

**Base de dados de durabilidade e anomalias de estruturas
de betão: registos em diversas exposições ambientais**

Filomena Maria de Carvalho Duarte

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia Civil

Orientador: Prof. Dr. António José da Silva Costa

Júri

Presidente: Prof. Dr. José Joaquim Costa Branco de Oliveira Pedro

Orientador: Prof. Dr. António José da Silva Costa

Vogal: Prof. Dr. Augusto Martins Gomes

Novembro de 2016

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, o meu sincero agradecimento à empresa Teixeira Duarte, S.A., na qual exerço a minha atividade profissional desde 1998, pela oportunidade, pelo apoio e pelo significativo incentivo que me deu para a elaboração deste trabalho, sem os quais este não teria sido possível concretizar.

Gostaria de agradecer ao Engº Baldomiro Xavier e ao Engº Paulo Matias Ramos, pelo indispensável apoio e disponibilidade que demonstraram, fundamentais para tornar possível a realização deste trabalho.

Dirijo uma palavra de agradecimento também ao Engº José Magalhães Gonçalves, pela confiança que sempre depositou, e que continua a depositar, no meu trabalho, desde 2002.

E também à Engª Rita Moura, pelo importante apoio e orientação que me deu desde o início do desenvolvimento desta dissertação.

Um especial agradecimento ao meu orientador, Prof. Dr. António Costa, pela disponibilidade e atenção que sempre me dedicou, e pela sua preciosa orientação e empenho no esclarecimento de questões surgidas no desenvolvimento do trabalho, permitindo assim obter o resultado pretendido e a conclusão desta dissertação.

Quero agradecer também à Engª Maria João Correia, Investigadora no Departamento de Materiais do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), pela disponibilidade e pelo contributo relativo ao esclarecimento do atual estado da arte.

Finalmente, uma palavra de agradecimento ao meu marido, e também colega de profissão, Engº Nuno Caseiro, pela sua disponibilidade, pelo constante apoio e ajuda profissional que sempre me dedicou, ao longo dos últimos anos.

RESUMO

Esta dissertação tem como objetivo o estudo e elaboração de uma Base de Dados do desempenho de estruturas de betão, relativo à durabilidade e patologia dos materiais.

Os objetivos são a definição de uma estrutura genérica da BD e o seu preenchimento com a informação técnica que a Teixeira Duarte possui, resultante dos trabalhos de inspeção e reabilitação estrutural realizados.

Foi definida e criada uma estrutura original da Base de Dados de Durabilidade e Anomalias de Estruturas de Betão, em Excel, em conformidade com o tipo de obras e inspeções estruturais estudadas pela autora.

Cada Estrutura é introduzida na BD com referências genéricas de enquadramento, de descrição e com os dados técnicos, sendo estes: as características do betão; armaduras e espessura do recobrimento; resultados de ensaios químicos e eletroquímicos; outras observações e fotografias.

A análise dos dados e dos resultados obtidos na amostragem contida na BD, e o interessante cruzamento desta informação, são realizados através do desenvolvimento de um conjunto de gráficos que lhe estão associados.

Salvo particularidades de cada caso, os resultados obtidos no geral, pelo tratamento e análise da informação contida nas BDs, Geral e Parciais, estão em concordância com a patologia espectável, dada a utilização, o tipo de betão e a classe de exposição ambiental das estruturas.

Esta BD poderá transferir futuramente os dados para a DB-DURATI (LNEC), contribuindo para facilitar a transferência de conhecimentos e referências de base, úteis para futuros estudos de intervenções, investigação, aferição de modelos e como suporte de tomadas de decisão.

Palavras-Chave:

Betão, Inspeção Estrutural, Corrosão, Durabilidade, Anomalias

ABSTRACT

The objective of this dissertation is the study and development of a Database of concrete structures performance, on the durability and condition of materials.

The objectives are the definition of a generic structure of the DB and its filling with technical information that Teixeira Duarte has, resulting from the structural inspection and rehabilitation works performed.

It was defined and created an original Database of Durability and Anomalies of Concrete Structures, in Excel, in accordance with the type of constructions and structural inspections studied by the author.

Each structure is introduced in the DB with generic references of framing, of description and technical data, namely: concrete characteristics; steel reinforcements and thickness of concrete cover; results of chemical and electrochemical tests; other observations and photographs.

