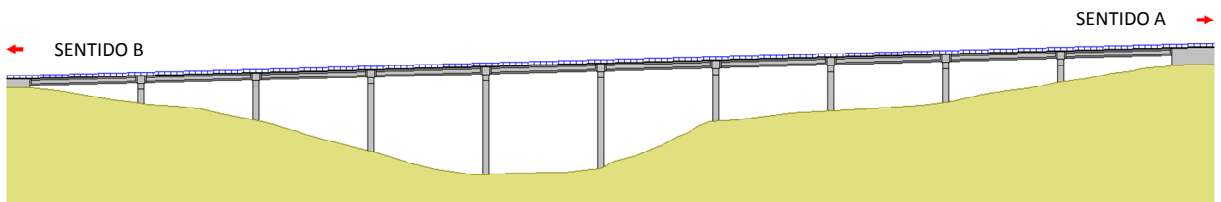


Figura 26: Secção longitudinal dos Viadutos localizados no p.k. 19 + 090

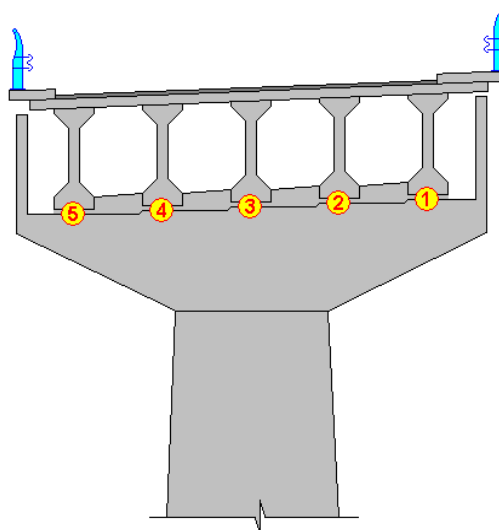


Figura 27: Secção transversal tipo e nomenclatura utilizada



Figura 28: Alçado dos Viadutos

4.9. Viadutos localizados no p.k. 29 + 390

O projeto “*as built*” destes viadutos (um em cada sentido de tráfego) está datado de Outubro de 1973.

Cada estrutura possui seis vãos de aproximadamente 36,5 m. Em cada um destes o tabuleiro é constituído por cinco vigas em I, sobre as quais apoia uma laje.

As vigas do tabuleiro são pré-fabricadas em betão armado e pré-tensado, sendo a armadura ativa constituída por 16 bainhas de 12 cabos com 7 mm de diâmetro. As vigas descansam sobre capitéis.

Os pilares são retangulares com secção variável e apoiam no terreno sobre sapatas. O traçado em planta das estruturas é reto. Por sua vez, o perfil transversal de cada viaduto apresenta uma inclinação variável ao longo da estrutura.

Existe alguma documentação relativa a trabalhos realizados nestes viadutos entre 1995 e 1998: reparações, supressão de juntas, reparação de pilares, capitéis e encontros.

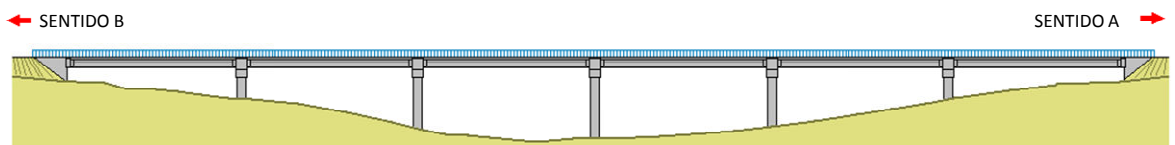


Figura 29: Secção longitudinal dos Viadutos localizados no p.k. 29 + 390

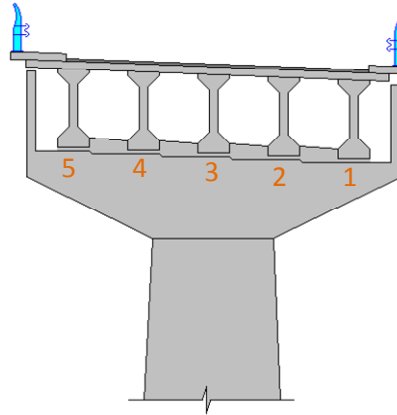


Figura 30: Secção transversal de um dos Viadutos



Figura 31: Alçado dos Viadutos

4.10. Viadutos situados no p.k. 32 + 090

Trata-se de dois viadutos independentes, para cada sentido de tráfego.

Cada estrutura possui 4 vãos com 36,5 m de luz, sendo cada vão formado por cinco vigas pré-fabricadas em obra e pré-esforçadas.

Tal como os restantes viadutos acima descritos, a armadura de pré-esforço longitudinal é constituída por 16 bainhas de 12 cabos com 7 mm de diâmetro. As vigas apoiam sobre capitéis de betão armado.

Os pilares têm uma geometria retangular variável e apoiam no terreno sobre sapatas.

Em planta, o traçado da estrutura é reto, ainda que exista um desnível entre os dois encontros, situando-se o encontro de entrada a uma cota superior relativamente ao de saída. Transversalmente, a estrutura apresenta uma inclinação lateral conforme é visível nas figuras que se seguem.

Durante a fase de recolha de documentação foi possível encontrar o projeto inicial, o qual datava de Outubro de 1973. Refira-se que em 1995 ambas as estruturas foram alvo de intervenções de reparação ao nível dos capitéis.

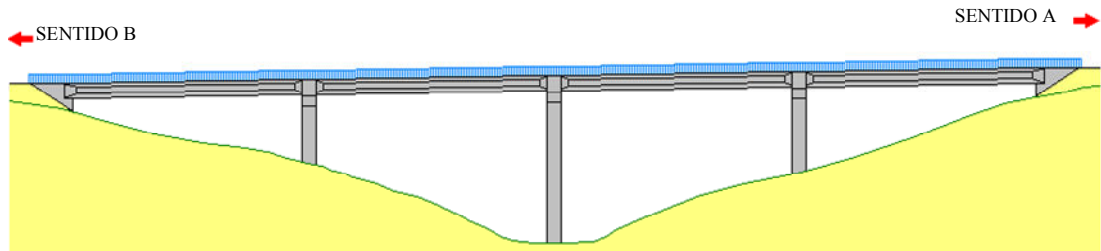


Figura 32: Alçado de um dos Viadutos situados no p.k. 32 + 090

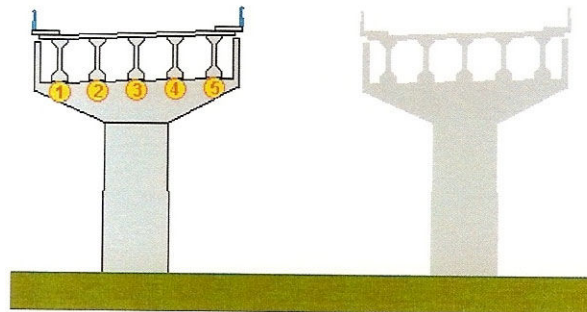


Figura 33: Secção transversal dos Viadutos



Figura 34: Vista inferior dos Viadutos

4.11. Passagens Superiores situadas no pk. 62 + 100

Cada uma destas passagens superiores (uma por cada sentido de tráfego) é constituída por três vãos isostáticos, com um comprimento total de 43,6 m.

Os tabuleiros são constituídos por vigas pré-fabricadas de betão pré-esforçado de secção em I.

Quer nos apoios intermédios quer nos encontros, as vigas apoiam em pórticos de betão armado. Refira-se que o apoio das vigas do tabuleiro da passagem superior correspondente ao sentido B é feito a meia secção.

Note-se que as estruturas têm um traçado em planta curvo, com peralta em direção ao interior da própria curva.

Na Figura 35 mostra-se uma vista em planta destas estruturas, incluindo-se também a nomenclatura utilizada para identificar cada elemento. A Figura 36 ilustra uma secção transversal tipo destas passagens superior. Por fim, na Figura 37 pode-se observar o alçado e uma vista inferior destas estruturas.

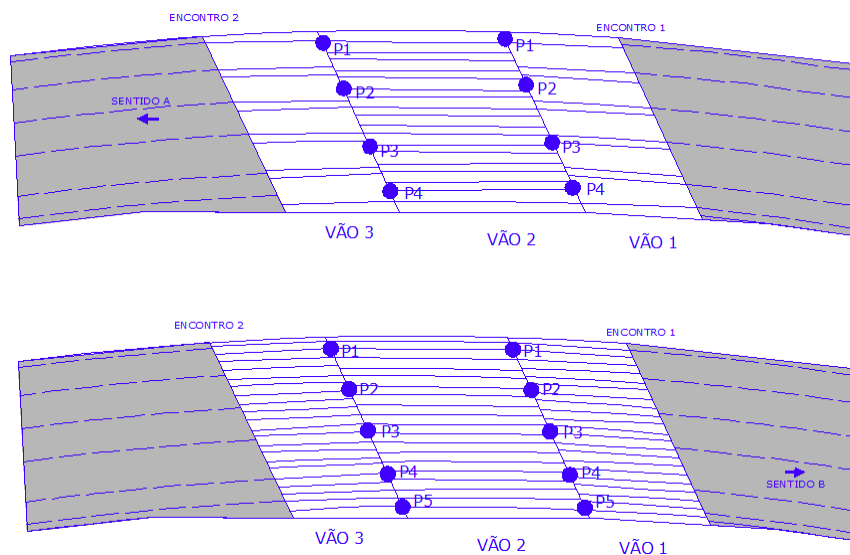


Figura 35: Vista em planta das passagens superiores localizadas no p.k. 62 + 100

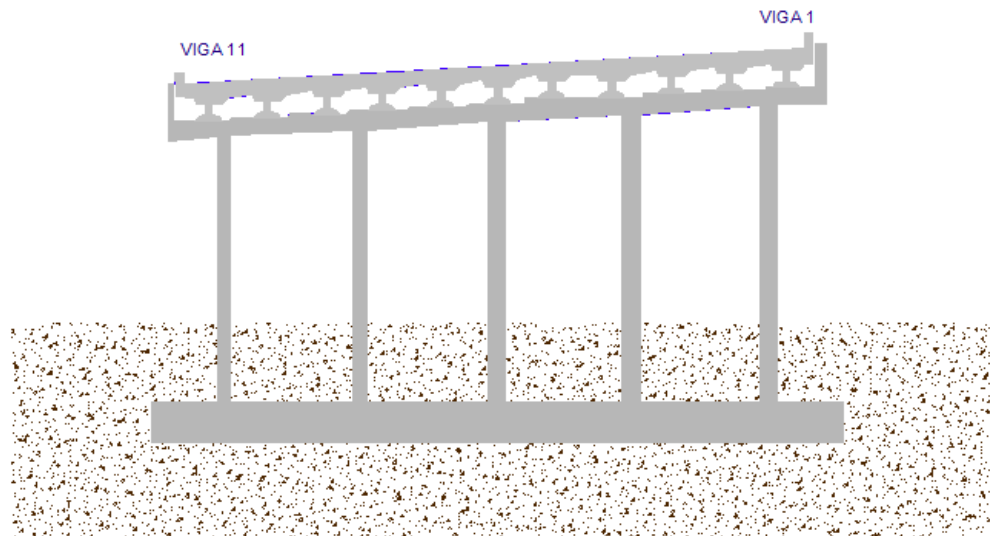


Figura 36: Secção transversal tipo das passagens superiores



Figura 37: Alçado e vista inferior de uma das passagens superiores

5. Planificar um estudo de durabilidade

Centrando agora a análise no estudo de durabilidade das estruturas pertencentes ao caso de estudo, neste capítulo irão ser definidos os pontos sensíveis de uma estrutura aos quais se deve prestar especial atenção.

Ainda que a análise das estruturas deva ser um trabalho interativo por contraposição de um trabalho sequencial, numa primeira abordagem podem-se estabelecer as seguintes etapas:

1. Revisão e análise da documentação técnica existente relativa à estrutura objeto de estudo;
2. Inspeção detalhada da estrutura, por parte de um técnico especialista;
3. Definição de um plano de abertura de janelas de inspeção na estrutura, supervisão e inspeção das mesmas;
4. Definição de um plano de ensaios *in situ* e de laboratório.

Seguidamente expõe-se detalhadamente cada uma destas fases.

5.1.Revisão da documentação técnica existente

Numa primeira fase deve-se recolher toda a informação possível sobre a estrutura em causa. Dessa informação deve constar, nomeadamente, o projeto original, o projeto *as built*, caso seja possível, o livro de obra, relatórios de manutenção e historial das intervenções efetuadas ao longo da vida da estrutura.

Na revisão desta documentação deve-se prestar a maior atenção para detetar possíveis pontos débeis da estrutura, tais como juntas de dilatação, reparações, apoios em consola curta.

Ao mesmo tempo que se compila a informação sobre a estrutura, dever-se-á fazer um enquadramento técnico da mesma, especialmente direcionado para a situação geográfica e os condicionantes subsequentes, referindo-nos especialmente à altitude e ao ambiente de exposição.

Nos casos em que falte informação materialmente relevante, pelo menos no que diz respeito à caracterização e manutenção da estrutura em estudo, dever-se-á realizar uma inspeção visual preliminar que permita uma primeira recolha de informação e caracterização do objeto de estudo, permitindo assim programar as fases de trabalho seguintes.

5.2. Inspeção detalhada da estrutura

Numa primeira fase as inspeções detalhadas têm como principal objetivo identificar todos os sintomas que sejam indicativos da degradação dos materiais constituintes dos vários elementos ou de um comportamento estrutural e / ou de apoios anómalo. Refira-se que estes últimos não serão objeto de análise detalhada na presente tese.

Note-se que a inspeção detalhada não deve ser limitada à observação de anomalias visíveis, devendo prestar-se especial atenção aos elementos que poderão potencialmente apresentar anomalias (não visíveis), nomeadamente o interior de vigas em caixão ou de vigas em V. Estes pontos devem ser analisados posteriormente mediante a abertura de janelas de inspeção ou utilizando métodos / aparelhos específicos para cada situação. No caso de viadutos de vigas em caixão, poder-se-á inspecionar o interior da viga se o mesmo for visitável.

Nesta inspeção deve-se verificar igualmente se as características da estrutura têm alguma influência na localização das anomalias. Por exemplo, através da existência de juntas de dilatação, de defeitos no sistema de drenagem da água, da possível influência da inclinação transversal e longitudinal do tabuleiro, etc..

Deste modo, importa que nesta inspeção seja recolhida toda a informação necessária para a planificação e realização das etapas seguintes: elaboração de um plano de abertura de janelas de inspeção e planificação dos ensaios em obra e de laboratório considerados pertinentes em cada caso.

Nas figuras seguintes mostram-se algumas das localizações mais suscetíveis de apresentarem anomalias. Os casos ilustrados têm a sua origem na degradação por corrosão das armaduras, que coincide com as zonas onde se produzem maiores

escorrências de água e, subsequentemente, maiores ciclos de humidade-secagem, propiciando o desenvolvimento dos processos de corrosão.



Figura 38: Escorrências em pilares e capitéis, provenientes da junta de dilatação existente no tabuleiro da obra de arte localizada no 12+718 sentido B



Figura 39: Deterioração da junta de dilatação, que propicia as escorrências de água e subsequente degradação dos materiais constituintes.



Figura 40: Deterioração da junta de dilatação e escorrências de água através da mesma.



Figura 41: Danos no tabuleiro do viaduto, situado no p.k. 19 + 090 sentido B, devido a escorrências de água pela cornija.



Figura 42: Danos em vigas interiores associados a filtrações de água através da laje do tabuleiro da estrutura sita no p.k. 3 + 590.



Figura 43: Danos em vigas causados por um sistema de drenagem em mau estado de conservação. Obra de arte localizada no p.k. 29 + 390 sentido B.

5.3. Elaboração de um plano de abertura de janelas de inspeção — Recolha de informação

A abertura de janelas de inspeção numa estrutura é uma fase fundamental na avaliação do seu estado de conservação.

As janelas de inspeção permitem recolher todos aqueles dados relativos à configuração estrutural da obra de arte que não estejam definidos na documentação técnica existente ou disponível sobre a estrutura e, ao mesmo tempo, permitem verificar outros aspetos relativos à durabilidade desta que são fundamentais para estabelecer o alcance, a origem e a repercussão estrutural dos danos de corrosão observados.

Deste modo, as janelas de inspeção devem permitir realizar as medições seguintes.

A. Determinação dos esquemas das armaduras e do seu diâmetro residual

Para determinar a configuração dos esquemas das armaduras, muitas vezes são apenas utilizadas sondas magnéticas. Porém, perante situações em que as armaduras estão dispostas em várias capas, as sondas só permitem caracterizar a que se encontra mais próxima da superfície. Adicionalmente, as sondas não permitem detetar a deterioração das armaduras, nem mesmo a origem desse tipo de fenómenos. Deste modo, o procedimento mais adequado consistirá na utilização de sondas magnéticas, combinada com a abertura de janelas de inspeção.

Para a medição do diâmetro nominal e/ou residual das armaduras deve-se utilizar uma craveira ou paquímetro com pelo menos 0.1 mm de exatidão. Na Figura 44 mostra-se uma vista de uma janela de inspeção realizada para determinar a configuração das armaduras num cachorro e medir a perda de secção nominal das mesmas.

As janelas de inspeção devem também permitir verificar o estado das armaduras em zonas em que a estrutura não apresenta quaisquer danos externos. Por exemplo, este método é particularmente útil para analisar as armaduras existentes em lajes ocultas pelo betuminoso ou mesmo estudar as armaduras de ligação existentes entre a laje e as vigas que constituem o tabuleiro superior da obra de arte.

Deve-se prestar especial atenção aos processos de corrosão em armaduras ativas que evoluem desfavoravelmente de forma rápida, fenómeno esse denominado como *corrosão sobre tensão*. Na Figura 45 mostra-se uma janela de inspeção numa estrutura em que os processos de corrosão na armadura ativa e sobre tensão já tiveram início. Na Figura 46 mostra-se uma vista de cabos de pré-esforço com corrosão.

B. Determinação do recobrimento geométrico das armaduras e a profundidade de betão carbonatado

A espessura de recobrimento e a profundidade de betão carbonatado podem ser medidos com uma fita métrica de 1 mm de precisão. Para determinar a

profundidade deve-se previamente aplicar uma solução de fenolftaleína³ sobre o betão deixado à vista após a abertura da janela de inspeção. Caso o betão não se encontre carbonatado, apresentará um pH superior a 9 (básico), pelo que em contacto com a solução de fenolftaleína apresentará uma coloração violeta. Caso o betão esteja carbonatado, perante a fenolftaleína não ocorre qualquer alteração da sua cor (veja-se a Figura 47).

Esta fase, além de permitir estabelecer a redução nas condições de segurança nominal da estrutura, através da determinação dos diâmetros residuais nas armaduras, pode também servir para realizar um diagnóstico preliminar sobre a origem dos processos de corrosão. Efetivamente, em casos como o da Figura 47, em que se observa a corrosão das armaduras sem que a profundidade de betão carbonatado tenha alcançado a posição das armaduras, poderá concluir-se que a origem mais provável das anomalias derive da presença de agentes agressivos, tais como iões cloreto existentes na massa de betão desde a fase de execução ou depositados desde o exterior.

Noutros casos a abertura destas janelas de inspeção pode também servir para validar a eficácia de reparações históricas realizadas na estrutura.



Figura 44: Vista de uma janela de inspeção realizada para determinar a configuração das armaduras e a sua secção residual.

³ O ensaio para a determinação da profundidade de betão carbonatado pode ser realizado com maior precisão em laboratório: previamente é extraído o carote de betão, o qual é ensaiado através do método Brasileiro (*split test*). Contudo, o apuramento *in situ*, desde que corretamente efetuado, costuma apresentar resultados com uma precisão considerável.



Figura 45: Início dos processos de corrosão na armadura ativa no viaduto localizado no p.k. 12 + 718 sentido B.



Figura 46: Rotura de alguns cabos de pré-esforço no viaduto localizado no p.k. 3 + 590 sentido A.



Figura 47: Medida in situ da profundidade de betão carbonatado numa janela de inspeção realizada na estrutura sita no p.k. 32 + 090 sentido A.

5.4. Realização de ensaios não destrutivos em obra

Tomando por base os resultados decorrentes das inspeções realizadas, deve-se proceder a um conjunto de ensaios não destrutivos em obra. Este tipo de ensaios permitirá reunir informação adicional e, subsequentemente, reduzir o número de ensaios destrutivos que possam vir a ser realizados na estrutura.

Entre os ensaios não destrutivos em obra destaca-se a utilização do PUNDIT, do esclerómetro de Smiths, o ensaio *pull-out* e o ensaio *pull-off*. De seguida apresenta-se uma breve descrição de cada um destes tipos de ensaios.

- (I) O uso do **Esclerómetro de Smith** consiste numa técnica não destrutiva para determinar a resistência à compressão do betão à superfície — veja-se a Figura 48.

Na maioria dos casos, uma forma eficiente de determinar a resistência à compressão do betão consiste em utilizar não só os resultados de ensaios com o esclerómetro mas, também, os resultados de uma campanha de extração de carotes. Nestas circunstâncias, para a calibração dos resultados obtidos na campanha realizada com o esclerómetro, apenas são necessários os resultados de ensaios à compressão do betão obtidos com base num número reduzido de carotes.

Também se pode utilizar o esclerómetro para avaliar a homogeneidade do betão em diferentes localizações. Deste modo, obtém-se informação sobre a resistência global do betão.



Figura 48: Esclerómetro

- (II) O ensaio *pull-out* consiste na relação entre a força necessária para extrair um parafuso ou outro objeto similar da massa de betão e a resistência à compressão do betão.

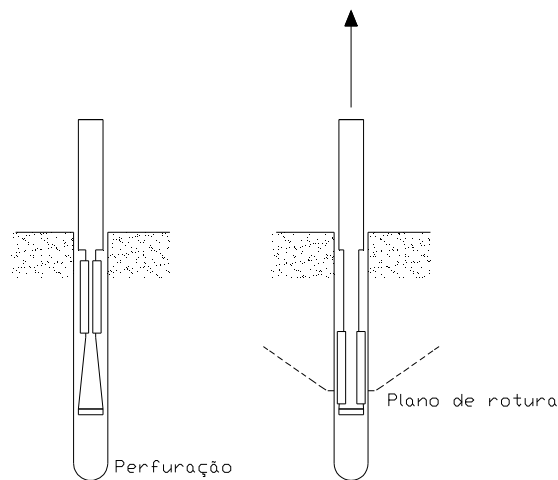


Figura 49: Ensaio *pull-out*

A partir do valor da força máxima obtida no ensaio e utilizando uma tabela de correlação empírica, obtém-se a resistência cúbica do betão. Note-se que os resultados alcançados estão apenas relacionados com a zona onde foi realizado o ensaio, i.e. este ensaio permite obter uma medida direta do valor da resistência localizada do betão.