The data and results analysis of the sampling contained in the DB, and the interesting intersection of this information, are achieved through the development of a set of graphics that are associated with it.

Unless special features of each case, the results obtained in general, by processing and analysis of information contained in the DBs, General and Partial, are in accordance with the expected pathology, given the use, the type of concrete and the class of environmental exposure of structures.

In the future, this DB may transfer the data to the DB-DURATI (LNEC), helping to facilitate the transfer of knowledge and basic references, useful for future studies of interventions, research, benchmarking of models and as decision-making support.

Key-Words:

Concrete, Structural Inspection, Corrosion, Durability, Anomalies

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v
ÍNDICE.....	vii
LISTA DE FIGURAS	xi
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS	xv
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. ENQUADRAMENTO E OBJETIVOS DO TRABALHO	1
1.2. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	2
2. ESTADO DA ARTE	3
3. VIDA ÚTIL E DURABILIDADE DAS ESTRUTURAS DE BETÃO	5
4. PRINCIPAIS ANOMALIAS DO BETÃO.....	7
4.1. O PROCESSO DE CORROSÃO DAS ARMADURAS.....	7
4.2. DETERIORAÇÃO POR CORROSÃO	9
4.2.1. CARBONATAÇÃO.....	9
4.2.2. CONTAMINAÇÃO POR CLORETOS.....	10
4.3. DETERIORAÇÃO DEVIDA A REAÇÕES EXPANSIVAS INTERNAS	12
4.3.1. AÇÃO DOS SULFATOS.....	12
4.3.2. AÇÃO DOS ÁLCALIS.....	13
4.4. DETERIORAÇÃO POR AÇÃO DA ÁGUA DO MAR	15
4.5. OUTRAS ANOMALIAS.....	15
4.6. REPARAÇÃO/REABILITAÇÃO DAS ESTRUTURAS DE BETÃO	16
5. MÉTODOS DE INSPECÇÃO ESTRUTURAL E ENSAIOS PARA DIAGNÓSTICO	17
5.1. CARACTERIZAÇÃO DO BETÃO.....	17
5.1.1. ENSAIO DE COMPRESSÃO	17
5.1.2. ENSAIO ESCLEROMÉTRICO	18
5.1.3. RESISTIVIDADE ELÉTRICA.....	19
5.1.4. PERMEABILIDADE DO BETÃO	19
5.1.5. POROSIDADE DO BETÃO	20
5.1.6. ENSAIO DE MICROSCOPIA	20

5.2.	ENSAIO DE TRAÇÃO DO AÇO EM ARMADURAS	20
5.3.	DETEÇÃO DE ARMADURAS E RECOBRIMENTO	21
5.4.	DETERIORAÇÃO POR CORROSÃO	21
5.4.1.	MEDIÇÃO DA PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO	21
5.4.2.	TEOR DE CLORETOS	23
5.5.	DETERIORAÇÃO DEVIDA A REAÇÕES EXPANSIVAS INTERNA	24
5.5.1.	SULFATOS	24
5.5.2.	ÁLCALIS	24
5.6.	MEDIÇÃO DOS POTENCIAIS ELÉTRICOS	24
5.7.	MEDIÇÃO DE POTENCIAIS ELÉTRICOS, RESISTIVIDADE E VELOCIDADE DE CORROSÃO	25
5.8.	CAROTES PARA AVALIAÇÃO DE FENDAS	26
5.9.	INSPEÇÃO VISUAL	27
6.	ESTRUTURA E FUNCIONAMENTO DA BASE DE DADOS	29
6.1.	IDENTIFICAÇÃO E DESCRIÇÃO DA ESTRUTURA E SEU ENQUADRAMENTO	30
6.2.	CARACTERÍSTICAS DO BETÃO	30
6.3.	ARMADURAS E ESPESSURA DO RECOBRIMENTO	31
6.4.	ENSAIOS QUÍMICOS E ELETROQUÍMICOS	31
6.5.	OUTRAS OBSERVAÇÕES OU DADOS ADICIONAIS	32
6.6.	INDICAÇÕES ACERCA DE INTERVENÇÃO DE REABILITAÇÃO POSTERIOR	32
6.7.	REGISTOS FOTOGRÁFICOS	32
6.8.	ANÁLISE DE DADOS E RESULTADOS	33
6.8.1.	ANÁLISE DE ENQUADRAMENTO GERAL	33
6.8.2.	ANÁLISE DA CLASSE DE RESISTÊNCIA DO BETÃO	34
6.8.3.	INDICAÇÃO DA RESISTIVIDADE ELÉTRICA DO BETÃO	34
6.8.4.	ANÁLISE DO RECOBRIMENTO, PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO E TEOR DE CLORETOS	34
6.8.5.	BASES DE DADOS PARCIAIS	36
7.	ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS	37
7.1.	BASE DE DADOS GERAL	37
7.1.1.	CLASSE DE RESISTÊNCIA DO BETÃO	40
7.1.2.	RESISTIVIDADE ELÉTRICA DO BETÃO	42

7.1.3.	RECOBRIMENTOS DAS ARMADURAS	43
7.1.4.	PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO NO BETÃO.....	44
7.1.5.	TEOR DE CLORETOS NO BETÃO	47
7.2.	BASE DE DADOS PARCIAL PARA CAIS E PONTES-CAIS	50
7.2.1.	CLASSE DE RESISTÊNCIA DO BETÃO.....	52
7.2.2.	RESISTIVIDADE ELÉTRICA DO BETÃO.....	53
7.2.3.	RECOBRIMENTOS E PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO NO BETÃO	54
7.2.4.	TEOR DE CLORETOS NO BETÃO E RECOBRIMENTOS.....	54
7.3.	BASE DE DADOS PARCIAL PARA EDIFÍCIOS.....	57
7.3.1.	CLASSE DE RESISTÊNCIA DO BETÃO.....	58
7.3.2.	RECOBRIMENTOS E PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO NO BETÃO	60
7.3.3.	TEOR DE CLORETOS NO BETÃO E RECOBRIMENTOS.....	61
7.4.	BASE DE DADOS PARCIAL PARA PONTES	61
7.4.1.	CLASSE DE RESISTÊNCIA DO BETÃO.....	63
7.4.2.	RESISTIVIDADE ELÉTRICA DO BETÃO.....	64
7.4.3.	RECOBRIMENTOS E PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO NO BETÃO	64
7.4.4.	TEOR DE CLORETOS NO BETÃO E RECOBRIMENTOS.....	65
7.5.	BASE DE DADOS PARCIAL PARA RESERVATÓRIOS.....	65
7.5.1.	CLASSE DE RESISTÊNCIA DO BETÃO.....	66
7.5.2.	RESISTIVIDADE ELÉTRICA DO BETÃO.....	67
7.5.3.	RECOBRIMENTOS E PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO NO BETÃO	68
7.5.4.	TEOR DE CLORETOS NO BETÃO E RECOBRIMENTOS.....	69
7.6.	BASE DE DADOS PARCIAL PARA A CLASSE DE EXPOSIÇÃO XC1.....	70
7.7.	BASE DE DADOS PARCIAL PARA A CLASSE DE EXPOSIÇÃO XC4.....	70
7.7.1.	CLASSE DE RESISTÊNCIA DO BETÃO.....	72
7.7.2.	RESISTIVIDADE ELÉTRICA DO BETÃO.....	74
7.7.3.	RECOBRIMENTOS E PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO NO BETÃO	75
7.7.4.	TEOR DE CLORETOS NO BETÃO E RECOBRIMENTOS.....	76
7.8.	BASE DE DADOS PARCIAL PARA A CLASSE DE EXPOSIÇÃO XS3.....	77
8.	CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	79