- (III) O ensaio *pull-off* foi desenvolvido para medir a resistência do betão *in situ*, aplicando diretamente uma força de tração.

Para realizar este ensaio é colado um disco de aço à superfície de betão onde vai ser aplicada a carga. Através da colocação de um macaco e de um anel de reação, tracionasse a superfície de betão. A superfície de ruptura estará por baixo do betão tracionado.

Com base no diâmetro do disco de aço colocado na superfície de betão, é calculada a resistência nominal à tração do betão, a qual, por sua vez, permitirá determinar a resistência à compressão do betão utilizando tabelas de calibração adequadas.

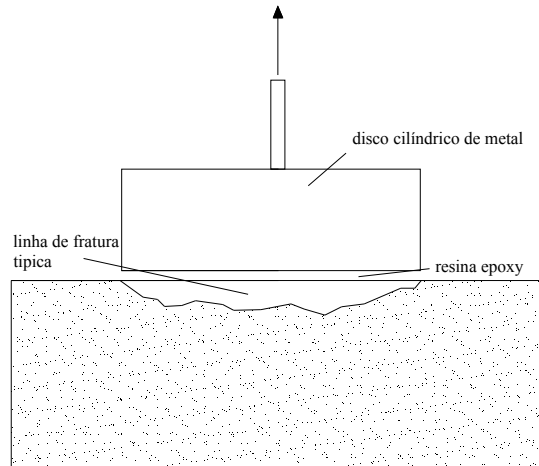


Figura 50: Ensaio *Pull-off*

Este método tem a vantagem de permitir facilmente a detecção de pequenas alterações na força de compressão. Adicionalmente, variações do betão, nomeadamente ao nível da dimensão dos agregados, não afetam significativamente a correlação entre a resistência nominal à tração e a resistência à compressão do betão.

Atente-se que devido às diferenças na compactação e cura do próprio betão, normalmente o betão na superfície do elemento costuma ser de uma qualidade inferior ao do interior do mesmo, pelo que os resultados obtidos através deste ensaio devem ser considerados conservadores.

Além dos métodos supra explicitados, refira-se ainda a possibilidade de estimar a resistência do betão através da medição da velocidade ultra sónica (PUNDIT). No entanto, este método deve ser usado conjuntamente com um método destrutivo, dado não proporcionar *per si* uma precisão fidedigna. Outro inconveniente deste método resulta da necessidade do elemento de betão objeto de estudo ter de estar acessível através das duas faces opostas, o que nem sempre é possível. Refira-se ainda que, para betões de alta resistência, a precisão deste método é substancialmente inferior, pelo que será aplicável apenas a um conjunto restrito de casos.

5.5. Campanha de ensaios em laboratório

Os resultados obtidos nas inspeções e na campanha de ensaios não destrutivos em obra permitem apurar a quantidade e os tipos de ensaios que serão necessários realizar em laboratório para poder excluir ou comprovar a origem das anomalias detetadas.

Apenas conhecendo com exatidão a origem, o estado atual e como poderão evoluir as anomalias, será possível estabelecer um diagnóstico adequado e, desta forma, recomendar as soluções de reparação e/ou reforço mais adequadas em cada caso.

Para a realização de ensaios em laboratório é necessário previamente proceder-se à extração de carotes (ensaio destrutivo) em diversos elementos constituintes da estrutura em estudo. A localização dos pontos de extração de carotes deve estar relacionada com os pontos de abertura de janelas de inspeção, de forma a permitir estabelecer-se uma relação entre o aspeto exterior do elemento, o estado das armaduras e as propriedades do betão. A Figura 51 pretende ilustrar o processo de extração de carotes num viaduto.

Destacam-se, de seguida, alguns dos ensaios mais relevantes para determinar a qualidade do betão.

A. Determinação da resistência à compressão do betão

Este processo é determinante para a avaliação do estado estrutural da obra de arte, uma vez que a resistência à compressão é um dos principais indicadores da qualidade/estado do betão. Dependendo da localização das estruturas podem aplicam-se, por exemplo, as normas UNE-EN 12504-1 [1] e UNE-EN 12390 [2], ASTM C42 -90 e ASTM C39-93a [6].

B. Determinação da porosidade, densidade, permeabilidade e conteúdo de cimento no betão

Estes parâmetros são indicadores da qualidade de execução do betão, assim como das características deste material potenciador da penetração de agentes agressivos no interior do elemento em estudo. Por exemplo, um betão com elevados índices de permeabilidade e porosidade é mais suscetível à entrada de dióxido de carbono e de água até ao interior da massa de betão, podendo alcançar a posição das armaduras. Note-se que a penetração de água pode ainda

implicar o arrastamento de sais e originar uma degradação precoce do betão caso esteja sujeita a ciclos gelo-degelo.

Podem aplicam-se, nomeadamente, as normas ASTM C-642:1997 (porosidade e densidade), UNE 83309:1990 (permeabilidade) [3] e BS 1881 part 6 / ASTM C1084 -92 (determinação da relação água/cimento).

C. Determinação do perfil de iões cloreto

Nos casos em que as anomalias por corrosão nas armaduras possam resultar da presença de iões cloreto na massa de betão, é fundamental determinar a concentração destes iões a diferentes profundidades. Deste modo, será possível estabelecerem-se elações sobre as condições de durabilidade das armaduras, bem como recomendar as medidas de reparação e/ou reforço mais adequadas para cada caso. Podem, aplica-se, por exemplo, as normas UNE 112010:1994 [4], BS 1881 part 6 ou AASHTO T260-84.

Note-se que num perfil tipo de cloretos, em que o agente agressivo penetrou no betão desde o exterior, por exemplo em resultado do uso de sais de degelo, a concentração de iões cloreto no betão é mais elevada à superfície, diminuindo de forma brusca em direção ao interior do elemento (veja-se o Gráfico 2: Relação entre a concentração de iões cloreto e a profundidade do elemento, num perfil tipo de cloretos.).

Existem ainda outros ensaios, como o da determinação de potenciais de corrosão, que podem proporcionar informação relevante quanto à previsível evolução deste tipo de processos. A sua aplicabilidade deverá ser avaliada caso a caso.

Perante situações em que se suspeite que a degradação dos materiais resulte de causas menos habituais, como por exemplo de um ataque de sulfatos ou de reações internas na própria massa do betão, dever-se-á proceder a outro tipo de ensaios, específicos para essas situações.



Figura 51: Extração de carotes no viaduto localizado no p.k. 19 + 090.

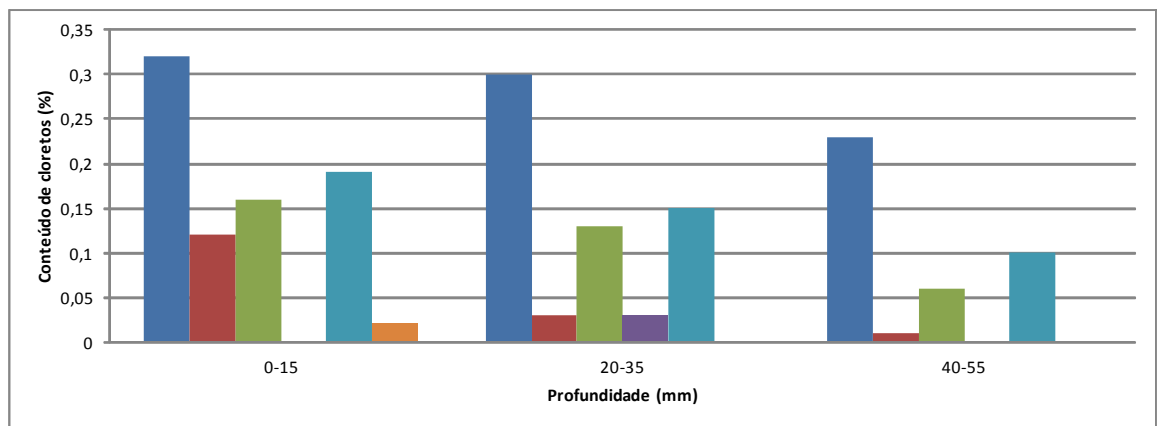


Gráfico 2: Relação entre a concentração de íons cloreto e a profundidade do elemento, num perfil tipo de cloretos.

6. Resultados e Discussão

Este capítulo visa demonstrar a metodologia aplicada no estudo das estruturas em questão e incidir sobre a análise dos resultados obtidos nos trabalhos de campo e em laboratório. Começa-se por apresentar a análise às patologias detetadas nas obras de arte do caso de estudo, separando esta análise em duas fases: uma primeira, correspondente às estruturas onde não se realizaram ensaios de laboratório complementares e uma segunda, onde se inclui a análise das demais estruturas. Por fim, analisa-se com maior detalhe os resultados dos ensaios de cloretos realizados nas amostras de betão que foram extraídas dos diversos elementos estruturais dos viadutos do caso de estudo.

Refira-se que o estudo de cada estrutura contemplou um processo prévio de recolha de informações que permitissem conhecer com maior detalhe cada estrutura, bem como compreender o respetivo historial de manutenção e reparações.

Após a recolha de informação, procedeu-se à inspeção visual detalhada das estruturas, sem meios especiais, de forma a comprovar a consistência da mesma, bem como obter informação adicional que permitisse planificar o estudo da estrutura.

Numa fase subsequente procedeu-se a inspeções principais que, para além de proporcionarem informação sobre o estado aparente da estrutura, permitiram também elaborar um plano de abertura de janelas de inspeção.

Com os resultados das inspeções principais, a análise do estado das armaduras e a medição da espessura de betão carbonatado, elaborou-se um plano de ensaios de laboratório e um plano de ensaios em obra (destrutivos e não destrutivos).

Na secção seguinte será detalhada toda a informação recolhida no caso de estudo. As conclusões e comentários serão incluídos no último capítulo.

6.1. Resultados da campanha de inspeções e ensaios

6.1.1. Resultados obtidos nas obras de arte não sujeitas a ensaios complementares.

As passagens superiores situadas nos p.p.k.k.s 0 + 000, 5 + 126, 14 + 590, 16 + 090 e 62 + 100 não foram objeto de ensaios complementares, por pedido expresso do dono de obra.

Os trabalhos desenvolvidos durante as fases de inspeção e de abertura de janelas revelaram que a intensidade das patologias observadas nestas obras de arte era muito inferior à que foi observada noutras estruturas pertencentes ao caso de estudo. No entanto, as anomalias observadas assumem uma importância significativa, uma vez que apresentam danos que afetam não só a segurança dos utilizadores da via, mas constituem também uma ameaça para pessoas e bens que circulem sob as estruturas, em virtude de eventuais desprendimentos de betão que possam ocorrer. De seguida descrevem-se com maior detalhe as principais anomalias detetadas nestas obras de arte.

Foram observadas manchas de escorrências de água nos encontros, nos apoios intermédios (em todas as estruturas exceto na situada no p.k. 5 + 126), na face lateral e banzo inferior das vigas exteriores de cada vão sobretudo nos pontos de menor cota do tabuleiro e nas vigas exteriores de cada vão. Algumas destas escorrências tinham sido originadas pela presença de gárgulas sem qualquer tubo de queda ou pelo comprimento insuficiente destes.

Constatou-se também que os encontros apresentavam, pontualmente, fissuras verticais de abertura inferior a 0,3 mm e manchas acastanhadas que indicavam que, possivelmente, fenómenos de corrosão das armaduras presentes na massa do betão se estavam a desenvolver. Na face inferior dos capitéis dos apoios intermédios da obra de arte também se observou a mesma anomalia relativa às manchas de cor acastanhada.

Nas vigas extremas, de menor cota do tabuleiro, observaram-se zonas de destacamento de betão, coincidentes com zonas de escorrências de água proveniente do tabuleiro. Nestas zonas procedeu-se à abertura de janelas de inspeção para verificar o estado da armadura, tendo-se também realizado ensaios de carbonatação, através da aplicação de uma dissolução de fenolftaleína na face recém-picada do betão.

Na Figura 52 e na Figura 53 é visível uma zona afetada com escorrências de água numa viga extrema, bem como os resultados da abertura da janela de inspeção.



Figura 52: Escorrências de água e o estado do banzo inferior da viga (face exterior)



Figura 53: Estado da armadura na zona com escorrências. Armadura passiva com corrosão intensa e armadura ativa com indícios de corrosão (sem perda de secção nominal).

Como se pode observar as armaduras passivas da viga apresentam corrosão intensa e perda de secção nominal, existindo também dois cabos de pré-esforço com corrosão. O ensaio de carbonatação revelou que o betão se encontrava carbonatado até à posição das armaduras passivas, aparentemente devido à fissuração existente e ao destacamento do betão, e que a armadura ativa se apresentava numa zona de betão não carbonatada, não obstante apresentar corrosão. Este último aspeto, por sua vez, deu desde logo indícios em como os processos de corrosão poderiam não ter a sua origem na carbonatação do betão, conforme mais tarde se veio a confirmar.

Nas cabeças das vigas observou-se, em vários elementos, escorrência de água e, pontualmente, destacamento do betão, o qual deixou a armadura exposta com corrosão intensa e perda de secção nominal. Esta anomalia pode ser observada na Figura 54 e na Figura 55.



Figura 54: Escorrência de água na cabeça de uma viga junto a um dos encontros, sob uma junta de dilatação.



Figura 55: Detalhe do destacamento do betão e corrosão das armaduras, numa zona de apoio intermédio sob uma junta de dilatação.

Nos pilares e capitéis dos apoios intermédios observaram-se escorrências de águas, manchas de cor acastanhada e acumulação de sujidade. Realizaram-se algumas janelas de inspeção para verificar o estado das armaduras e os resultados, ainda que um pouco díspares, revelaram que o estado da armadura contida no betão estava diretamente relacionado com a intensidade das escorrências de água observada. Ou seja, se as escorrências apresentam pouca intensidade, as armaduras encontram-se em bom estado (sem indícios de corrosão). Ao invés, se as escorrências são intensas, a armadura pode chegar a apresentar corrosão e perda de secção nominal. Cabe destacar que, salvo casos pontuais onde se executaram janelas de inspeção em zonas fissuradas e/ou com destacamento de betão, não foram observados casos em que a profundidade de betão carbonatado alcançasse a posição das armaduras observadas nas janelas de inspeção.

Na Figura 56, na Figura 57, na Figura 58 e na Figura 59 podem-se observar algumas das anomalias acima descritas.



Figura 56: Estado de um capitel de um pórtico intermédio.



Figura 57: Vista de uma janela de inspeção cujas armaduras apresentavam corrosão (sem perda de secção).



Figura 58: Esquina da face lateral com a inferior com corrosão de um capitel, cuja armadura apresenta corrosão.



Figura 59: Armaduras de um pilar com picaduras.

Apresentam-se de seguida alguns dos dados recolhidos na campanha de abertura de janelas de inspeção. Saliente-se que, não obstante terem sido realizadas janelas de inspeção na laje das obras de arte, os resultados correspondentes não serão apresentados, uma vez que a armadura superior do elemento não apresentava qualquer indício de anomalias e a espessura do betão carbonatado era de aproximadamente 0 mm.

De seguida apresentam-se tabelas e gráficos relativos à informação recolhida em obra nas estruturas situadas no p.k. 0 + 000.

Carbonatação (mm)	Média	Desvio Padrão	Recobrimento (mm)	Média	Desvio Padrão
Inferior	14,00	5,83	Inferior	44,50	6,60
Lateral	5,00	0,00	Lateral	56,43	9,88
			Superior	32,00	7,48

Tabela 2: Armaduras passivas em vigas das estruturas situadas no p.k. 0 + 000.

Carbonatação (mm)	Média	Desvio Padrão	Recobrimento (mm)	Média	Desvio Padrão
Inferior	4,50	4,43	Inferior	43,00	4,47
Lateral	15,00	0,00	Lateral	52,50	18,93
			Superior	37,50	3,54

Tabela 3: Armaduras ativas em vigas das estruturas situadas no p.k. 0 + 000.

Carbonatação (mm)	Média	Desvio Padrão	Recobrimento (mm)	Média	Desvio Padrão
Inferior	7,50	3,54	Inferior	34,17	2,89
Lateral	10,00	5,77	Lateral	43,57	7,32
			Superior	35,00	0,00

Tabela 4: Armadura de capitéis das estruturas situadas no p.k. 0 + 000.

Carbonatação (mm)	Média	Desvio Padrão	Recobrimento (mm)	Média	Desvio Padrão
Lateral	1,00	1,41	Lateral	40,00	3,08

Tabela 5: Armadura de pilares das estruturas situadas no p.k. 0 + 000.

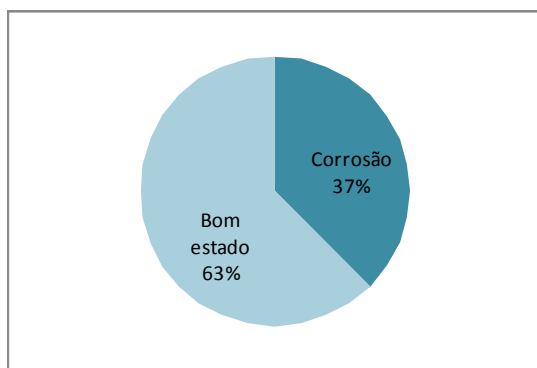


Gráfico 3: Estado das armaduras passivas (vigas), das estruturas situadas no p.k. 0 + 000.

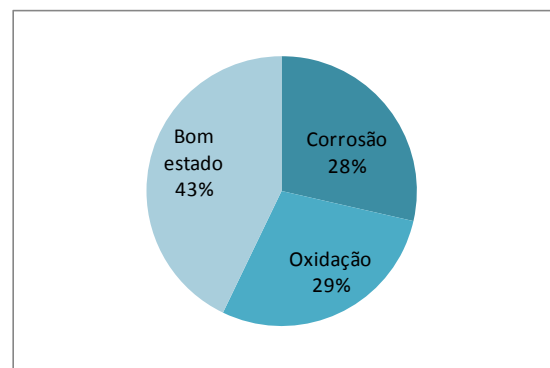


Gráfico 4: Estado das armaduras ativas (vigas), das estruturas situadas no p.k. 0 + 000.

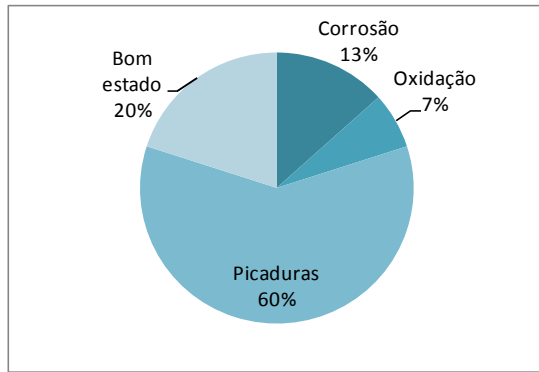


Gráfico 5: Estado das armaduras nos capitéis, das estruturas situadas no p.k. 0 + 000.

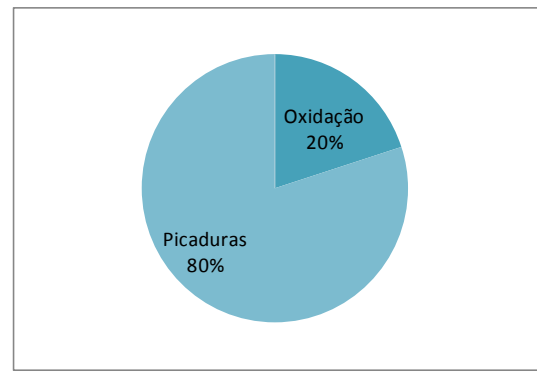


Gráfico 6: Estado das armaduras nos pilares, das estruturas situadas no p.k. 0 + 000.

Relativamente à estrutura situada no p.k. 5 + 126, note-se que esta estrutura é de betão armado e que apenas foram objeto de estudo os arcos, pelo que apenas são apresentados os resultados respeitantes a esses elementos.

Carbonatação (mm)	Média	Desvio Padrão	Recobrimento (mm)	Média	Desvio Padrão
Inferior	30,00	31,22	Inferior	38,33	25,17
Lateral	18,33	16,58	Lateral	44,00	16,42
			Superior	35,00	24,07

Tabela 6: Armaduras nos arcos da estrutura situada no p.k. 5 + 126.

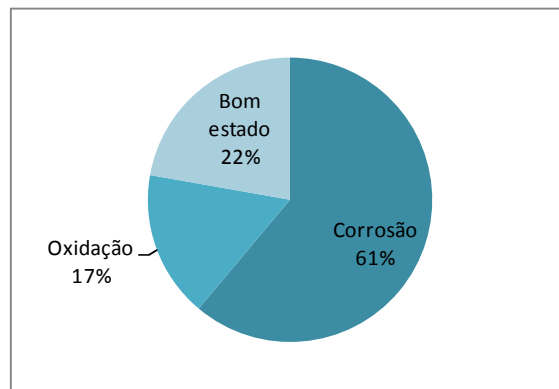


Gráfico 7: Estado das anomalias detetadas nas armaduras da estrutura situada no p.k. 5 + 126.

De seguida apresentam-se tabelas e gráficos relativos à informação recolhida em obra nas estruturas situadas no p.k. 14 + 590.

Carbonatação (mm)	Média	Desvio Padrão
Inferior	9,07	5,01
Lateral	12,69	14,09

Recobrimento (mm)	Média	Desvio Padrão
Inferior	37,38	9,11
Lateral	41,88	11,38
Superior	31,25	5,67

Tabela 7: Armaduras ativas em vigas das estruturas situadas no p.k. 14 + 590.

Carbonatação (mm)	Média	Desvio Padrão
Lateral	9,11	3,48

Recobrimento (mm)	Média	Desvio Padrão
Inferior	0,00	0,00
Lateral	14,11	6,86

Tabela 8: Armaduras passivas em vigas das estruturas situadas no p.k. 14 + 590.

Carbonatação (mm)	Média	Desvio Padrão
Inferior	20,00	18,71
Lateral	25,71	27,09

Recobrimento (mm)	Média	Desvio Padrão
Inferior	16,25	6,71
Lateral	54,64	25,87

Tabela 9: Armadura de capitéis das estruturas situadas no p.k. 14 + 590.