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

VOLUME II - ANEXOS: ANEXO 1 - BASE DE DADOS GERAL; ANEXO 2 - BASES DE DADOS PARCIAIS

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Esquema basilar da estrutura da DB-DURATI.....	3
Figura 2: Modelo para a degradação do betão sob ação da carbonatação e cloretos (TUUTTI, 1982)	5
Figura 3: Mecanismo da corrosão: modelo de uma célula de corrosão (Costa, A., 2015).....	8
Figura 4: Fendilhação e delaminação da camada de betão de recobrimento, consequentes da corrosão das armaduras (Costa, A., 2015)	8
Figura 5: Efeito das condições de exposição e da qualidade do betão no teor crítico de cloretos (Costa, A. (1997)).....	11
Figura 6: Mecanismo do ataque de sulfatos provenientes do exterior (Costa, A., 2015).....	13
Figura 7: Mecanismo do ataque dos álcalis (Costa, A., 2015).....	14
Figura 8: Mecanismo do ataque químico pela água do mar (Costa, A., 1999).....	15
Figura 9: Exemplo de execução de carotagem.....	17
Figura 10: Ensaio esclerométrico	18
Figuras 11a e 11b: Pacómetro para deteção de armaduras: equipamento e exemplo de utilização.....	21
Figura 12a: Esquema de aplicação de fenolftaleína	22
Figura 12b: Carotes de betão após aplicação de fenolftaleína.....	22
Figura 13: Conjunto de elementos para realização do Teste Rápido de Cloretos no betão	23
Figura 14: Exemplo da realização de medições de potenciais elétricos.....	25
Figuras 15a e 15b: Equipamento de ensaios eletroquímicos e exemplo de utilização	26
Figuras 16a e 16b: Equipamento de ensaios eletroquímicos e exemplos de utilização.....	26
Figura 17: Exemplo de carote extraída para avaliação de fenda.....	26
Figura 18: Gráfico do Tipo de Estruturas - BD Geral	37
Figura 19: Gráfico das Classes de Exposição Ambiental - BD Geral	38
Figura 20: Gráfico dos Países - BD Geral	38
Figura 21: Gráfico do Ano de Construção / Inspeção - BD Geral	39
Figura 22: Gráfico Total das Classes de Resistência do Betão - BD Geral.....	40
Figura 23: Gráfico das Classes de Resistência do Betão em Pilares - BD Geral.....	41
Figura 24: Gráfico das Classes de Resistência do Betão em Vigas - BD Geral.....	41
Figura 25: Gráfico das Classes de Resistência do Betão em Lajes ou Paredes - BD Geral.....	42
Figura 26: Gráfico da Resistividade Elétrica do Betão - BD Geral.....	43
Figura 27: Gráfico do Recobrimento das Armaduras - BD Geral.....	44
Figura 28: Gráfico da Profundidade de Carbonatação no Betão - BD Geral	45
Figura 29: Gráfico da Profundidade de Carbonatação no Betão e Recobrimento em Pilares - BD Geral	46
Figura 30: Gráfico da Profundidade de Carbonatação no Betão e Recobrimento em Vigas - BD Geral ..	46
Figura 31: Gráfico da Profundidade de Carbonatação no Betão e Recobrimento em Lajes ou Paredes - BD Geral.....	47
Figura 32: Esquema indicativo da leitura dos gráficos de teor de cloretos vs. profundidade vs. recobrimento.....	48
Figura 33: Gráfico do Teor de Cloretos no Betão em Pilares, com Profundidade e o Recobrimento - BD Geral	49