Carbonatação (mm)	Média	Desvio Padrão
Lateral	20,67	15,10

Recobrimento (mm)	Média	Desvio Padrão
Lateral	35,00	15,71

Tabela 10: Armadura de pilares das estruturas situadas no p.k. 14 + 590.

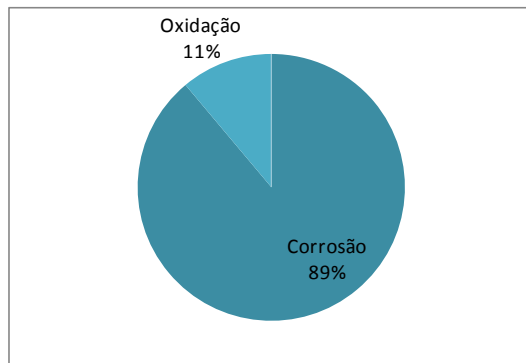


Gráfico 8: Estado das armaduras passivas (vigas), das estruturas situadas no p.k. 14 + 590.

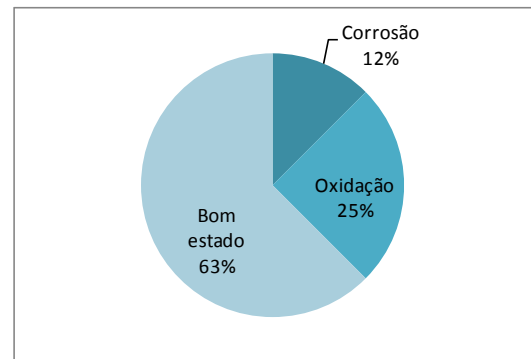


Gráfico 9: Estado das armaduras ativas (vigas), das estruturas situadas no p.k. 14 + 590.

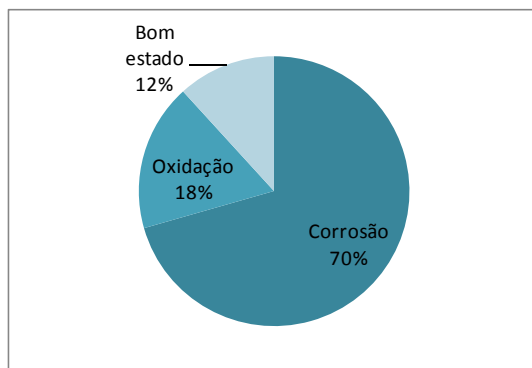


Gráfico 10: Estado das armaduras nos capitéis, das estruturas situadas no p.k. 14 + 590.

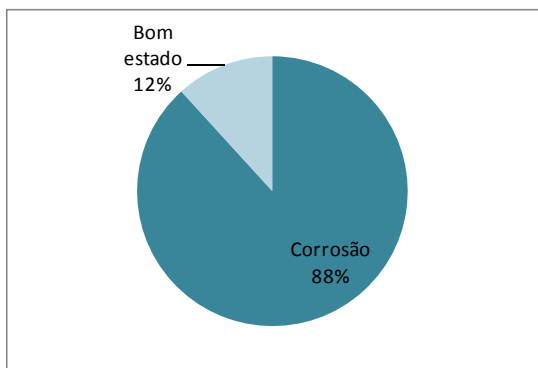


Gráfico 11: Estado das armaduras nos pilares, das estruturas situadas no p.k. 14 + 590.

Na passagem superior situada no p.k. 16 + 090 apenas as vigas dos tabuleiros foram objeto do estudo de durabilidade. Seguidamente apresentam-se os resultados obtidos.

Carbonatação (mm)	Média	Desvio Padrão	Recobrimento (mm)	Média	Desvio Padrão
Inferior	19,60	12,36	Inferior	7,20	3,11

Tabela 11: Armaduras ativas em vigas das estruturas situadas no p.k. 16 + 090.

Carbonatação (mm)	Média	Desvio Padrão	Recobrimento (mm)	Média	Desvio Padrão
Inferior	9,50	3,11	Inferior	18,75	11,06

Tabela 12: Armaduras passivas em vigas das estruturas situadas no p.k. 16 + 090.

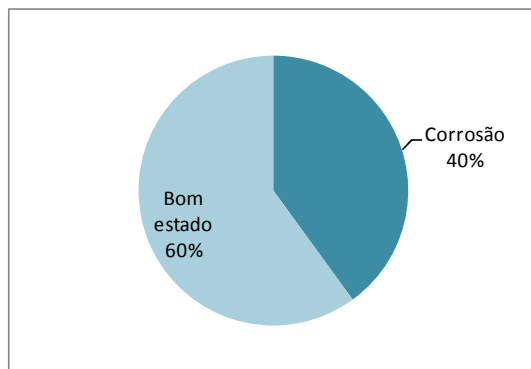


Gráfico 12: Estado das armaduras ativas (vigas), das estruturas situadas no p.k. 16 + 090.

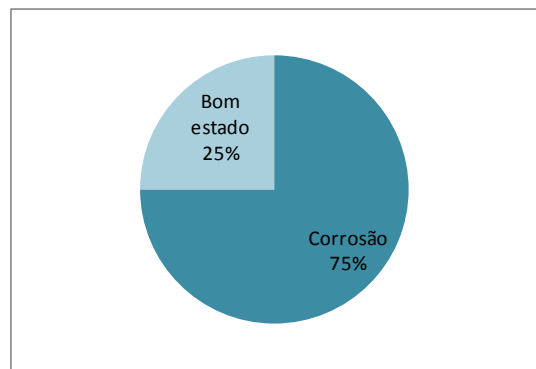


Gráfico 13: Estado das armaduras passivas (vigas), das estruturas situadas no p.k. 16 + 090.

Nas tabelas seguintes apresentam-se os valores médios e os desvios padrões da carbonatação e da espessura do recobrimento determinados a partir das inspeções e ensaios em obra realizados na estrutura localizada no p.k. 62 + 100.

Carbonatação (mm)	Média	Desvio Padrão	Recobrimento (mm)	Média	Desvio Padrão
Inferior	7,86	6,36	Inferior	21,09	10,32
Lateral	4,75	4,35	Lateral	39,42	9,54
			Superior	50,00	8,12

Tabela 13: Armaduras passivas em vigas das estruturas situadas no p.k. 62 + 100.

Carbonatação (mm)	Média	Desvio Padrão	Recobrimento (mm)	Média	Desvio Padrão
Inferior	10,86	10,78	Inferior	38,13	7,51
Lateral	13,14	17,20	Lateral	49,63	7,67
			Superior	44,25	5,06

Tabela 14: Armaduras ativas em vigas das estruturas situadas no p.k. 62 + 100.

Carbonatação (mm)	Média	Desvio Padrão	Recobrimento (mm)	Média	Desvio Padrão
Inferior	15,67	15,04	Inferior	42,50	15,35
Lateral	21,00	3,61	Lateral	42,00	4,55

Tabela 15: Armadura de capitéis das estruturas situadas no p.k. 62 + 100.

Carbonatação (mm)	Média	Desvio Padrão	Recobrimento (mm)	Média	Desvio Padrão
Lateral	12,71	11,41	Lateral	41,71	8,28

Tabela 16: Armadura de pilares das estruturas situadas no p.k. 62 + 100.

Os gráficos seguintes são relativos à informação recolhida sobre o estado atual dos diversos elementos estruturais objetos de análise durante o estudo efetuado.

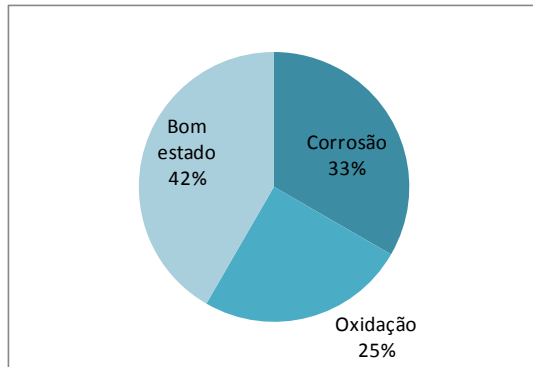


Gráfico 14: Estado das armaduras passivas (vigas), das estruturas situadas no p.k. 62 + 100.

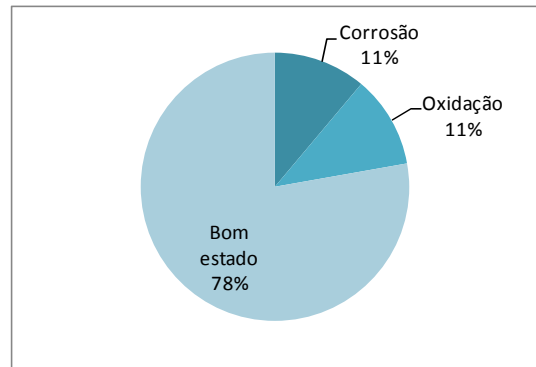


Gráfico 15: Estado das armaduras ativas (vigas), das estruturas situadas no p.k. 62 + 100.

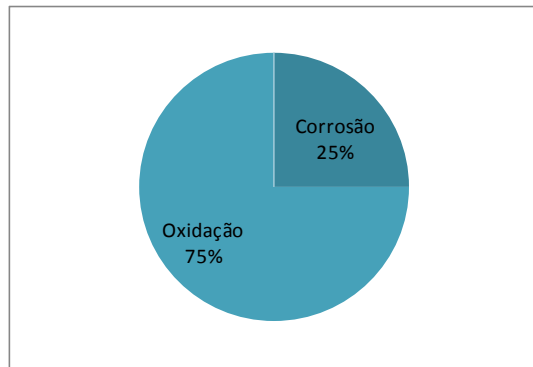


Gráfico 16: Estado das armaduras nos capitéis, das estruturas situadas no p.k. 62 + 100.

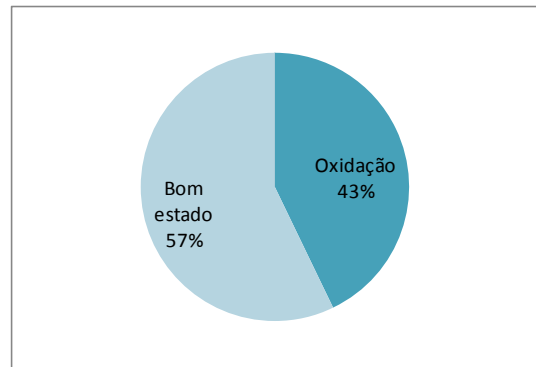


Gráfico 17: Estado das armaduras nos pilares, das estruturas situadas no p.k. 62 + 100.

6.1.2. Resultados obtidos nas restantes obras de artes

O tipo de anomalias detetadas nestas estruturas é similar ao já descrito no ponto anterior. No entanto, a sua intensidade e o seu alcance é, em todos os casos, muito superior.

Constatou-se que as vigas exteriores apresentavam sinais de que os processos de corrosão se estariam a desenvolver no seu interior. Em alguns casos, como os que se expõem nas figuras seguintes, esta corrosão originou destacamentos importantes do betão de recobrimento na face inferior da viga. Esta anomalia, além de perigosa pelo facto de poder originar desprendimentos, favorece a evolução dos processos de corrosão das armaduras. Por sua vez, as vigas interiores apresentavam danos pontuais, normalmente associados à presença de tubos de drenagem com um comprimento insuficiente,

originando desta forma escorrências através face lateral das vigas. Observou-se também que as zonas de apoio sob juntas do tabuleiro apresentavam danos consideráveis.



Figura 60: Fissuração da face inferior e longitudinal da viga exterior, quer em zonas reparadas como na face original.



Figura 61: Detalhe da Figura 60, com fissuras na zona reparada.



Figura 62: Destacamento do betão de recobrimento das armaduras.



Figura 63: Estado da zona de apoio.

Ao contrário das estruturas apresentadas no ponto 6.1.1., estas apresentavam sinais claros de que a corrosão de armaduras também se estava a desenvolver em capitéis e pilares. A campanha de abertura de janelas de inspeção nestes elementos revelou que as armaduras tinham, em muitos casos, uma redução significativa de secção nominal e que, à exceção das zonas fissuradas, a espessura de betão carbonatado não alcançava a posição das armaduras. Adicionalmente, as armaduras apresentavam também picaduras.

Saliente-se ainda que as anomalias detetadas tinham particular incidência nas zonas de escorrências de águas provenientes da calçada.



Figura 64: Estado de um pilar de uma das estruturas.



Figura 65: Detalhe de uma zona em bom estado.

Apesar das armaduras apresentarem, de forma generalizada, perdas significativas de secção nominal em determinadas localizações, conforme é visível na Figura 64, os processos de corrosão não causaram a deterioração homogênea das armaduras, existindo desta forma zonas onde os varões estavam, aparentemente, em bom estado (Figura 65).



Figura 66: Vista de um capitel com escorrências de água e manchas de corrosão.



Figura 67: Outro capitel com escorrências de água e manchas de corrosão.

Perante a abertura de janelas de inspeção no mesmo elemento mas com localizações distintas — em zonas onde se observaram indícios claros de escorrências de água e zonas progressivamente mais afastadas — constatou-se que a localização das escorrências de água coincidia com a zona onde as armaduras apresentavam anomalias mais graves. Na Figura 68 apresentam-se algumas fotografias que demonstram os resultados deste procedimento.



Figura 68: Três janelas de inspeção realizadas numa viga exterior da estrutura localizada no p.k. 3 + 590: uma em zona com escorrências de água e as restantes progressivamente mais afastadas da primeira. Pormenor da terceira janela de inspeção.

Na Figura 68 é possível comprovar-se a evolução das anomalias em zonas próximas de escorrências: na primeira fotografia podem-se observar os cabos de pré-esforço com corrosão intensa, perda de secção nominal e rotura de alguns desses cabos. Na segunda fotografia a bainha de pré-esforço apresenta corrosão intensa e os cabos também

apresentam corrosão, mas sem perda de secção. Nas duas últimas imagens, relativas à janela de inspeção mais afastada da zona onde se observaram escorrências, pode-se verificar que a bainha está em bom estado e os cabos não apresentam quaisquer indícios de oxidação, encontrando-se, por isso, em bom estado.

Ao contrário das outras estruturas da secção 6.1.1, nestas os trabalhos não se limitaram simplesmente a inspeção e abertura de janelas de inspeção. Tal como referido anteriormente, estas estruturas do caso de estudo apresentavam danos intensos por corrosão, pelo que se entendeu submetê-las a ensaios complementares.

Para se determinar a localização dos pontos de extração de carotes tiveram-se em consideração os seguintes critérios:

- As anomalias exteriores observadas;
- Os resultados da análise das janelas de inspeção; e,
- O tipo de ensaio a realizar.

Considerando a informação recolhida até àquela fase e no âmbito do estudo complementar que seria levado a cabo, considerou-se que os ensaios a realizar em laboratório seriam os seguintes:

- I. Ensaios a compressão simples de uma amostra de betão representativa de:
 - a) Vigas
 - b) Pilares
 - c) Capitéis
 - d) Lajes
- II. Rotura à tração indireta (*split test*) para ensaios de carbonatação em laboratório,
- III. Ensaio de penetração de água,
- IV. Ensaios de porosidade do betão,
- V. Densidade do betão,
- VI. Conteúdo de cimento,
- VII. Perfil de iões cloreto.

Após a determinação da posição das armaduras através da utilização de um pacómetro, foram extraídos os carotes através de uma sonda rotativa com coroas de 75mm, 100mm e 120 mm de diâmetro interior, em função do tipo de ensaios a realizar.

Seguidamente mostram-se figuras que ilustram o processo de extração de carotes.



Figura 69: Detecção das armaduras, através da utilização de um pacómetro.



Figura 70: Extração de um carote num pilar.



Figura 71: Extração de um carote numa viga.

De seguida apresentam-se os resultados da análise aos ensaios realizados, com exceção para os referentes aos perfis de iões cloreto, os quais serão abordados no capítulo 6.1.2.1.

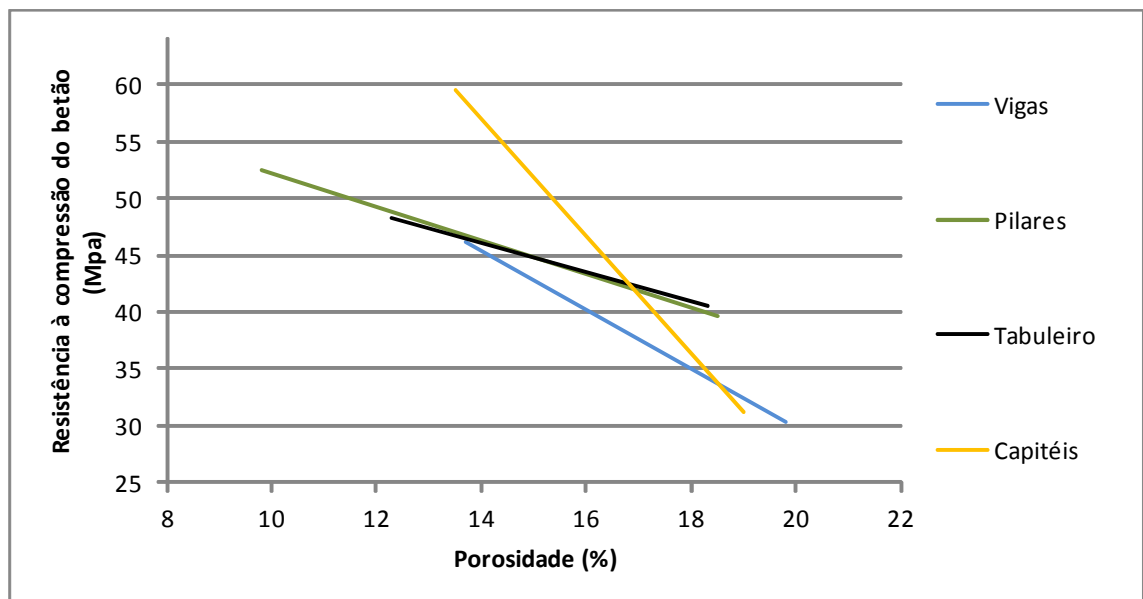


Gráfico 18: Regressões lineares entre a porosidade e a resistência à compressão do betão, por tipo de elemento.

O Gráfico 18 resulta do ajustamento linear dos valores da porosidade e da resistência à compressão do betão medidos em cada tipo de elemento de cada estrutura. Refira-se que este ajustamento visa apenas evidenciar a linha de tendência dos dados obtidos, não obstante a estas regressões lineares estimadas corresponderem coeficientes de determinação (R^2) baixos, i.e. inferiores a 0,6. No capítulo 1 do Anexo encontra-se informação mais detalhada acerca dos resultados dos ensaios de laboratório efetuados.

A análise de este gráfico permite verificar que, os valores para a resistência à compressão do betão são, em todos os casos, superior a 30 Mpa e que a dispersão dos resultados é elevada para todos os elementos. Os valores da porosidade são também bastante dispares e, em alguns casos elevada.

6.1.2.1. Resultados obtidos nos ensaios de determinação da concentração de iões cloreto

Conforme referido no ponto 6.1.2, considerou-se necessário determinar o perfil de cloretos quer em elementos armados (capitéis, tabuleiro e pilares) como em elementos pré-esforçados (vigas). O objetivo destes ensaios consistiu, por um lado, em determinar a concentração de iões cloreto em função da distância à face exterior no elemento em análise e, por outro lado, averiguar se estes iões estavam presentes na massa do betão ou se tinham sido introduzidos nesta por fatores externos (saís de degelo, etc.). Os resultados destes ensaios seriam fundamentais para a análise da viabilidade de uma possível reparação, bem como na escolha do tipo de reparação a realizar.

De acordo com o Eurocódigo EN 206-1:2000, a concentração máxima admissível de iões cloreto na massa do betão (na posição das armaduras) varia em função do tipo de uso do betão, conforme Tabela 17.

Tipo de utilização do Betão	Concentração máxima de Cl⁻ por massa de cimento
Betão não armado com armaduras de aço	1,00%
Com armaduras passivas	0,40%
Com armaduras ativas	0,20%

Tabela 17: Limites à concentração de iões cloreto na massa do betão impostos pela norma EN 206-1 2000 (*Concrete Part 1: Specification, performance production and conformity*)

De seguida apresentam-se os resultados obtidos para cada elemento estrutural em todas as estruturas que constituem o caso de estudo e que foram objeto de uma campanha de ensaios de laboratório, sem que sejam identificados individualmente os carotes apresentados em cada gráfico, uma vez que se pretende dar uma visão global dos resultados obtidos. No capítulo 2 do Anexo encontram-se detalhados os resultados dos ensaios de determinação da concentração de iões cloreto efetuados, por cada elemento de cada estrutura.

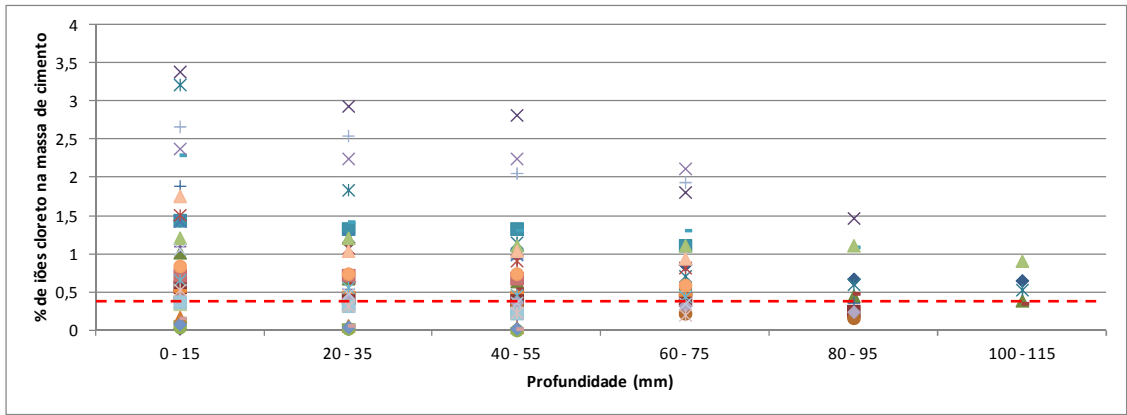


Gráfico 19: Perfil de íons cloreto dos carotes retirados na laje do tabuleiro das estruturas pertencentes ao caso de estudo

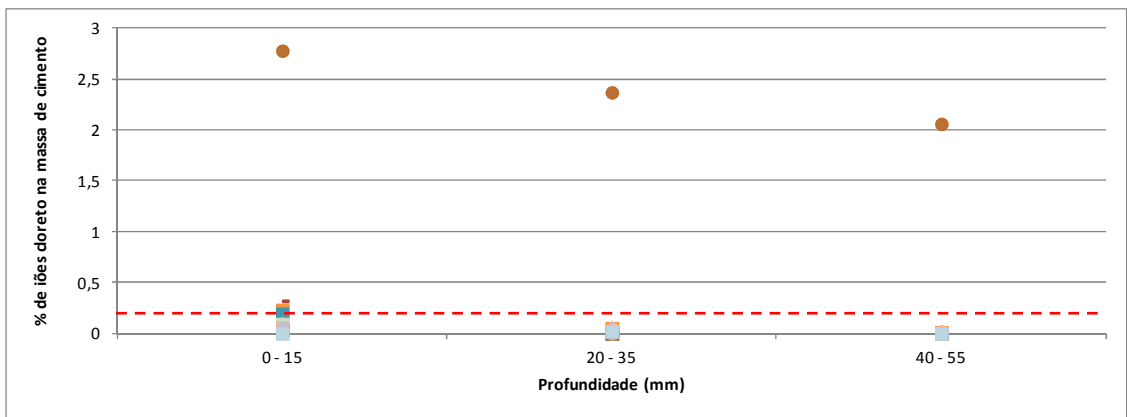


Gráfico 20: Perfil de íons cloreto dos carotes retirados nas vigas interiores das estruturas pertencentes ao caso de estudo

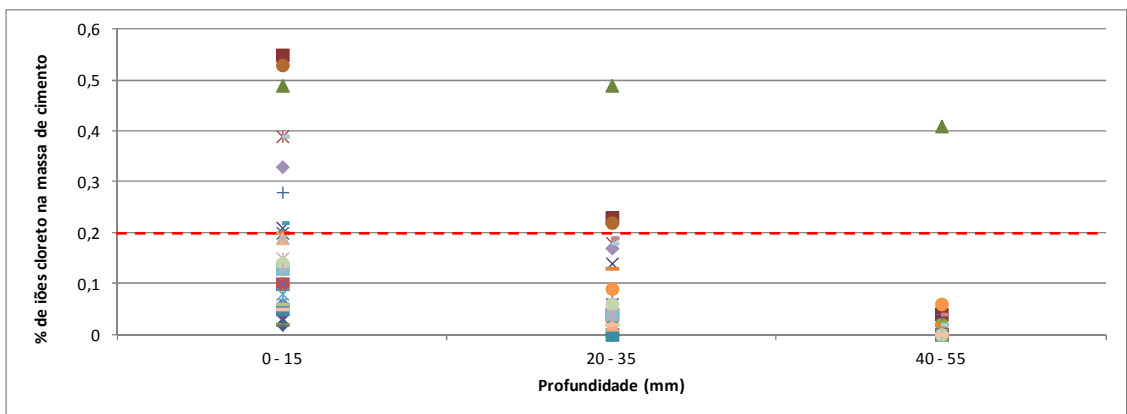


Gráfico 21: Perfil de íons cloreto dos carotes retirados nas vigas exteriores sem anomalias das estruturas pertencentes ao caso de estudo

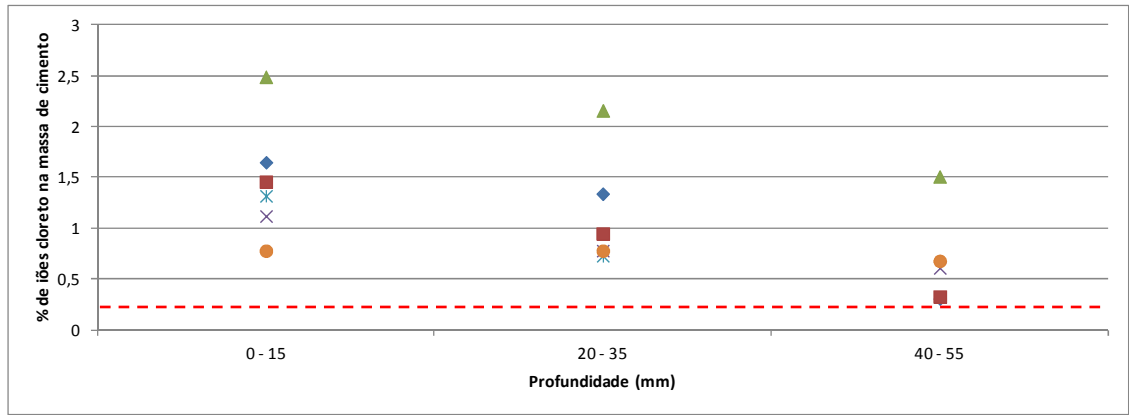


Gráfico 22: Perfil de íões cloreto dos carotes retirados nas vigas exteriores com anomalias das estruturas pertencentes ao caso de estudo

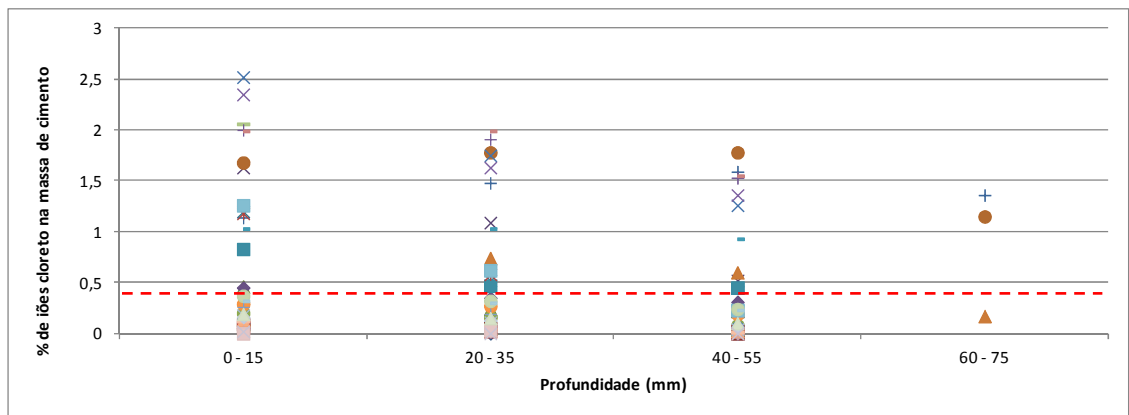


Gráfico 23: Perfil de íões cloreto dos carotes retirados nos capitéis das estruturas pertencentes ao caso de estudo

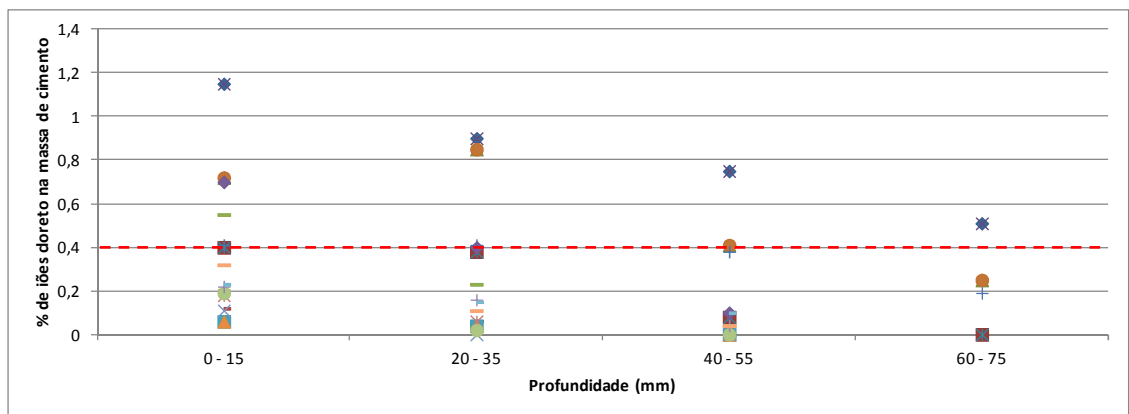


Gráfico 24: Perfil de íões cloreto dos carotes retirados nos pilares das estruturas pertencentes ao caso de estudo

6.2. Análise de resultados

Comece-se por salientar que não se observaram quaisquer indícios de um comportamento inadequado em qualquer uma das estruturas objeto de estudo, i.e. não se detetaram nem deformações excessivas, nem fissuração por esforços. No entanto e conforme já referido no capítulo 6.1, foram observados diversos tipos de anomalias:

- Detetaram-se danos associados a processos de corrosão, os quais, conforme referido anteriormente, originaram em alguns casos perdas de secção nominal das armaduras passivas em vigas, pilares e capitéis.
- Relativamente às janelas de inspeção realizadas na armadura dos tabuleiros, pontualmente observaram-se indícios de oxidação e raros foram os casos em que se detetou corrosão.
- Quanto à armadura ativa, em muitas das vigas exteriores, sobretudo nas de menor cota do tabuleiro, observou-se oxidação e inclusive corrosão nos cabos colocados dentro das bainhas de pré-esforço. Em particular, refira-se o caso das estruturas localizadas no p.k. 3 + 590, onde se observou corrosão intensa dos cabos, muitos dos quais apresentavam rotura. Nas vigas interiores, salvo um caso excepcional, não foram detetados quaisquer indícios de processos de corrosão nas armaduras.

Conforme descrito no capítulo 3, a reação química cujo produto corresponde a óxido de ferro (corrosão) exige que, à volta das armaduras, exista humidade. De facto, historicamente, a presença de ciclos de humidade é mais que evidente em pilares, capitéis, zonas de apoio de vigas e em vigas exteriores e é uma consequência dos escorrimentos de águas provenientes do tabuleiro e das infiltrações através de juntas de dilatação.

No entanto, a presença de água não é suficiente para que os processos de corrosão nas armaduras se iniciem. Para que tal aconteça, são necessários outros fatores, que atuem individualmente ou através de ação combinada, tais como:

- i. Carbonatação do betão;
- ii. Qualidade do betão;
- iii. Presença de substâncias agressivas no betão, provenientes do exterior ou de algum dos seus materiais constituintes (áridos, água de amassadura, etc.).

Seguidamente analisam-se cada um destes aspetos de forma genérica para as estruturas do caso de estudo:

i. Carbonatação do betão

É necessário distinguir dois tipos de situações:

- Nos casos em que a frente de betão carbonatado não alcançou a posição das armaduras, naturalmente que não poderão existir processos de corrosão motivados pela carbonatação do betão.

Refira-se que nas estruturas do caso de estudo não foi encontrada qualquer situação em que a frente de carbonatação tivesse alcançado a posição das bainhas de pré-esforço ou os cabos em vigas sem bainhas. Por isso, os processos de corrosão observados em armaduras ativas não têm origem na carbonatação do betão.

- Nos casos em que a frente de carbonatação alcançou a posição da armadura passiva, o mecanismo de proteção das armaduras ficou comprometido. Estas situações são uma minoria no caso de estudo e apenas se verificam naqueles casos em que as armaduras têm recobrimentos reduzidos (5-10 mm). Tal sucedeu especialmente em estribos de pilares e capitéis, bem como na armadura transversal das vigas, tendo-se observado casos em que se desencadearem processos de corrosão motivados por este fator.

Note-se que na zona carbonatada do betão se perdem as condições básicas do mesmo, nas quais as armaduras ficam protegidas dos processos de oxidação. Durante o processo de cura do betão forma-se uma película de óxido microscópico nas armaduras que protege as armaduras frente aos processos de corrosão. A carbonatação do betão consiste, de forma esquemática, na reação do dióxido de carbono atmosférico que penetra através da estrutura de poros do betão com a cal livre do próprio betão, para formar carbonato de cálcio. Este processo origina uma redução do pH original do betão, da ordem dos 13, até valores próximos de 9. Nestas condições produz-se a destruição da capa passiva,

perdendo-se assim a proteção que o betão confere às armaduras, e desencadeando-se assim os processos de corrosão quando existem condições de humidade.

ii. Qualidade do betão de recobrimento

Não obstante terem sido realizados ensaios de caracterização do betão apenas em algumas estruturas, entende-se que os resultados sobre a qualidade deste poderão ser extrapolados para as restantes estruturas do caso de estudo.

Dos resultados obtidos nos ensaios realizados sobre os carotes extraídos de diferentes elementos estruturais e de várias estruturas, pode-se concluir o seguinte:

- a) Em todas os carotes ensaiados, quer em pilares, capitéis como em vigas, o conteúdo de cimento é elevado, i.e. superior a 325 kg/m^3 . Excetuam-se, porém, as vigas da estrutura localizada no p.k. 29 + 390, sentido B, as quais apresentam um conteúdo de cimento de 320 kg/m^3 . Refira-se que as normativas de 2008 do país onde as estruturas estão localizadas recomendam que o betão apresente um conteúdo de cimento maior ou igual a 325 kg/m^3 , considerando que a classe de exposição destes elementos de betão armado seria, de acordo com a mesma normativa, do tipo IV + H (ou IV + F se se considerassem as escorrências de águas com saís de degelo). Note-se que este valor mínimo é superior ao recomendado pela norma vigente à data de projeto *as built* destas estruturas.

Pelo exposto considera-se existirem evidências suficientes para concluir que o conteúdo de cimento no betão não contribuiu para a origem dos processos de corrosão observados.

- b) Os resultados obtidos através dos ensaios de porosidade nos pilares revelaram porosidades relativamente reduzidos. No entanto, os dados da sua permeabilidade expressa como profundidade de penetração da água à pressão, não são satisfatórios, uma vez que existem inúmeras amostras cujos resultados de penetração média são superiores ao limite superior do considerado admissível para a generalidade das normas para o tipo de

exposição IV + H (40 mm de profundidade individual). Vejam-se as tabelas relativas aos ensaios de cada estrutura no anexo à presente tese.

c) Nos capitéis observaram-se valores para a porosidade um pouco mais elevados comparativamente com os valores médios obtidos nos ensaios dos pilares, o que é indicativo de uma execução (compactação e cura) algo menos cuidada. Não obstante terem sido realizados poucos ensaios de permeabilidade sobre carotes extraídos de capitéis, os resultados obtidos revelam que o betão apresenta elevada permeabilidade. No caso dos ensaios efetuados sobre os capitéis da estrutura localizada no p.k. 29 + 390, sentido A, vejam-se as tabelas presentes no anexo da tese, a média da profundidade máxima de penetração obtida ascende a 150 mm.

d) Os valores de porosidade nas vigas são algo elevados (compreendidos entre 13,63% e 17,73%). Estes resultados podem ser uma consequência da utilização de uma razão água/cimento elevada, o que não parece ser muito provável dada a boa resistência do betão, ou então podem resultar de uma execução menos adequada, o que parece ser mais plausível. Estes dados de porosidade elevada são característicos de betões cuja durabilidade é reduzida por serem pouco compactos, muito porosos e com grande absorção capilar, de forma a que os agentes agressivos (fundamentalmente dióxido de carbono e iões cloreto), a humidade e o oxigénio possam aceder facilmente desde o ambiente exterior para o interior do betão, podendo desencadear-se assim os processos de corrosão das armaduras.

Os dados relativos à permeabilidade do betão comprovam este comportamento inadequado em termos de durabilidade, alcançando em todos os casos, exceto no sentido B da estrutura localizada no p.k. 3 + 590, valores muito superiores aos que seriam admissíveis na generalidade das normas para o tipo de exposição do elemento (40 mm).

e) Pontualmente, sobretudo na zona de sobreposição de armaduras, a quantidade de varões pode também originar uma qualidade de betão

inferior, por nessas zonas a compactação ser normalmente inferior, originando assim uma maior porosidade e permeabilidade do betão e favorecendo a entrada de oxigénio e água até à posição das armaduras. Refira-se que esta anomalia construtiva terá sido mais frequente em pilares e capitéis.

iii. Presença de substâncias agressivas no betão

Relativamente ao perfil de iões cloreto, em função da profundidade de betão, saliente-se o seguinte:

- a) No que respeita às concentrações de iões cloreto presentes na massa do betão da laje convém referir que estes valores apresentam elevada dispersão de estrutura para estrutura e até dentro da mesma obra de arte. Inclusive, no caso das obras de arte gémeas, se se confrontarem os resultados dos ensaios de carotes extraídos em localizações correspondentes, também os resultados são díspares, não parecendo existir qualquer relação entre eles.

A partir dos resultados obtidos, constatou-se que existem sempre algumas determinações cujos valores são em muito superiores aos valores admissíveis. Este facto revela que, ainda que as janelas de inspeção não evidenciassem danos intensos nas armaduras, considerando que estas se encontravam num meio agressivo, a durabilidade do elemento estaria comprometida a curto/médio prazo.

Refira-se que a origem mais provável para a alta concentração de iões cloreto reside: i) na penetração dos sais de degelo através da capa de betuminoso (8-20 cm) e ii) na penetração dos sais através do betão do elemento.

Infelizmente o reduzido número de determinações efetuadas e os resultados obtidos através dessas determinações, ainda que permitam estabelecer um diagnóstico sobre o estado atual do elemento, não permitem aferir um critério que relacione a concentração de iões cloreto com a localização do carote na estrutura. Para que se pudesse definir um critério, dever-se-ia aumentar o número de determinações e, no caso de

estruturas gémeas, a localização dos pontos de extração de carotes deveria coincidir exatamente para que se pudessem comparar os resultados entre si. Caso fosse possível aferir um critério em estruturas gémeas, o mesmo deveria então ser avaliado, confrontando-o com os resultados obtidos nas restantes estruturas em estudo.

- b) À semelhança do que se constatou ao nível das lajes, também os valores da concentração de iões cloreto nos carotes extraídos de pilares apresentaram elevada dispersão, mas neste caso motivada por um outro fator: parece existir uma correspondência direta entre a zona de extração coincidir com locais onde historicamente foram registadas escorrências de águas com sais de degelo usados para manter as condições rodoviárias na calçada e uma maior concentração de iões cloreto à superfície.

Constatou-se ainda que a concentração de iões cloreto na massa interior do betão dos pilares é nula, o que indica que a introdução destes iões foi efetuada pelo exterior, possivelmente em resultado da escorrência de água com sais de degelo. A título de exemplo, refira-se o caso do carote 22 da estrutura localizada no p.k. 3 + 590 sentido B (Gráfico A - 1). De facto, nas amostras retiradas de zonas onde os pilares apresentavam claros indícios de escorrências de água detetaram-se à superfície concentrações de iões cloreto muito elevadas, mas em profundidades nas quais foram detetadas armaduras, a concentração descia, em muito casos, para níveis ligeiramente superiores ao limite exigido pelas normas atuais em condicionantes de durabilidade (0,4%), justificando, assim, o estado das armaduras.

Em suma, a introdução dos iões cloreto na massa do betão fez-se pela face exterior e terá sido originada pela escorrência de água com sais de degelo dissolvidos provenientes da calçada. Esta é, por isso, a principal origem das anomalias relativas aos processos de corrosão detetados em pilares.

- c) Relativamente aos capitéis, refira-se que na maioria dos casos os valores da concentração de iões cloreto, na posição das armaduras, são iguais ou

[G:\anexo da tese.docx](#)

superiores ao estipulado pelas normas vigentes para efeitos de durabilidade, justificando desta forma a corrosão observada nas armaduras. Considerando que a secção nominal das referidas armaduras apresentava uma redução significativa, estes elementos teriam já ultrapassado o estado limite para efeitos de durabilidade, não obstante não existirem indícios dos mesmos apresentarem um comportamento estrutural inadequado. No entanto e a título de exceção, mencionem-se as estruturas localizadas no p.k. 32 + 090, nas quais se detetaram concentrações de iões cloreto muito inferiores ao máximo admissível na posição das armaduras.

Assim, os iões cloreto introduzidos através das infiltrações de água com sais de degelo nas juntas de dilatação, foram a principal causa de desenvolvimento dos processos de corrosão das armaduras nos capitéis.

- d) Para a análise das vigas serão consideradas separadamente vigas interiores e vigas exteriores.

A. Vigas interiores

Nas vigas interiores, os resultados da determinação do conteúdo de iões cloreto, revelam que a concentração de iões cloreto na posição das armaduras ativas é inferior ao limite máximo estipulado pelas normas em vigor. Exceção-se, porém, o caso em que se observaram anomalias no sistema de drenagem (carote 10 da estrutura localizada no p.k. 3 + 590, sentido A).

Parece, assim, poder-se concluir que as anomalias, associadas a ataques de iões cloreto através de sais de degelo, em vigas interiores tendem a estar associadas a deficiências no sistema de drenagem.

B. Vigas exteriores

Relativamente às estruturas sem inclinação transversal, refira-se que a concentração de iões cloreto em ambas as vigas exteriores de cada vão é semelhante entre si e situa-se acima dos valores admissíveis.

Nas estruturas com inclinação transversal, por norma as vigas exteriores localizadas do lado de menor cota revelam concentrações de iões cloreto na posição das armaduras muito superiores ao estipulado pela legislação, justificando desta forma os danos observados tanto nas armaduras ativas como nas passivas. A título de exemplo, refiram-se os resultados obtidos na determinação de iões cloreto no carote 12 da obra de arte localizada no p.k. 12 + 718, sentido B, numa zona que apresentava escorrências de água sobre a face longitudinal exterior da viga exterior. O valor desta concentração, naquela que seria a posição das bainhas, superava quase 8 vezes o limite máximo admissível pelas normas.

Nos casos das vigas exteriores do lado de maior cota em estruturas com relevê, os danos observados são inferiores quando comparados com as mesmas vigas do lado de menor cota. Ainda assim, as concentrações determinadas na posição das armaduras ativas são muito superiores às consideradas como admissíveis.

Saliente-se que poucos foram os casos em que se realizaram ensaios de determinação do perfil de iões cloreto onde, previamente na fase de abertura de janelas de inspeção, se tinha observado corrosão dos cabos de pré-esforço, uma vez que o diagnóstico e a solução estavam já encontrados.