Figura 34: Gráfico do Teor de Cloretos no Betão em Vigas, com Profundidade e o Recobrimento - BD Geral	49
Figura 35: Gráfico do Teor de Cloretos no Betão em Lajes ou Paredes, com Prof. e o Recobrimento - BD Geral	50
Figura 36: Gráfico dos Países - BD p/ Cais e Pontes-Cais.....	51
Figura 37: Gráfico do Ano de Construção / Inspeção - BD p/ Cais e Pontes-Cais.....	51
Figura 38: Gráfico Total das Classes de Resistência do Betão - BD p/ Cais e Pontes-Cais.....	52
Figura 39: Gráfico da Idade da Estrutura vs. Resistência do Betão - BD p/ Cais e Pontes-Cais	53
Figura 40: Gráfico da Resistividade Elétrica do Betão - BD p/ Cais e Pontes-Cais	54
Figura 41: Gráfico do Teor de Cloretos no Betão em Pilares, com Profundidade e o Recobrimento - BD p/ Cais e Pontes-Cais.....	55
Figura 42: Gráfico do Teor de Cloretos no Betão em Vigas, com Prof. e o Recobr. - BD p/ Cais e Pontes-Cais.....	56
Figura 43: Gráfico do Teor de Cloretos no Betão em Lajes ou Paredes, com Prof. e o Recobr. - BD p/ Cais e Pontes-Cais	56
Figura 44: Gráfico do Ano de Construção / Inspeção - BD p/ Edifícios	57
Figura 45: Gráfico Total das Classes de Resistência do Betão - BD p/ Edifícios	58
Figura 46: Gráfico das Classes de Resistência do Betão em Pilares - BD p/ Edifícios.....	59
Figura 47: Gráfico das Classes de Resistência do Betão em Vigas - BD p/ Edifícios.....	59
Figura 48: Gráfico das Classes de Resistência do Betão em Lajes ou Paredes - BD p/ Edifícios.....	59
Figura 49: Gráfico da Idade da Estrutura vs. Resistência do Betão - BD p/ Edifícios.	60
Figura 50: Gráfico da Profundidade de Carbonatação no Betão e Recobrimento - BD p/ Edifícios	61
Figura 51: Gráfico das Classes de Exposição Ambiental - BD p/ Pontes.....	62
Figura 52: Gráfico dos Países - BD p/ Pontes	62
Figura 53: Gráfico Total das Classes de Resistência do Betão - BD p/ Pontes	63
Figura 54: Gráfico da Profundidade de Carbonatação no Betão e Recobrimento - BD p/ Pontes	64
Figura 55: Gráfico do Teor de Cloretos no Betão, com Profundidade e o Recobrimento - BD p/ Pontes. 65	
Figura 56: Gráfico das Classes de Exposição Ambiental - BD p/ Reservatórios.....	66
Figura 57: Gráfico Total das Classes de Resistência do Betão - BD p/ Reservatórios	67
Figura 58: Gráfico das Classes de Resistência do Betão em Pilares - BD p/ Reservatórios	67
Figura 59: Gráfico da Resistividade Elétrica do Betão - BD p/ Reservatórios	68
Figura 60: Gráfico da Profundidade de Carbonatação no Betão e Recobrimento - BD p/ Reservatórios. 69	
Figura 61: Gráfico do Teor de Cloretos no Betão, Profundidade e o Recobrimento - BD p/ Reservatórios	70
Figura 62: Gráfico do Tipo de Estruturas - BD p/ XC4	71
Figura 63: Gráfico dos Países - BD p/ XC4.....	71
Figura 64: Gráfico do Ano de Construção / Inspeção - BD p/ XC4.....	72
Figura 65: Gráfico Total das Classes de Resistência do Betão - BD p/ XC4.....	73
Figura 66: Gráfico das Classes de Resistência do Betão em Pilares - BD p/ XC4	73
Figura 67: Gráfico das Classes de Resistência do Betão em Lajes ou Paredes - BD p/ XC4	73

Figura 68: Gráfico da Idade da Estrutura vs. Resistência do Betão - BD p/ XC4.....	74
Figura 69: Gráfico da Resistividade Elétrica do Betão - BD p/ XC4	75
Figura 70: Gráfico da Profundidade de Carbonatação no Betão e Recobrimento - BD p/ XC4	76
Figura 71: Gráfico do Teor de Cloretos no Betão, com Profundidade e o Recobrimento - BD p/ XC4	77

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

Abreviaturas

BD	Base de Dados
c/	com
carbon.	carbonatação
EC2	Eurocódigo 2
ID	Identificação do campo de dados na BD
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
mín.	mínimo
p/	para
prof.	profundidade
quant.	quantidade
RAS	Reacção álcalis-sílica
Recobr.	Recobrimento
RSI	Reacção sulfática de origem interna

Símbolos

Cl^-	Iões Cloreto
f_{cd}	Valor de cálculo da tensão de rotura à compressão do betão
f_{ck}	Valor característico da tensão de rotura à compressão do betão
R	Índice esclerométrico
W_m	Tensão de resistência superficial à compressão do betão

1. INTRODUÇÃO

A elaboração de uma dissertação de mestrado com o tema “Base de Dados de Durabilidade e Anomalias de Estruturas de Betão: Registos em Diversas Exposições Ambientais” surge da vontade da autora aprofundar e consolidar os seus conhecimentos nesta área, através do desenvolvimento de um trabalho de compilação e sistematização de dados e informação técnica que se encontravam dispersos.

Trata-se da consolidação de conhecimentos adquiridos ao longo de vários anos de experiência profissional nesta área, compilando e sistematizando informação técnica resultante dos diversos estudos de inspeção estrutural e diagnóstico realizados em vários tipos de estruturas de betão, em Portugal e no estrangeiro, com diferentes enquadramentos ambientais e em situações variadas.