7. Conclusões

7.1. Apreciações gerais

O estudo de durabilidade das vinte obras de arte foi iniciado com a realização de inspeções visuais, sem o recurso a meios de acesso auxiliares. Por sua vez, estas inspeções permitiram concluir ser necessário realizar subsequentemente inspeções principais para melhor analisar o estado global das estruturas em estudo. Pelo facto de se observarem (i) manchas de cor acastanhada nas estruturas e (ii) destacamentos de betão de recobrimento em vigas, pilares e capitéis, incluindo, em alguns casos, exposição de armaduras (ativas e passivas) ou mesmo perda de secção nominal destas, entendeu-se proceder à abertura de janelas de inspeção para estabelecer um correto diagnóstico. Ao observar-se corrosão ou oxidação na armadura ativa, mas sem que a frente carbonatada a tivesse alcançado, decidiu-se prosseguir para uma campanha de ensaios de laboratório. Com estes ensaios pretendeu-se, por um lado, averiguar as causas das anomalias observadas em fases anteriores do estudo de durabilidade e, por outro lado, aferir o seu alcance.

Relativamente às anomalias relacionadas com processos de corrosão das armaduras entendeu-se parecerem existir evidências suficientes para concluir que estas foram desencadeadas por escorrências de água com sais de degelo, os quais haviam sido utilizados para manter as condições rodoviárias sobre a estrutura. De facto saliente-se que (i) zonas dos elementos onde se observaram escorrências, apresentaram também maiores danos por corrosão, (ii) a concentração de iões cloreto revelou-se decrescente em função da distância à superfície, tendendo para zero no interior dos elementos e (iii) elementos mais expostos à intempérie apresentaram mais anomalias.

Os resultados obtidos ao longo do estudo de durabilidade permitiram também verificar que as estruturas analisadas cumpriam com os requisitos constantes dos regulamentos em vigor no país e à data em que foram elaborados os respetivos projetos. Note-se que as exigências normativas abrangiam apenas, no que respeita a durabilidade, espessura mínima de recobrimento e quantidade mínima de cimento no betão. Requisitos como porosidade, permeabilidade e relação água/cimento foram introduzidos nos regulamentos muito posteriormente.

Considerando o estado de conservação das obras de arte e as anomalias observadas 31 anos após a sua construção, foi possível concluir-se que estas estruturas não chegariam ao final do período de vida útil preconizado na fase de projeto em condições de funcionalidade e segurança, a menos que fossem submetidas a profundas obras de reparação e/ou de reforço. Portanto, os regulamentos vigentes por altura da construção das obras de arte em estudo não se revelaram suficientes para dotar estas estruturas de características técnicas que permitissem que as mesmas alcançassem o período de vida útil projetado.

7.2.Considerações para trabalhos futuros

Uma das principais conclusões decorrentes deste trabalho prende-se com os efeitos da utilização de sais de degelo em situações de baixas temperaturas, de forma a garantir a circulação rodoviária. Nesse sentido, poderá ser útil estudar as práticas seguidas para a manutenção da circulação nas vias de comunicação tendo em consideração os efeitos provocados no estado de conservação das estruturas. Concretamente, seria importante estudar melhores práticas em termos de uso de sais de degelo (perante que temperaturas devem ser utilizados e quais as quantidades adequadas) e ainda investigar possíveis alternativas à utilização de cloreto de sódio que produzam os mesmos resultados ao nível da manutenção da circulação rodoviária, mas que tenham menor impacto nas estruturas e na fauna e flora envolventes.

Em estruturas cuja localização obrigue ao uso de sais de degelo e sem prejuízo do referido no parágrafo anterior, poderá também ser estudada a colocação nas estruturas de elementos de sacrifício, i.e. soluções construtivas que permitam a proteção de elementos vitais nas estruturas aos efeitos nocivos das escorrências e cuja substituição seja de fácil execução.

Por último refira-se que o trabalho efetuado incidiu sobre um conjunto de vinte obras de arte situadas num mesmo porto de montanha e, portanto, próximas entre si. Deste modo, seria importante que os resultados obtidos e as conclusões alcançadas pudessem ser comprovados em obras de arte com tipologias estruturais e ambiente de exposição semelhantes aos deste caso de estudo. Perante novos estudos de durabilidade, poderá ser útil aprofundar o estudo das lajes dos tabuleiros, de forma a investigar a intensidade das anomalias ao longo deste tipo de elementos.

Bibliografía

- [1] AENOR – Asociación Española de Normalización y Certificación. 2001. *Ensayos de hormigón en estructuras. Parte 1: Testigos. Extracción, examen y ensayo a compresión*. UNE-EN 12504-1:2001. Madrid: AENOR.
- [2] AENOR – Asociación Española de Normalización y Certificación. 2003. *Ensayos de hormigón endurecido. Parte 3: Determinación de la resistencia a compresión de probetas*. UNE-EN 12390-3:2003. Madrid: AENOR.
- [3] AENOR – Asociación Española de Normalización y Certificación. 1990. *Ensayos de hormigón. Determinación de la profundidad de penetración de agua bajo presión*. UNE 83309:1990 EX. Madrid: AENOR.
- [4] AENOR – Asociación Española de Normalización y Certificación. 1994. *Corrosión en armaduras. Determinación de cloruros en hormigones endurecidos y puestos en servicio*. UNE 112010:1994. Madrid: AENOR.
- [5] Almeida, José C., Paulo J. S. Cruz e Jorge de Brito. 2009. *Análise comparativa de sistemas de gestão de pontes*. Comunicação apresentada no 1.º Congresso Nacional sobre Segurança e Conservação de Pontes, organizado pela Associação Portuguesa para a Segurança e Conservação de Pontes, Lisboa, 1 a 3 de julho de 2009.
- [6] ASTM International. 2012. ASTM Standard C39 / C39M, 2012a. *Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*. DOI: 10.1520/C0039_C0039M-12A. West Conshohocken, EUA: ASTM International.
- [7] ATEP (Asociación Técnica Española de Pretensado). 1993. *Recomendaciones para la conservación de puentes pretensados H.P.7-92*. Madrid. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.
- [8] Comité Técnico de Puentes de Carretera. 1999.– *Durabilidad, Reparación y refuerzo de puentes de hormigón*. Madrid. Asociación Técnica de Carreteras.
- [9] Cruz, Paulo J. S.. 2006. *Inspeção, diagnóstico, Conservação e monitorização de pontes*. Comunicação apresentada no IV Congresso Rodoviário Português – Estrada 2006, “Política Rodoviária – Os Próximos 10 Anos”, Estoril, 5 a 7 de abril de 2006.

- [10] Environment Canada. 2004. *Code of Practice for the Environmental Management of Road Salts - Environmental Protection Series report, EPS 1/CC/5*. Ottawa, Canadá. Environmental Protection Publications, Environment Canada.
- [11] FIB (Fédération Internationale du Béton), Task Group 5.1. 2003. *Monitoring and Safety Evaluation of Existing Concrete Structures*. State-of-the-Art Report, fib Bulletin n.º 22. Lausanne. FIB.
- [12] FIP (Fédération Internationale de la Précontrainte), Commission on Practical Construction. 1986. *Inspection and maintenance of reinforced and prestressed concrete structures*. Londres. Thomas Telford Ltd.
- [13] Fontana, Mars Guy. 1967. *Corrosion Engineering*. 3.^a Edição. Nova Iorque. McGraw – Hill.
- [14] Lourenço, Líbia C., Vancler R. Alves, João C. Jordy, Luiz Carlos Mendes e Mychael V. C. Lourenço. 2009. *Parâmetros de Avaliação de Patologias em obras-de-arte especiais*. Revista Engenharia Civil, n.º 34, Escola de Engenharia da Universidade do Minho, Guimarães, Maio de 2009, pp. 5-14.
- [15] Marques Lima, João e Jorge de Brito. 2007. *Inspecção e diagnóstico de juntas de dilatação em obras de arte rodoviárias*. Revista Engenharia Civil, n.º 28, Escola de Engenharia da Universidade do Minho, Guimarães, Janeiro de 2007, pp. 59-72.
- [16] Ministerio de Fomento de Espanha. Março de 1998. *Instrucción sobre las acciones a considerar en el proyecto de puentes de carretera (IAP 98)*. Madrid. Boletín Oficial del Estado.
- [17] Ministerio de Fomento de Espanha. 2009. *Guía de inspecciones básicas de obras de paso: Red de carreteras del Estado*. Madrid. Centro de Publicaciones, Secretaria General Técnica, Ministerio de Fomento.
- [18] Ministerio de Fomento de Espanha. 2009. *Guía para la realización del inventario de obras de paso: Red de carreteras del Estado*. Madrid. Centro de Publicaciones, Secretaria General Técnica, Ministerio de Fomento.
- [19] MOPU (Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo) de Espanha. Março de 1988. *Inspecciones Principales de Puentes de Carretera*. Madrid. Centro de Publicaciones, Secretaria General Técnica, MOPU.

- [20] PIARC (Permanent International Association of Road Congresses), National Italian Technical Committee C.4.4 “Road Bridges and Associated Structures”. 2007. *Extending the Service Life of Bridges: Guidelines for the Design, Construction and Maintenance Stages*. Comunicação apresentada n°23rd PIARC World Road Congress, Paris, 17 a 21 de setembro de 2007.
- [21] Radomski, Wojciech. 2002. *Bridge Rehabilitation*. Londres. Imperial College Press.
- [22] Silva, Pedro, Eduardo Díaz-Pavón, Miguel Morais e Humberto Varum. 2009. *Estudio de viaductos existentes: criterios para llevar a cabo la investigación estructural*. Comunicação apresentada no 1.º Congresso Nacional sobre Segurança e Conservação de Pontes, organizado pela Associação Portuguesa para a Segurança e Conservação de Pontes, Lisboa, 1 a 3 de julho de 2009.
- [23] Tanaka, Yoshiki, Hirotaka Kawano, Hiroshi Watanabe e Tomoyoshi Nakajo. 2001. *Study on required cover depth of concrete highway bridges in coastal environment*. Comunicação apresentada no 17th U.S. – Japan Bridge Engineering Workshop, Tsukuba, Japão, 2001.
- [24] Tanaka, Yoshiki, Hirotaka Kawano, Hiroshi Watanabe e Tomoyoshi Nakajo. Março – Abril 2006. *Study on cover depth for prestressed concrete bridges in airborne-chloride environment*. PCI Journal: Prestressed Concrete Institute Journal, N° 2, pp. 42-53.
- [25] White, Kenneth R., John Minor, Kenneth N. Derucher e Conrad P. Heins, Jr. 1981. *Bridge Maintenance, Inspection and Evaluation*. Nova Iorque. Marcel Dekker, Inc.

Anexo

A.1. Tabelas resumo dos ensaios realizados

De seguida apresentam-se os resultados da análise aos ensaios realizados, com exceção para os referentes aos perfis de cloretos, os quais serão expostos no ponto 2 do presente anexo.

	Resistência à compressão (Mpa)		Profundidade máxima de penetração (mm)		Porosidade (%)		Densidade aparente (Kg/dm ³)		Conteúdo de cimento (Kg/m ³)		Rotura tracção indirecta (kp/cm ²)	
	Xmédio	δ	Xmédio	δ	Xmédio	δ	Xmédio	δ	Xmédio	δ	Xmédio	δ
Vigas	33,05	4,54	94,67	9,24	15,70	1,00	2,18	0,03	411,67	2,89	37,33	5,77
Pilares	48,00	4,12	0,00	0,00	14,73	0,98	2,22	0,03	361,67	2,89	0,00	0,00
Capitéis	44,57	7,31	80,33	12,06	11,40	2,01	2,31	0,07	350,00	17,32	49,00	2,00
Tabuleiro	49,55	2,47	0,00	0,00	13,05	1,06	2,26	0,02	335,00	7,07	0,00	0,00

Tabela A - 1: Características mecânicas da O.A. localizada no p.k. 3 + 590, sentido A

	Resistência à compressão (Mpa)		Profundidade máxima de penetração (mm)		Porosidade (%)		Densidade aparente (Kg/dm ³)		Conteúdo de cimento (Kg/m ³)	
	Xmédio	δ	Xmédio	δ	Xmédio	δ	Xmédio	δ	Xmédio	δ
Vigas	40,76	6,71	81,00	5,66	13,63	0,21	2,24	0,01	385,00	8,66
Pilares	38,38	6,72	74,67	26,03	11,07	0,81	2,32	0,02	378,33	7,64
Capitéis	45,47	17,32	0,00	0,00	15,00	0,60	2,22	0,01	345,00	5,00
Tabuleiro	40,83	6,31	31,00	6,24	13,37	1,05	2,24	0,01	363,33	2,89

Tabela A - 2: Características mecânicas da O.A. localizada no p.k. 3 + 590, sentido B

	Resistência à compressão (Mpa)		Profundidade máxima de penetração (mm)		Porosidade (%)		Densidade aparente (Kg/dm ³)		Conteúdo de cimento (Kg/m ³)	
	Xmédio	δ	Xmédio	δ	Xmédio	δ	Xmédio	δ	Xmédio	δ
Vigas	46,68	0,94	41,33	8,50	17,00	1,04	2,16	0,02	451,67	11,55
Pilares	41,50	0,46	64,50	48,79	15,15	2,30	2,21	0,06	343,75	11,09
Capitéis	35,91	10,67	24,00	-	15,67	1,86	2,20	0,05	345,00	22,91
Tabuleiro	46,22	6,39	39,33	6,35	13,23	1,55	2,25	0,04	370,00	5,00

Tabela A - 3: Características mecânicas da O.A. localizada no p.k. 6 + 090, sentido A

	Resistência à compressão (Mpa)		Profundidade máxima de penetração (mm)		Porosidade (%)		Densidade aparente (Kg/dm ³)		Conteúdo de cimento (Kg/m ³)	
	Xmédio	δ	Xmédio	δ	Xmédio	δ	Xmédio	δ	Xmédio	δ
Vigas	53,17	9,13	69,67	4,51	15,30	1,13	2,21	0,03	386,67	30,14
Pilares	55,75	13,91	0,00	0,00	12,83	1,27	2,28	0,02	381,67	32,53
Capitéis	58,75	14,40	0,00	0,00	15,17	1,53	2,22	0,04	381,67	27,54

Tabela A - 4: Características mecânicas da O.A. localizada no p.k. 12 + 718, sentido A

	Resistência à compressão (Mpa)		Profundidade máxima de penetração (mm)		Porosidade (%)		Densidade aparente (Kg/dm ³)		Conteúdo de cimento (Kg/m ³)	
	Xmédio	δ	Xmédio	δ	Xmédio	δ	Xmédio	δ	Xmédio	δ
Vigas	71,20	14,13	63,00	21,63	15,17	2,18	2,21	0,06	360,00	36,06
Pilares	62,72	9,98	60,00	35,17	11,73	0,91	2,30	0,03	415,00	67,64
Capitéis	60,13	3,74	-	-	14,00	0,53	2,25	0,03	410,00	50,74

Tabela A - 5: Características mecânicas da O.A. localizada no p.k. 12 + 718, sentido B

Relativamente aos viadutos situados no p.k. 19+090, refira-se que estes foram alvo de intervenções históricas que visaram reparar anomalias detetadas nas armaduras dos capitéis. De acordo com informação constante da documentação encontrada, esta

reparação consistiu na remoção do betão de recobrimento, imprimação das armaduras através da aplicação de uma pintura e reposição de um novo betão de recobrimento.

	Resistência à compressão (Mpa)		Profundidade máxima de penetração (mm)		Porosidade (%)		Densidade aparente (Kg/dm ³)		Conteúdo de cimento (Kg/m ³)	
	Xmédio	δ	Xmédio	δ	Xmédio	δ	Xmédio	δ	Xmédio	δ
Vigas	33,53	0,85	123,00	12,17	17,70	1,12	2,14	0,03	393,33	34,30
Pilares	50,90	7,09	73,33	15,04	14,47	1,37	2,22	0,04	383,33	7,64
Capitéis (zona reparada)	-	-	-	-	21,00	2,99	2,06	0,07	335,00	66,14
Capitéis	37,32	24,75	-	-	21,00	2,99	2,06	0,07	335,00	66,14
Tabuleiro	37,39	9,49	58,00	27,87	17,80	1,71	2,13	0,05	395,00	20,74

Tabela A - 6: Características mecânicas da O.A. localizada no p.k. 19 + 090, sentido A

	Resistência à compressão (Mpa)		Profundidade máxima de penetração (mm)		Porosidade (%)		Densidade aparente (Kg/dm ³)		Conteúdo de cimento (Kg/m ³)	
	Xmédio	δ	Xmédio	δ	Xmédio	δ	Xmédio	δ	Xmédio	δ
Vigas	32,10	3,23	122,00	6,56	17,73	1,14	2,15	0,04	430,83	8,01
Pilares	39,27	2,82	45,33	16,62	14,13	3,76	2,24	0,09	373,33	22,55
Capitéis (zona reparada)	-	-	-	-	18,13	0,96	2,14	0,03	380,00	10,00
Capitéis	38,62	9,71	-	-	22,10	2,25	2,05	0,05	400,00	18,03
Tabuleiro	47,31	5,57	45,00	12,00	16,22	0,79	2,18	0,02	350,00	13,04

Tabela A - 7: Características mecânicas da O.A. localizada no p.k. 19+ 090, sentido B

	Resistência à compressão (Mpa)		Profundidade máxima de penetração (mm)		Porosidade (%)		Densidade aparente (Kg/dm ³)		Conteúdo de cimento (Kg/m ³)		Rotura tracção indirecta (kp/cm ²)	
	Xmédio	δ	Xmédio	δ	Xmédio	δ	Xmédio	δ	Xmédio	δ	Xmédio	δ
Vigas	40,40	10,81	150,00	7,00	18,30	1,78	2,14	0,05	320,00	10,00	32,67	10,81
Pilares	53,67	3,52	60,00	7,64	12,33	1,01	2,29	2,29	421,67	12,58	53,05	4,74
Capitéis	40,40	10,81	150,00	7,00	16,87	1,19	2,16	0,03	409,17	16,56	32,67	3,79
Tabuleiro	46,05	4,31	35,00	5,29	16,98	1,45	2,16	0,03	353,00	7,58	44,67	2,52

Tabela A - 8: Características mecânicas da O.A. localizada no p.k. 29 + 390, sentido A

	Resistência à compressão (Mpa)		Profundidade máxima de penetração (mm)		Porosidade (%)		Densidade aparente (Kg/dm ³)		Conteúdo de cimento (Kg/m ³)	
	Xmédio	δ	Xmédio	δ	Xmédio	δ	Xmédio	δ	Xmédio	δ
Vigas	40,57	6,85	126,67	1,53	16,63	0,68	2,17	0,04	419,17	17,44
Pilares	48,27	9,93	55,67	2,52	13,13	2,12	2,29	0,05	411,67	5,77
Capitéis	44,67	3,99	-	-	16,93	0,70	2,18	0,03	341,67	5,77
Tabuleiro	45,65	5,44	47,00	5,00	17,57	1,04	2,14	0,04	363,57	18,87

Tabela A - 9: Características mecânicas da O.A. localizada no p.k. 29 + 390, sentido B

	Resistência à compressão (Mpa)		Profundidade máxima de penetração (mm)		Porosidade (%)		Densidade aparente (Kg/dm ³)		Conteúdo de cimento (Kg/m ³)	
	Xmédio	δ	Xmédio	δ	Xmédio	δ	Xmédio	δ	Xmédio	δ
Vigas	44,48	8,94	116,67	33,29	15,76	0,58	2,20	0,02	405,63	19,35
Pilares	46,28	3,55	82,00	28,69	13,43	1,82	2,24	0,05	410,00	21,79
Capitéis	42,58	6,48	-	-	17,23	1,27	2,15	0,05	380,00	26,46
Tabuleiro	44,39	12,59	62,67	29,84	16,62	1,30	2,17	0,04	350,00	48,58

Tabela A - 10: Características mecânicas da O.A. localizada no p.k. 32 + 090, sentido A

	Resistência à compressão (Mpa)		Profundidade máxima de penetração (mm)		Porosidade (%)		Densidade aparente (Kg/dm ³)		Conteúdo de cimento (Kg/m ³)	
	Xmédio	δ	Xmédio	δ	Xmédio	δ	Xmédio	δ	Xmédio	δ
Vigas	35,37	5,46	106,00	8,89	15,95	0,96	2,18	0,03	418,13	30,11
Pilares	39,70	4,73	78,33	20,98	15,40	2,74	2,21	0,07	425,00	27,84
Capitéis	49,16	4,51	-	-	17,43	0,96	2,16	0,05	395,00	22,91
Tabuleiro	44,63	3,30	47,00	5,00	16,32	1,79	2,17	0,03	400,00	36,19

Tabela A - 11: Características mecânicas da O.A. localizada no p.k. 32 + 090, sentido B

A.2. Perfis de cloretos

De seguida apresentam-se os resultados obtidos para cada elemento estrutural e para cada estrutura que constitui o caso de estudo e que foi objeto de uma campanha de ensaios de laboratório.

Viadutos situados no p.k. 3+590:

Sentido A

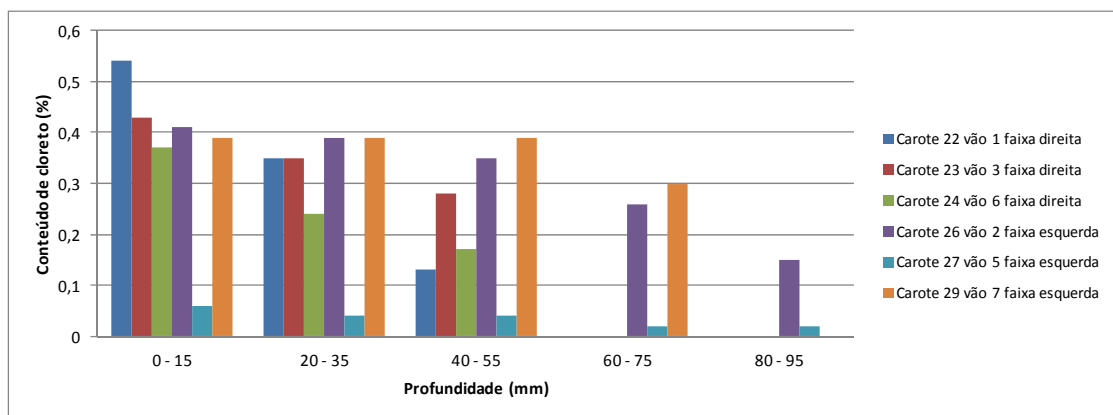


Gráfico A-1: Perfil de iões cloreto dos carotes retirados na laje da O.A. localizada no p.k. 3 + 590 (A)

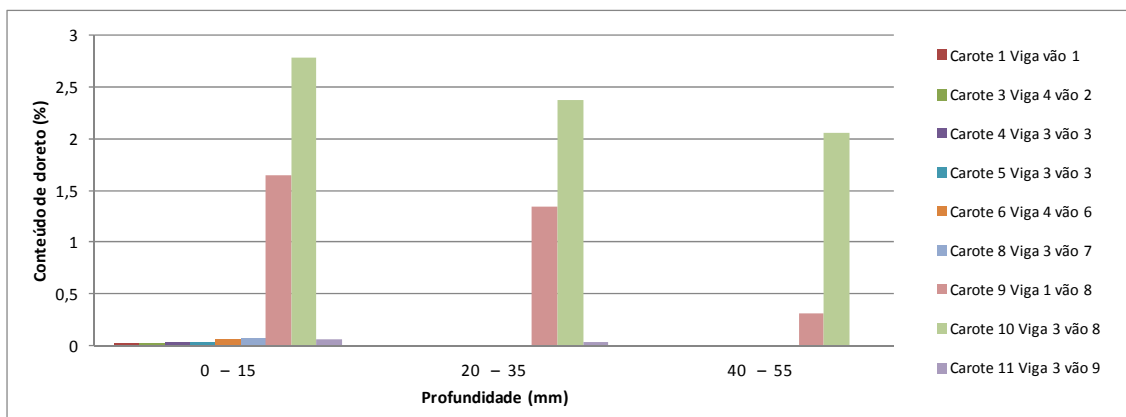


Gráfico A-2: Perfil de iões cloreto dos carotes retirados das vigas da O.A. localizada no p.k. 3 + 590 (A)

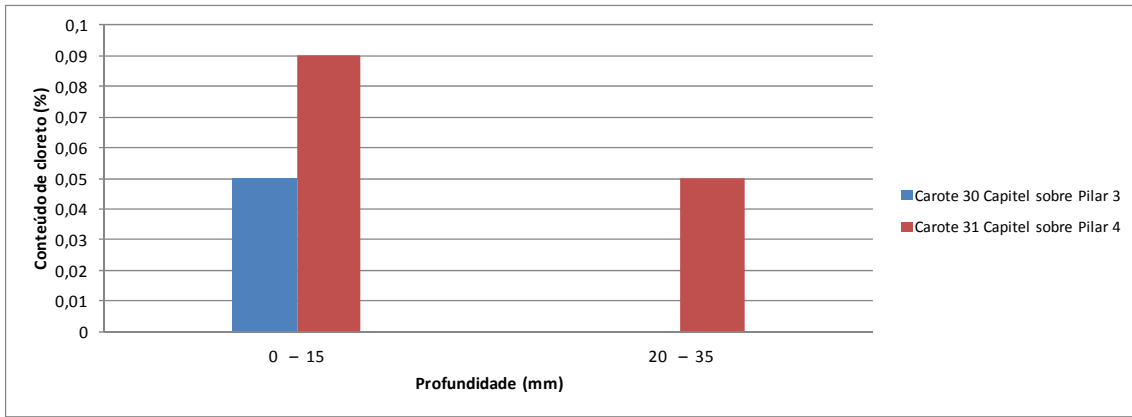


Gráfico A-3: Perfil de iões cloreto dos carotes retirados dos capitéis da O.A. localizada no p.k. 3 + 590 (A)

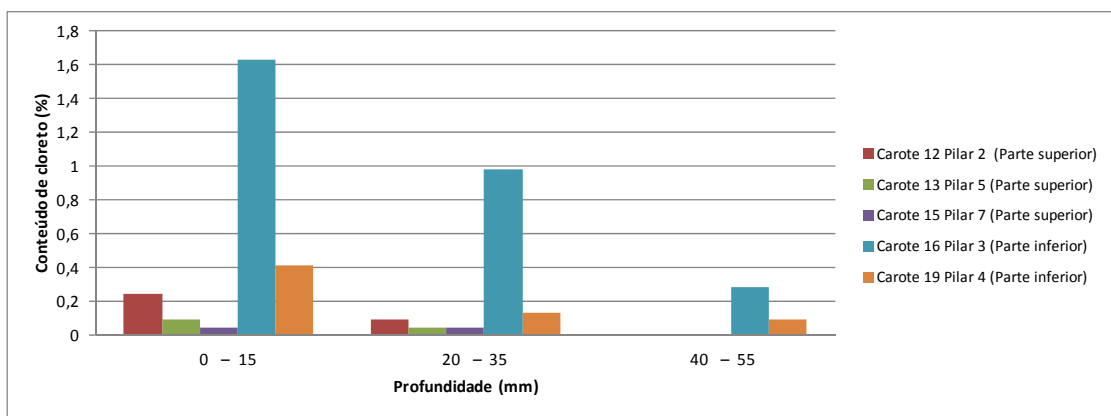


Gráfico A-4: Perfil de iões cloreto dos carotes retirados dos pilares da O.A. localizada no p.k. 3 + 590 (A)

Sentido B

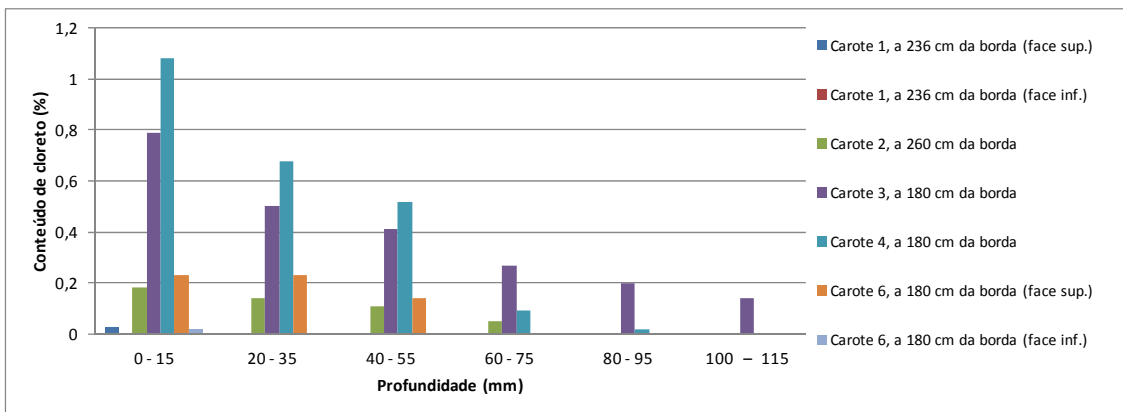


Gráfico A-5: Perfil de iões cloreto dos carotes retirados na laje da O.A. localizada no p.k. 3 + 590 (B)

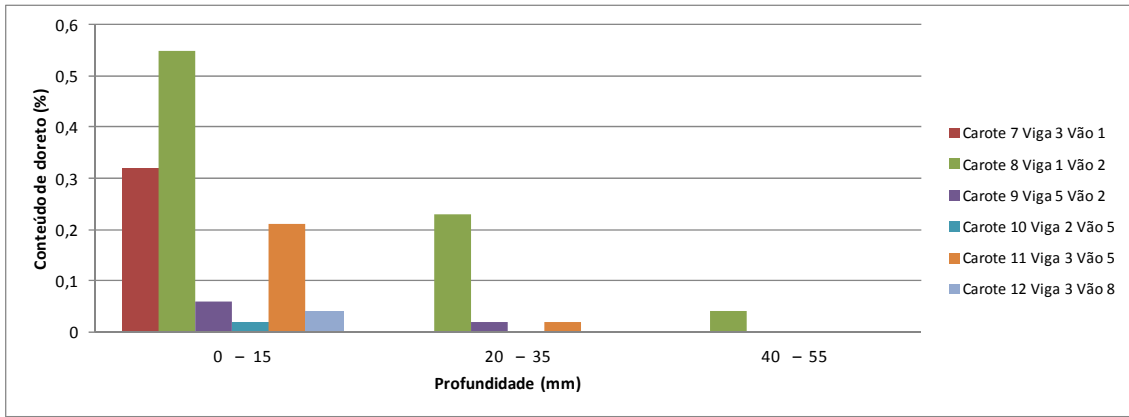


Gráfico A-6: Perfil de iões cloreto dos carotes retirados das vigas da O.A. localizada no p.k. 3 + 590 (B)

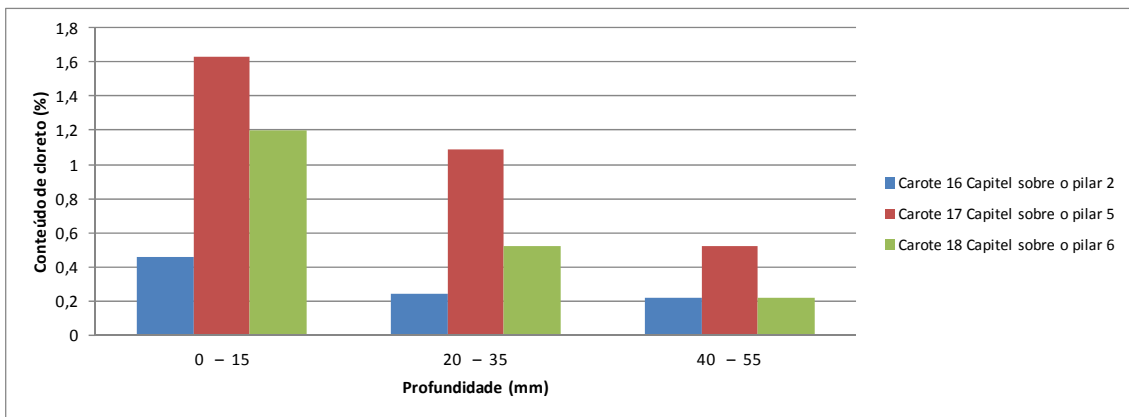


Gráfico A-7: Perfil de iões cloreto dos carotes retirados dos capitéis da O.A. localizada no p.k. 3 + 590 (B)

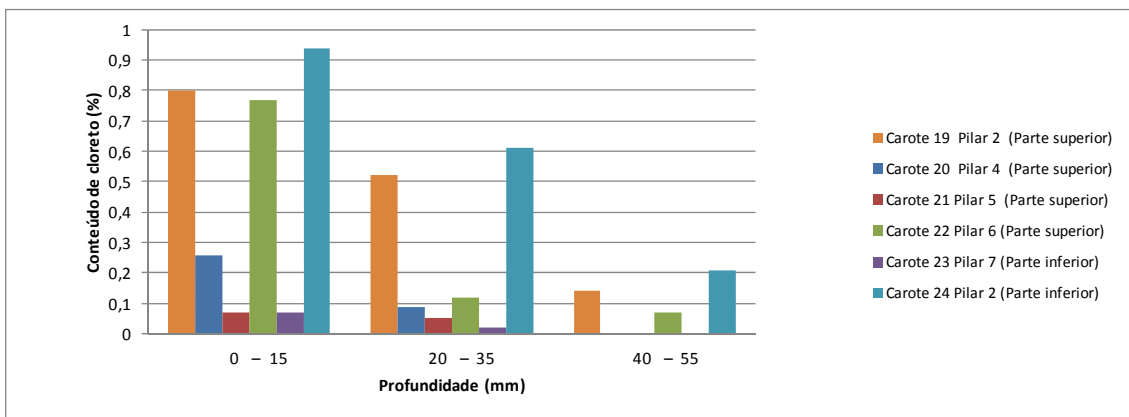


Gráfico A-8: Perfil de iões cloreto dos carotes retirados dos pilares da O.A. localizada no p.k. 3 + 590 (B)

Estrutura situada no p.k. 6 + 090:

Sentido A

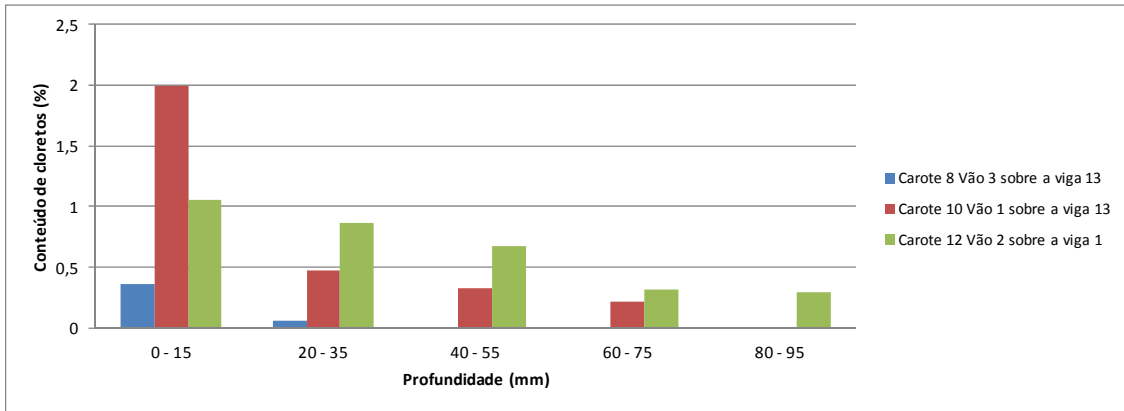


Gráfico A-9: Perfil de iões cloreto dos carotes retirados na laje da O.A. localizada no p.k. 6 + 090 (A)

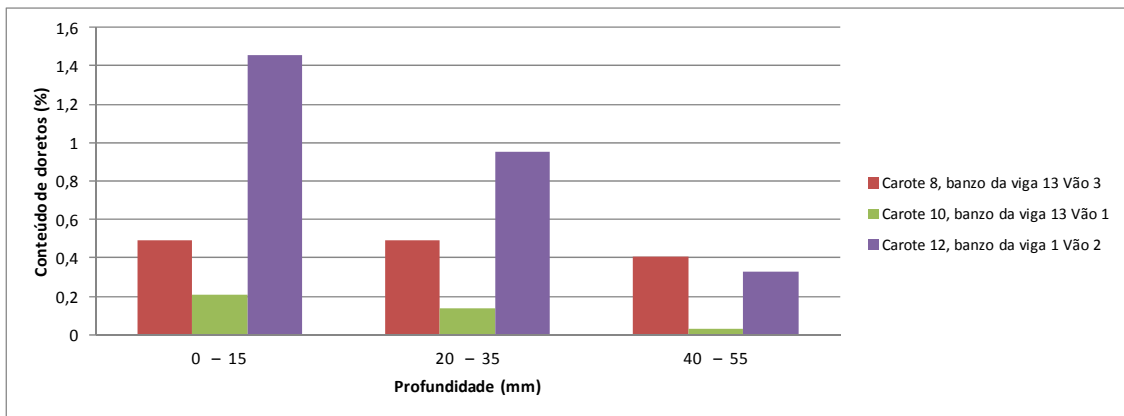


Gráfico A-10: Perfil de iões cloreto dos carotes retirados das vigas da O.A. localizada no p.k. 6 + 090 (A)

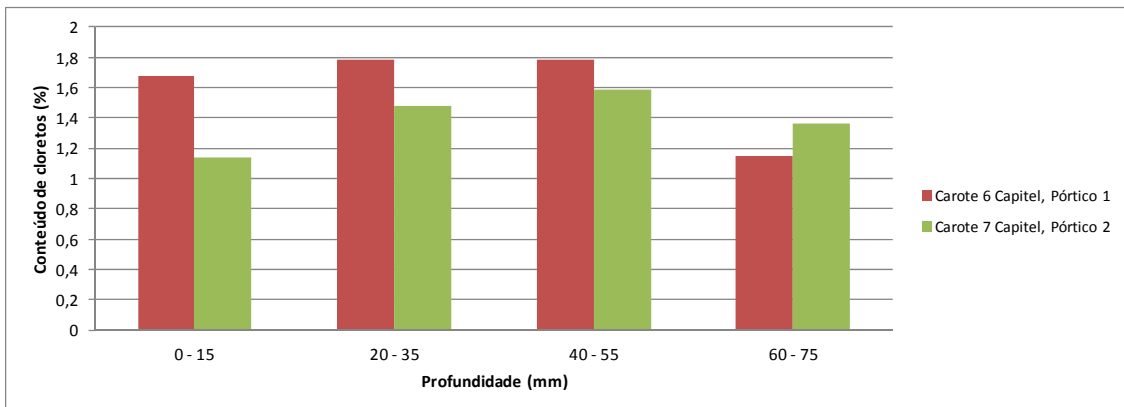


Gráfico A-11: Perfil de iões cloreto dos carotes retirados dos capitéis da O.A. localizada no p.k. 6 + 090 (A)

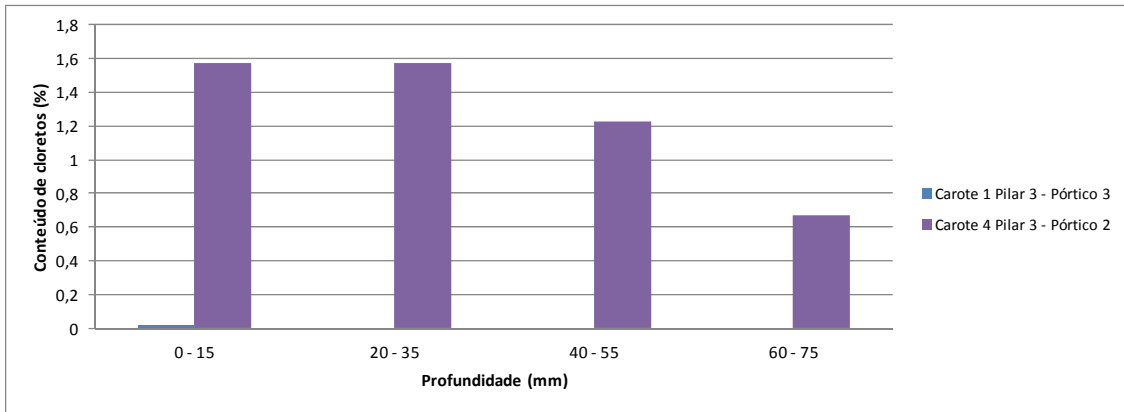


Gráfico A-12: Perfil de iões cloreto dos carotes retirados dos pilares da O.A. localizada no p.k. 6 + 090 (A)

Viadutos situados no p.k. 12+718

Sentido A

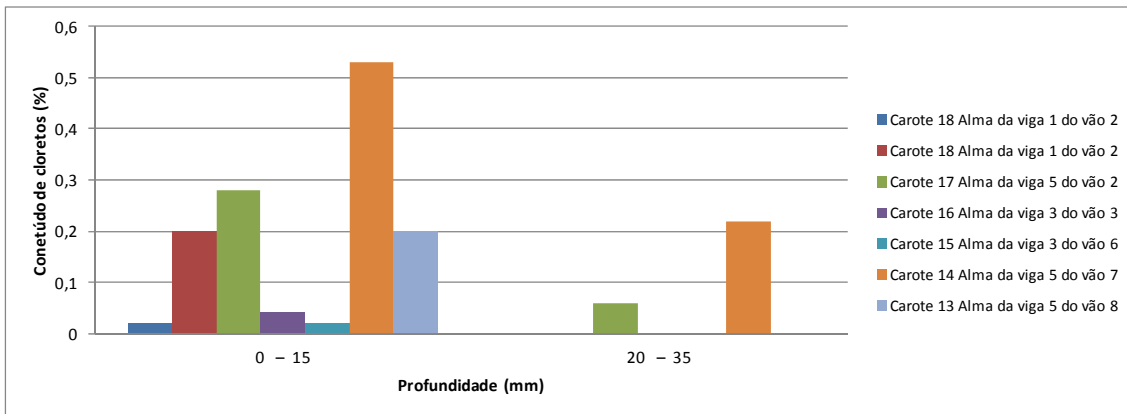


Gráfico A-13: Perfil de iões cloreto dos carotes retirados das vigas da O.A. localizada no p.k. 12 + 718 (A)

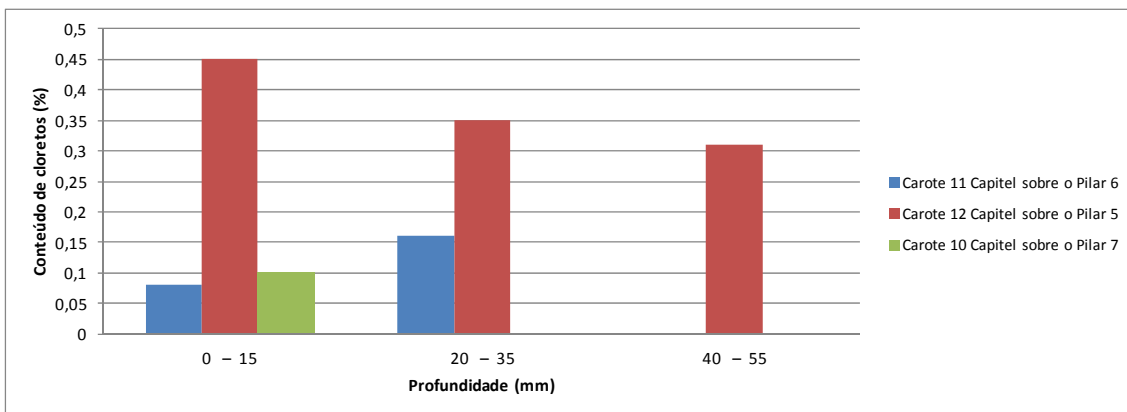


Gráfico A-14: Perfil de iões cloreto dos carotes retirados dos capitéis da O.A. localizada no p.k. 12 + 718 (A)

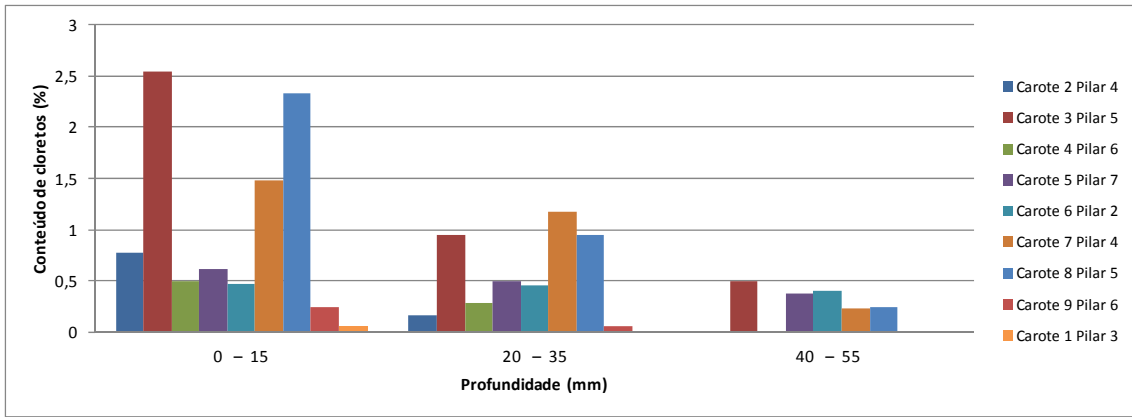


Gráfico A-15: Perfil de iões cloreto dos carotes retirados dos pilares da O.A. localizada no p.k. 12 + 718 (A)

Sentido B

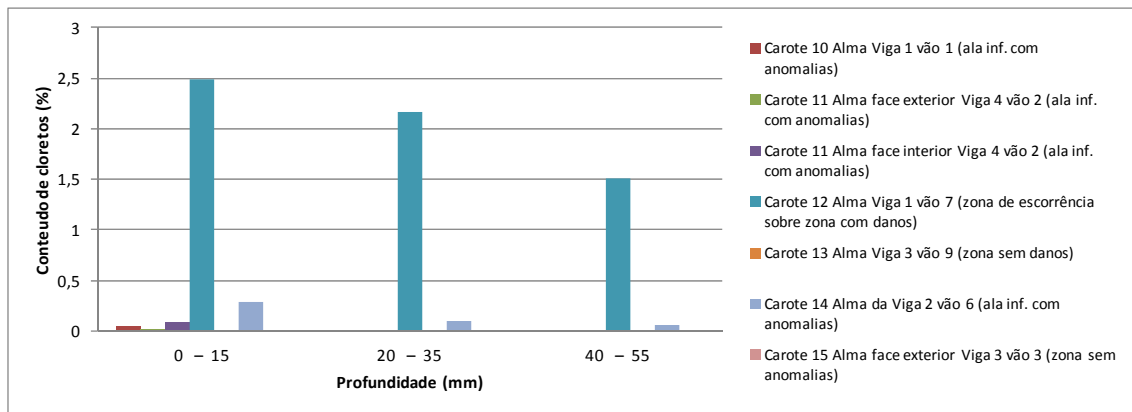


Gráfico A-16: Perfil de iões cloreto dos carotes retirados das vigas da O.A. localizada no p.k. 12 + 718 (B)

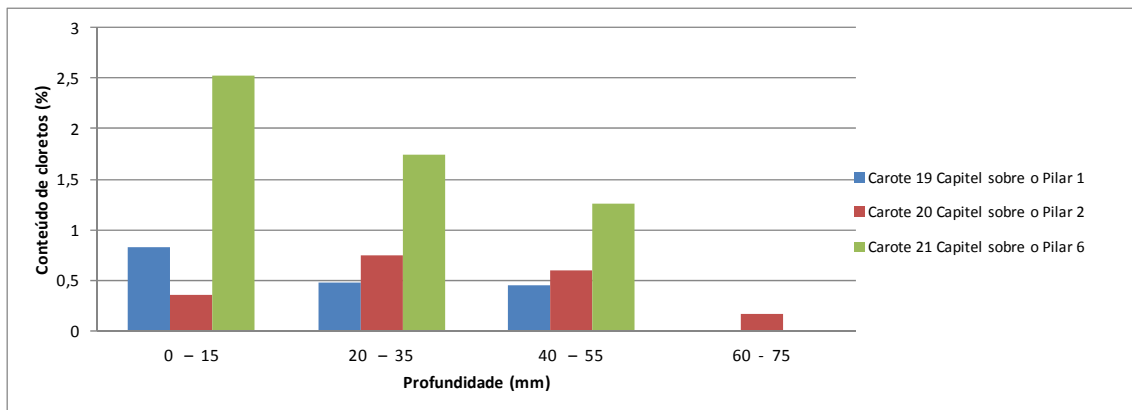


Gráfico A-17: Perfil de iões cloreto dos carotes retirados dos capitéis da O.A. localizada no p.k. 12 + 718 (B)

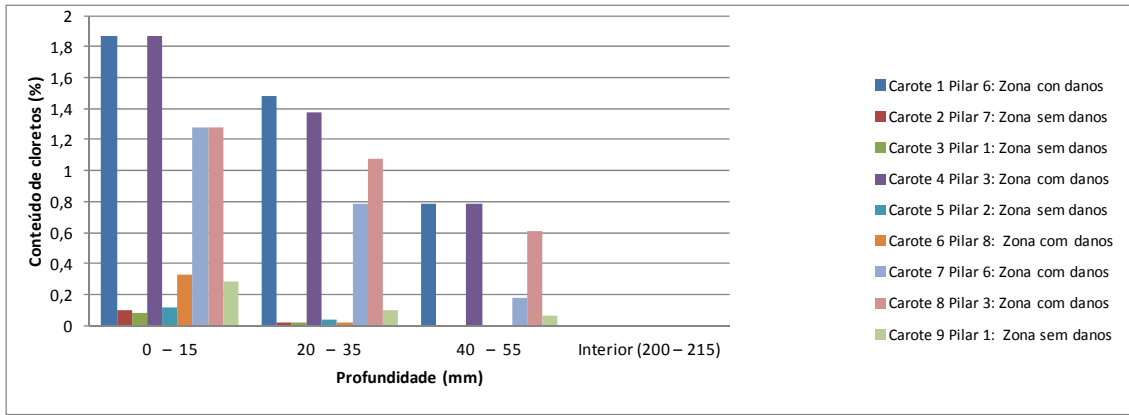


Gráfico A-18: Perfil de iões cloreto dos carotes retirados dos pilares da O.A. localizada no p.k. 12 + 718 (B)

Viadutos situados no p.k. 19+090

Sentido A

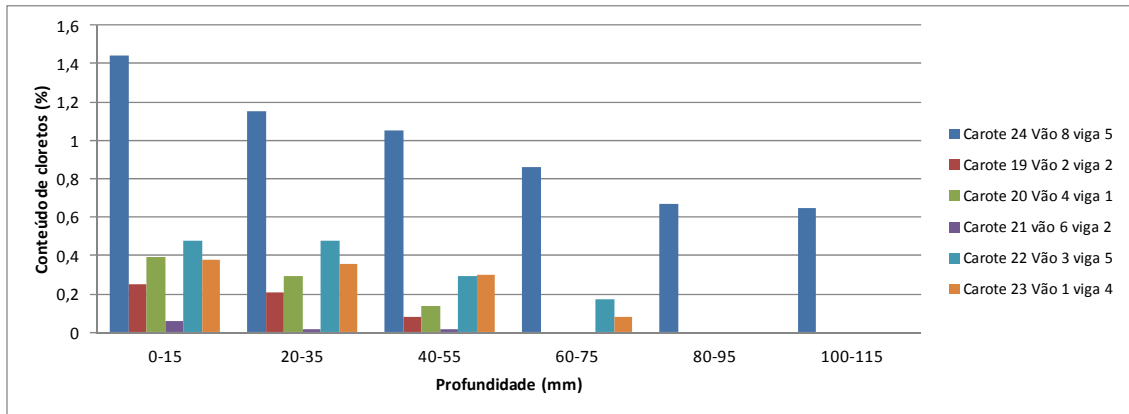


Gráfico A-19: Perfil de iões cloreto dos carotes retirados na laje da O.A. localizada no p.k. 19 + 090 (A)

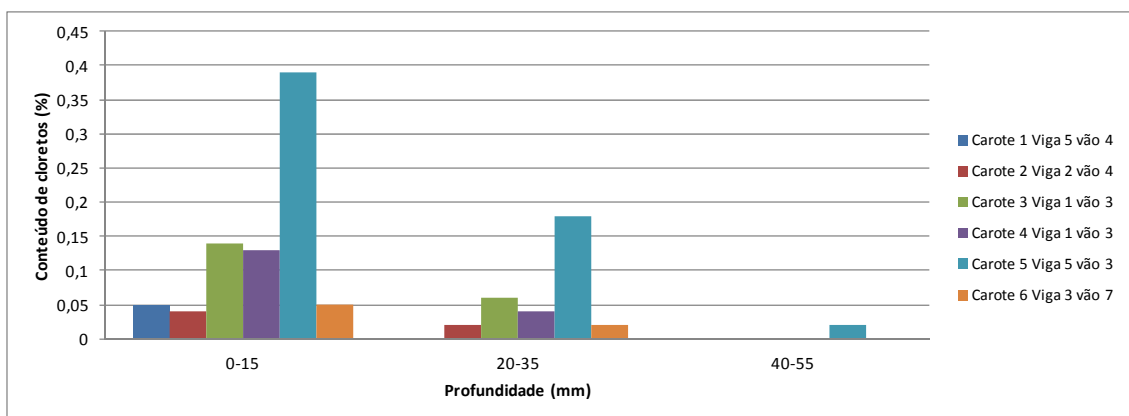


Gráfico A-20: Perfil de iões cloreto dos carotes retirados das vigas da O.A. localizada no p.k. 19 + 090 (A)

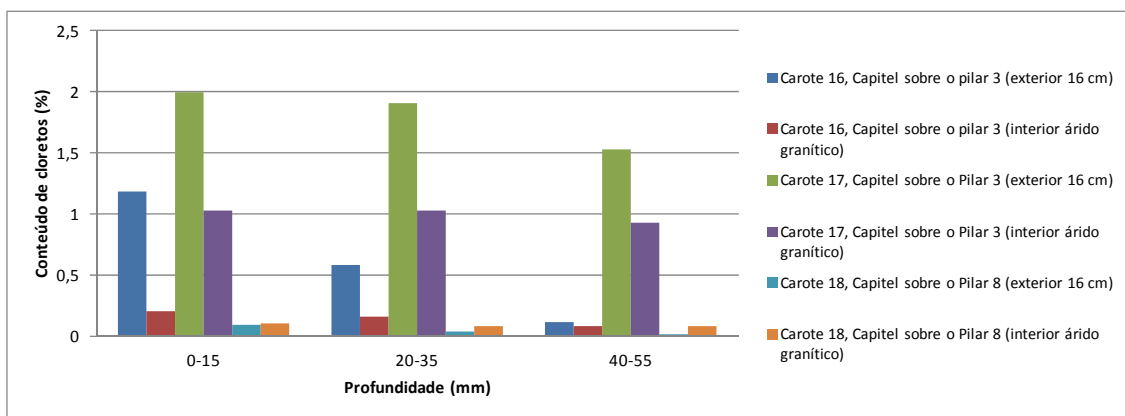


Gráfico A-21: Perfil de iões cloreto dos carotes retirados dos capitéis da O.A. localizada no p.k. 19 + 090 (A)

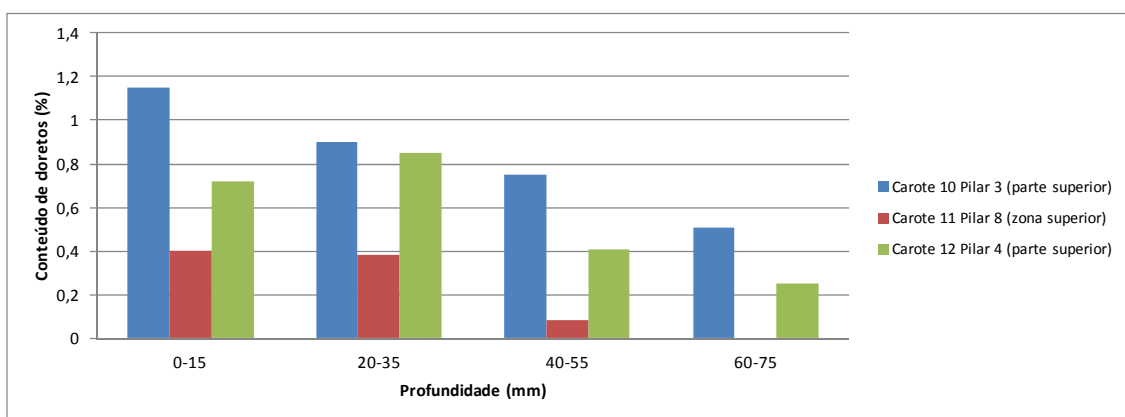


Gráfico A-22: Perfil de iões cloreto dos carotes retirados dos pilares da O.A. localizada no p.k. 19 + 090 (A)

Sentido B

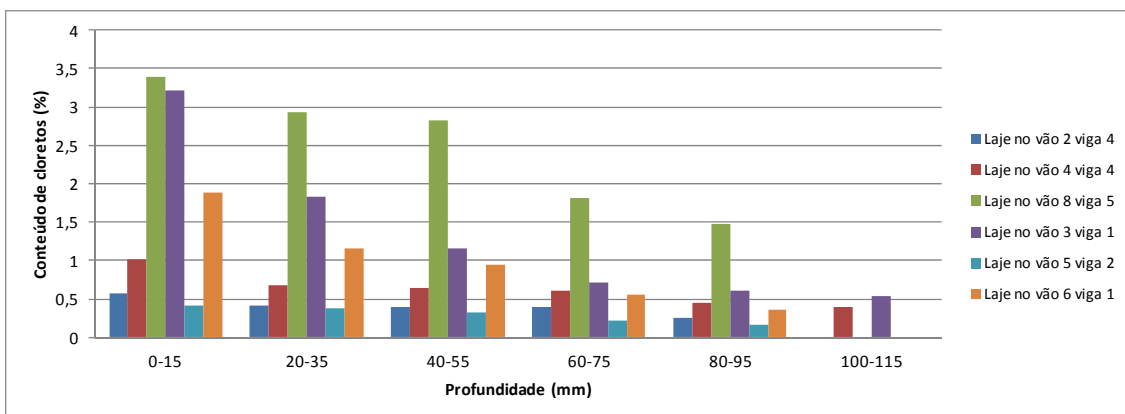


Gráfico A-23: Perfil de iões cloreto dos carotes retirados na laje da O.A. localizada no p.k. 19 + 090 (B)

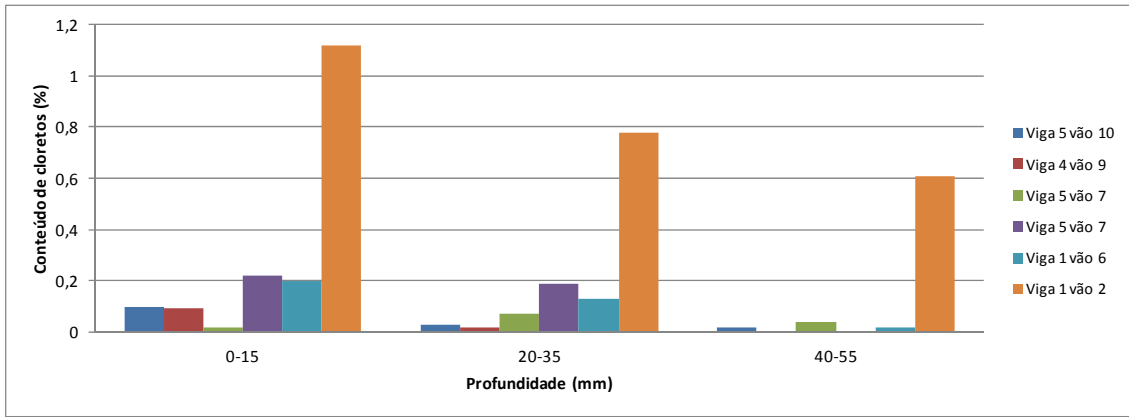


Gráfico A-24: Perfil de iões cloreto dos carotes retirados das vigas da O.A. localizada no p.k. 19 + 090 (B)

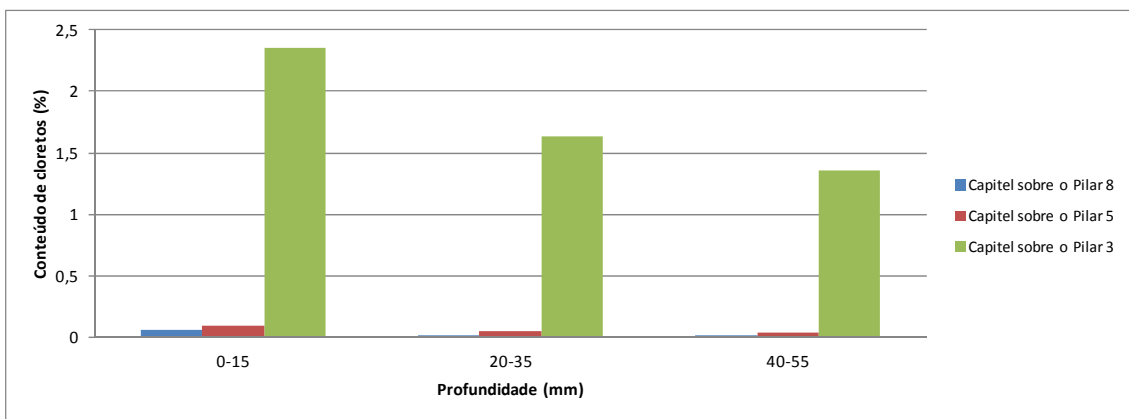


Gráfico A-25: Perfil de iões cloreto dos carotes retirados dos capitéis da O.A. localizada no p.k. 19 + 090 (B)

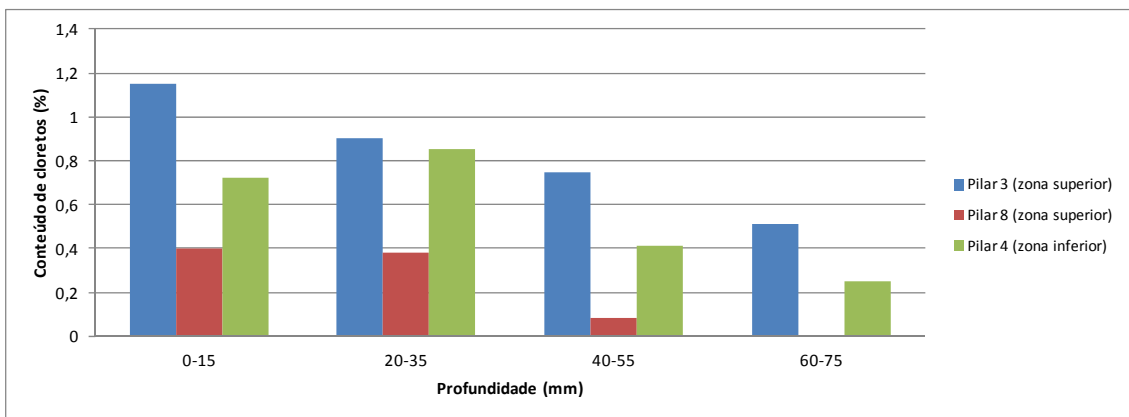


Gráfico A-26: Perfil de iões cloreto dos carotes retirados dos pilares da O.A. localizada no p.k. 19 + 090 (B)

Viadutos situados no p.k. 29+390:

Sentido A

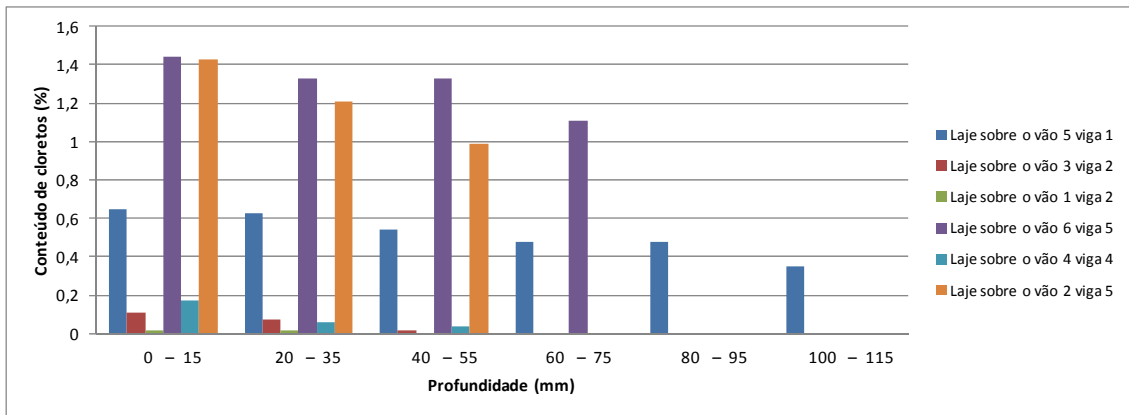


Gráfico A-27: Perfil de iões cloreto dos carotes retirados na laje da O.A. localizada no p.k. 29 + 390 (A)

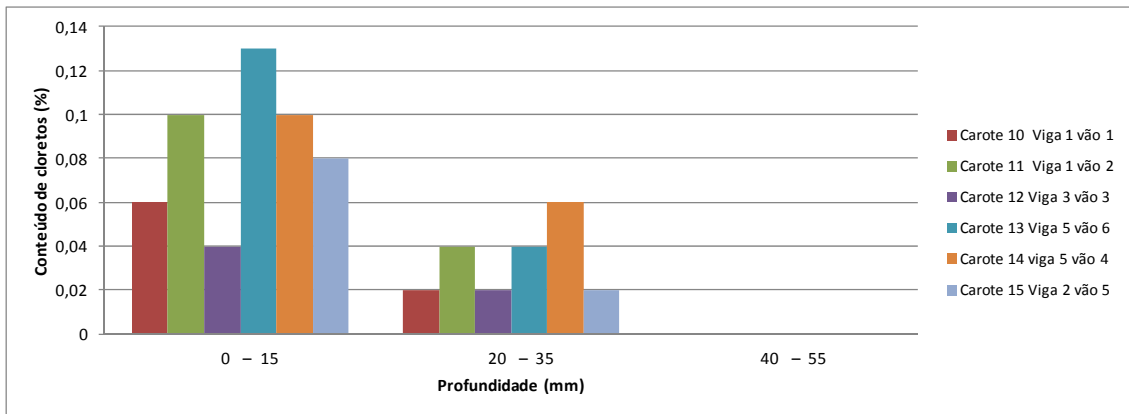


Gráfico A-28: Perfil de iões cloreto dos carotes retirados das vigas da O.A. localizada no p.k. 29 + 390 (A)

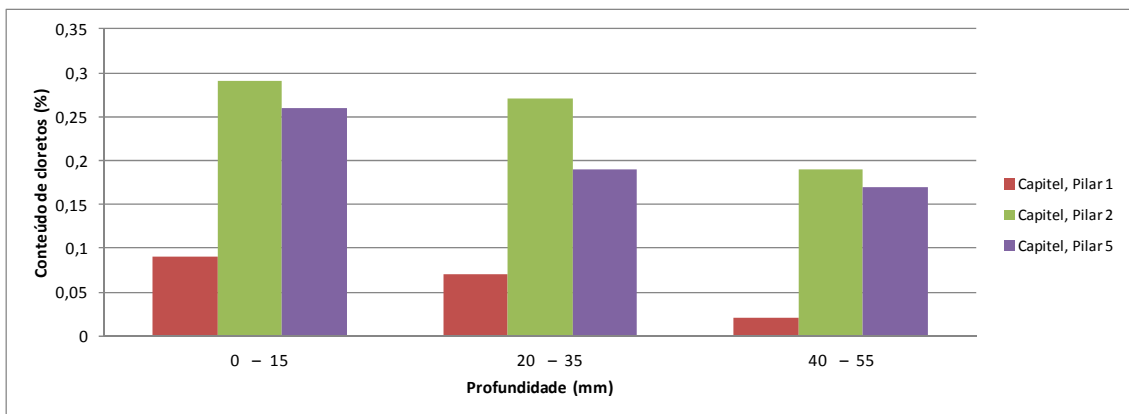


Gráfico A-29: Perfil de iões cloreto dos carotes retirados dos capitéis da O.A. localizada no p.k. 29 + 390 (A)

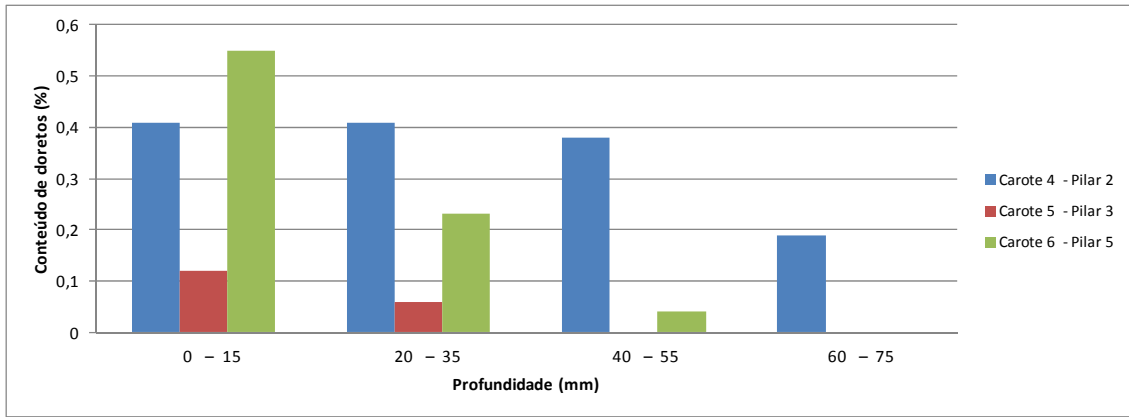


Gráfico A-30: Perfil de iões cloreto dos carotes retirados dos pilares da O.A. localizada no p.k. 29 + 390 (A)

Sentido B

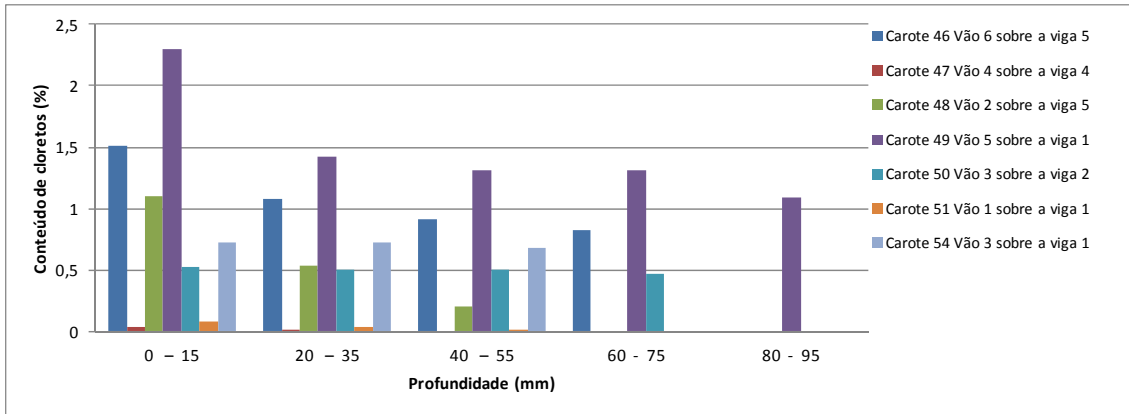


Gráfico A-31: Perfil de iões cloreto dos carotes retirados na laje da O.A. localizada no p.k. 29 + 390 (B)

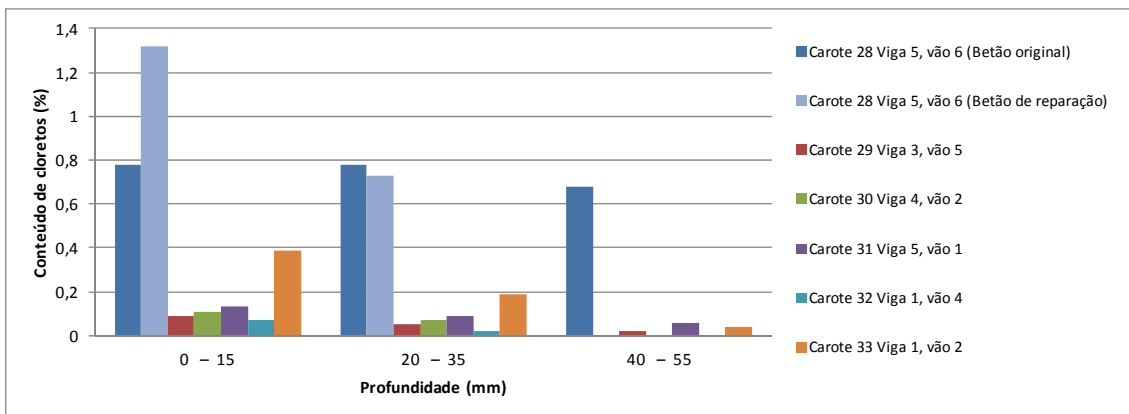


Gráfico A-32: Perfil de iões cloreto dos carotes retirados das vigas da O.A. localizada no p.k. 29 + 390 (B)

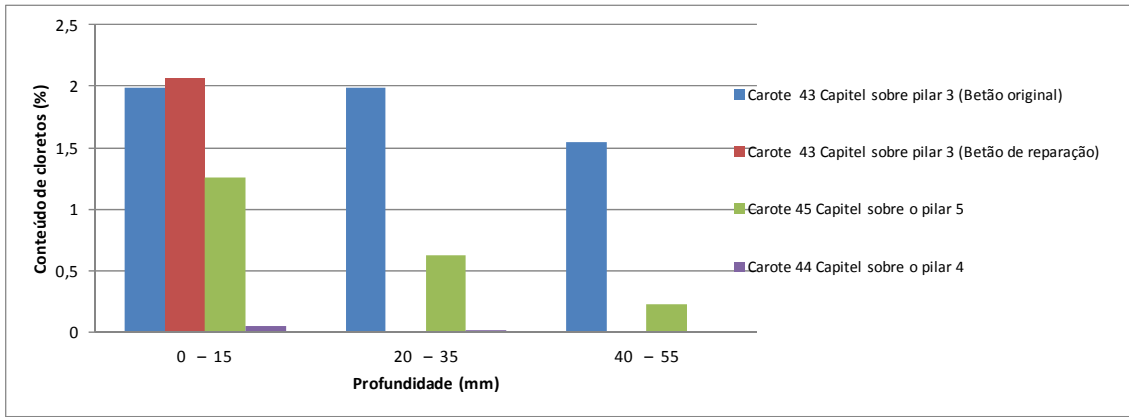


Gráfico A-33: Perfil de iões cloreto dos carotes retirados dos capitéis da O.A. localizada no p.k. 29 + 390 (B)

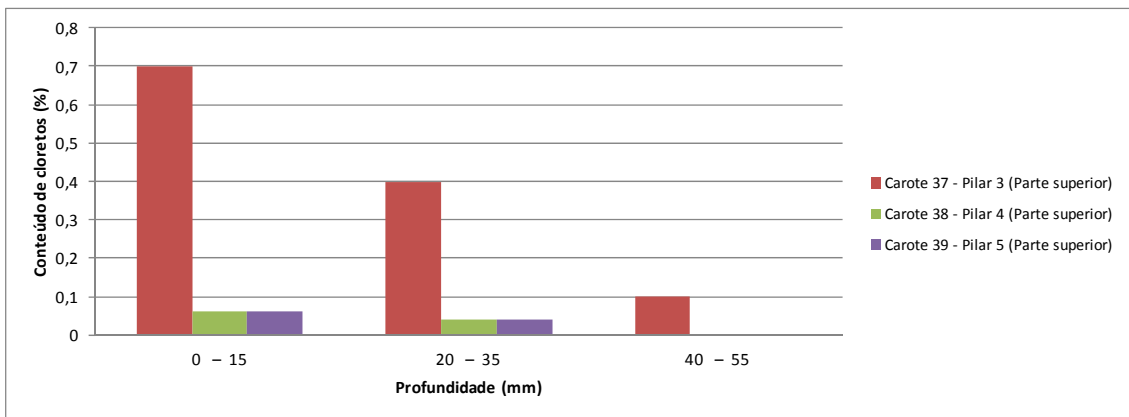


Gráfico A-34: Perfil de iões cloreto dos carotes retirados dos pilares da O.A. localizada no p.k. 29 + 390 (B)

Viadutos situados no p.k. 32+090:

Sentido A

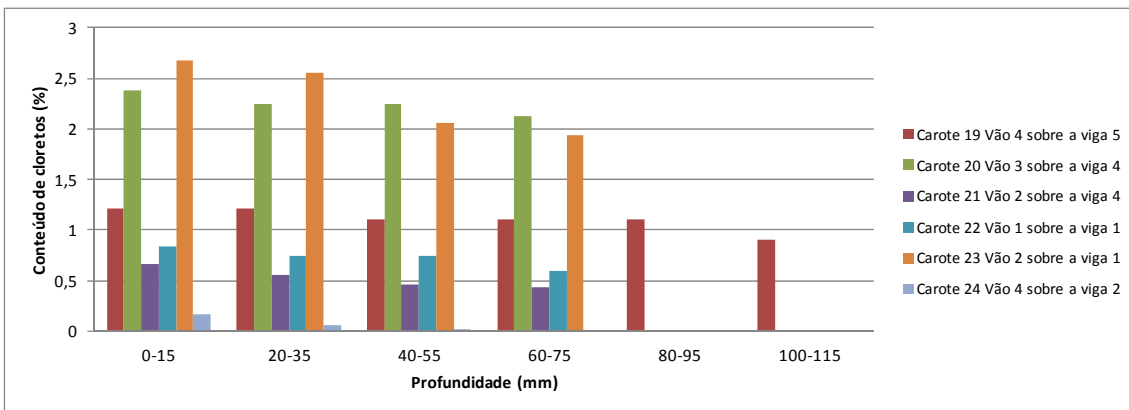


Gráfico A-35: Perfil de iões cloreto dos carotes retirados na laje da O.A. localizada no p.k. 32 + 090 (A)

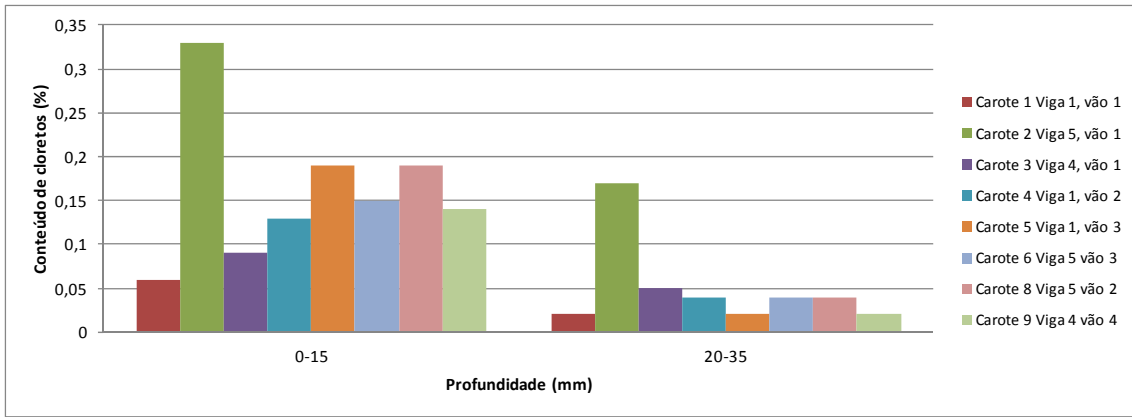


Gráfico A-36: Perfil de iões cloreto dos carotes retirados das vigas da O.A. localizada no p.k. 32 + 090 (A)

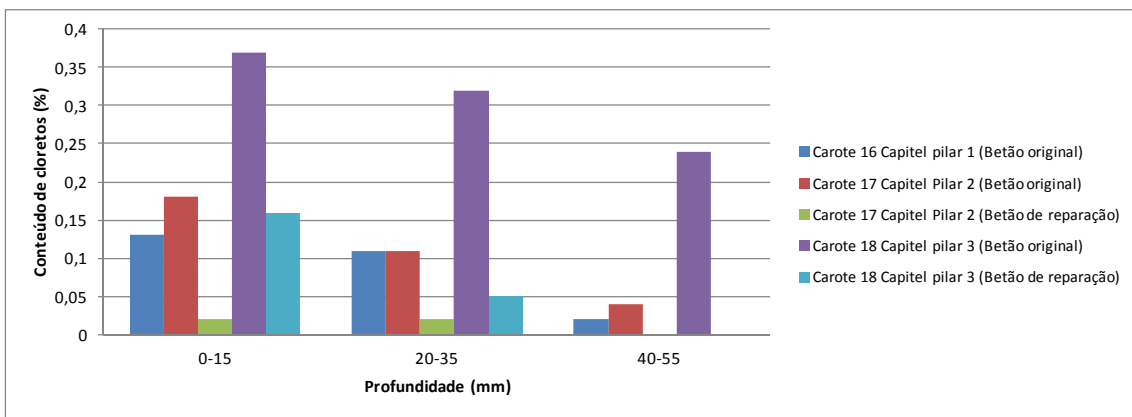


Gráfico A-37: Perfil de iões cloreto dos carotes retirados dos capitéis da O.A. localizada no p.k. 32 + 090 (A)

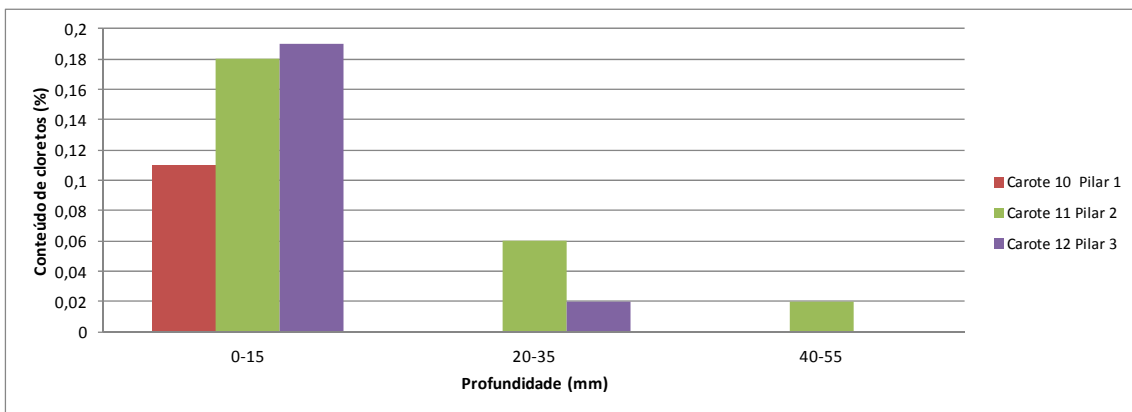


Gráfico A-38: Perfil de iões cloreto dos carotes retirados dos pilares da O.A. localizada no p.k. 32 + 090 (A)

Sentido B

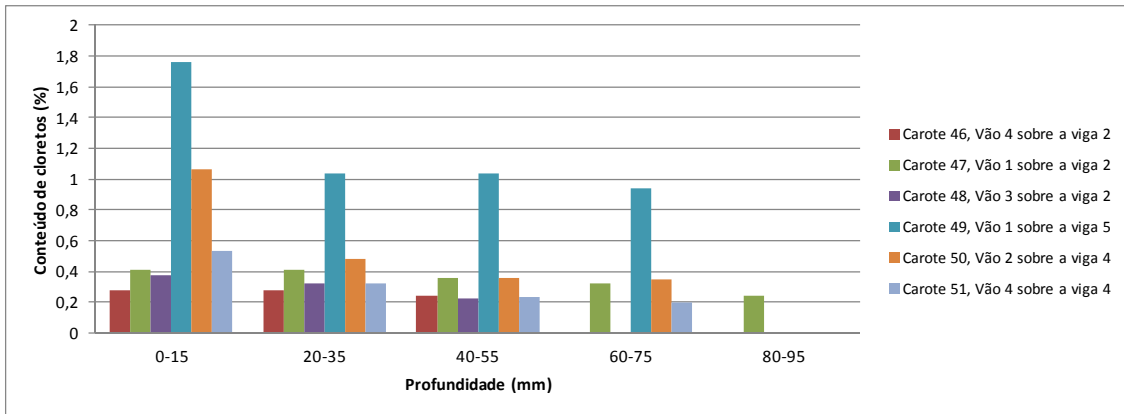


Gráfico A-39: Perfil de iões cloreto dos carotes retirados na laje da O.A. localizada no p.k. 32 + 090 (B)

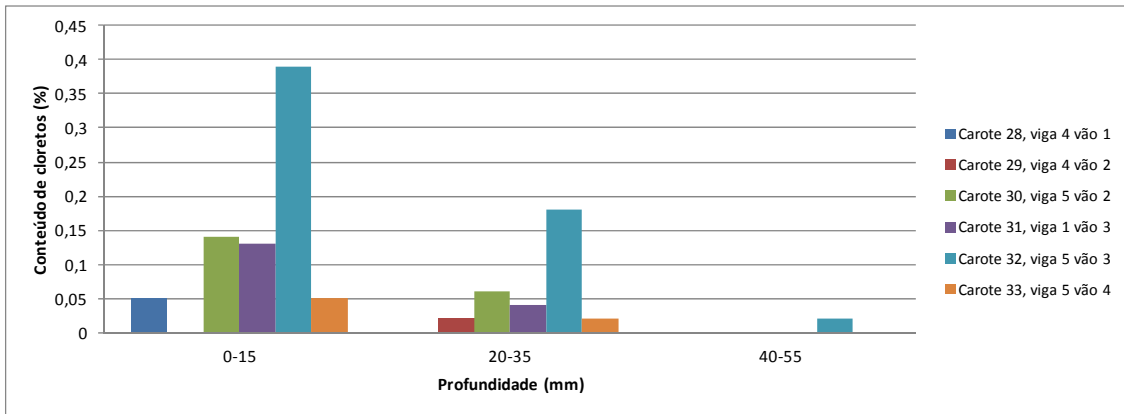


Gráfico A-40: Perfil de iões cloreto dos carotes retirados das vigas da O.A. localizada no p.k. 32 + 090 (B)

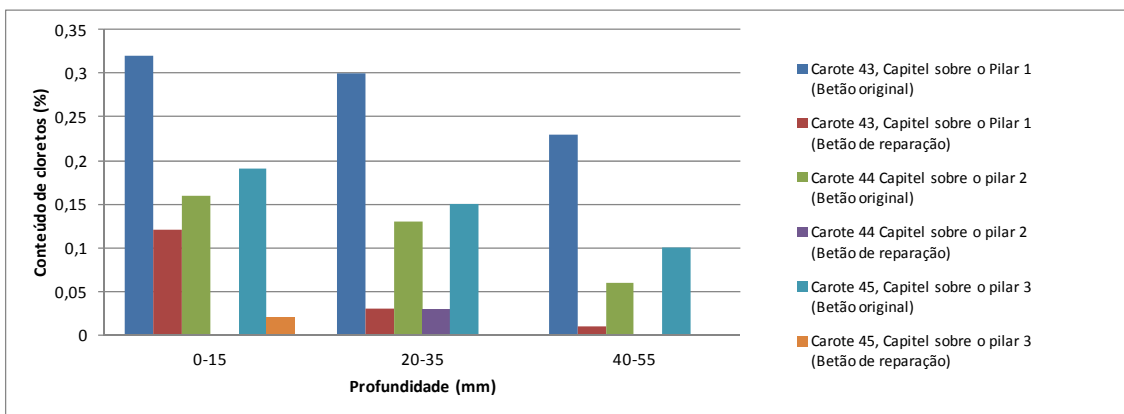


Gráfico A-41: Perfil de iões cloreto dos carotes retirados dos capitéis da O.A. localizada no p.k. 32 + 090 (B)

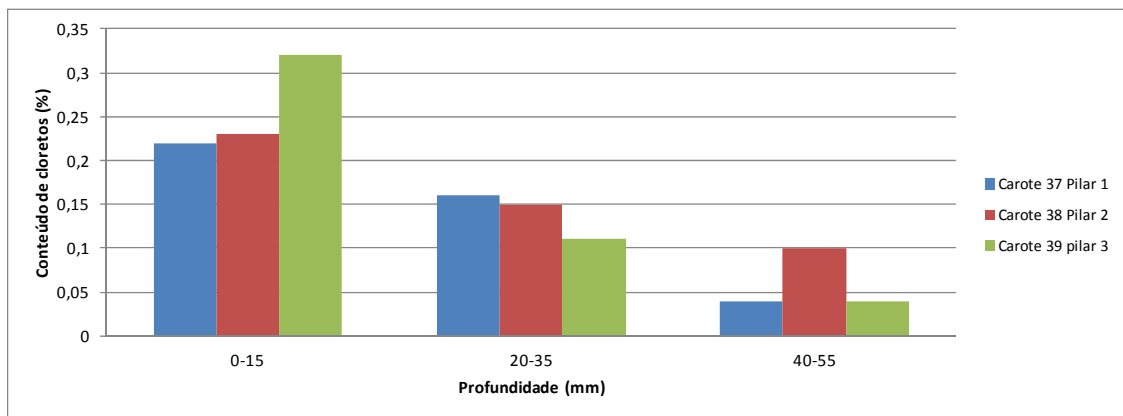


Gráfico A-42: Perfil de íões cloreto dos carotes retirados dos pilares da O.A. localizada no p.k. 32 + 090 (B)