1.1. ENQUADRAMENTO E OBJETIVOS DO TRABALHO

A durabilidade das estruturas é um tema que nas últimas décadas tem tido uma relevância crescente.

O aumento do parque de obras construído, o elevado número de casos que evidenciaram um desempenho inadequado das estruturas de betão face à durabilidade e o aumento dos custos relativos a intervenções de reabilitação estrutural, têm evidenciado a necessidade de dar continuidade aos trabalhos de investigação em curso neste domínio e de divulgar no meio técnico os conhecimentos atuais relativos ao desempenho de obras existentes.

Neste contexto, torna-se importante o desenvolvimento de uma base de dados relativa à durabilidade das estruturas de betão, sujeitas aos diferentes ambientes de exposição, que identifique e caracterize os materiais estruturais, as anomalias, o nível de deterioração e o tempo relativo ao seu desenvolvimento, e ainda, quando possível, também registe informação acerca das metodologias de intervenção de reabilitação/reparação implementadas e eventualmente do seu desempenho.

A base de dados pode ser de grande importância e utilidade para o meio técnico e poderá, certamente, contribuir para a redução dos insucessos que frequentemente se verificam em intervenções de reabilitação.

Assim sendo, o trabalho desenvolvido nesta dissertação tem também como objetivo o estudo e elaboração de uma base de dados do desempenho de estruturas de betão, no que respeita à durabilidade e patologia dos materiais, em diferentes tipos de estruturas e de exposições ambientais.

Os principais objetivos são a definição de uma estrutura genérica da base de dados e o seu carregamento/preenchimento com a extensa informação técnica que a Teixeira Duarte possui, através do levantamento de grande parte dos trabalhos de inspeção estrutural (campanhas de ensaios) e/ou reabilitação e reparação estrutural realizados até hoje pela empresa, em Portugal e fora.

Pretende-se favorecer a organização e a partilha de resultados e dados técnicos, relativos à patologia do betão armado, que não foram obtidos em laboratório, mas sim num vasto leque de exemplos de estudos e intervenções realizados em estruturas reais existentes, no decurso da sua vida útil.

Esta base de dados poderá posteriormente transferir os seus registos para a DB-DURATI, criada no Projeto DuratiNet e gerida atualmente pelo LNEC, contribuindo para facilitar a transferência de conhecimentos e referências de base, úteis para futuros estudos de intervenções em obras, para trabalhos de investigação e para aferição de modelos de previsão de vida útil, que suportem tomadas de decisão relativas à manutenção de estruturas.

Por limitações de dimensão do documento e de tempo disponível para a realização da dissertação, não será possível apresentar todo o detalhe da informação recolhida e tratada, nem a totalidade dos gráficos produzidos.

Os dados recolhidos e tratados permitem realizar também diversos tipos de análises que não foram efetuadas nesta dissertação, pelas limitações atrás referidas, mas que, certamente, terão muito interesse prático, nomeadamente no que se refere ao cruzamento da informação obtida. Trata-se de estudo que poderá ser realizado em trabalhos futuros.

1.2. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

A dissertação apresenta-se da seguinte forma:

1ª parte – capítulos 1 e 2, respetivamente, de Introdução, com breve descrição do enquadramento e dos objetivos da dissertação, bem como da sua organização, e do Estado da Arte.

2ª parte – capítulos 3 a 5, que são capítulos de introdução dos temas e de explicação básica dos conceitos, fenómenos e métodos abordados na Base de Dados, para permitir a sua interpretação. Nestes capítulos é feito o enquadramento das principais questões abordadas e o esclarecimento acerca da informação apresentada na Base de Dados, nomeadamente no que respeita à vida útil e durabilidade das estruturas de betão, as principais anomalias e os métodos de inspeção estrutural e ensaios.

3ª parte – capítulos 6 e 7, de desenvolvimento do trabalho de criação e carregamento da Base de Dados e de apresentação e análise de resultados.

4ª parte – capítulo 8, com abordagem das conclusões possíveis e considerações acerca de desenvolvimentos futuros.

A informação na DB-DURATI está agrupada em quatro áreas principais de arquivo de dados: informação de carácter genérico, histórico de ações/intervenções, dados relativos às características ambientais e dados sobre as propriedades dos materiais. Para cada estrutura, estes dados aparecem associados aos elementos estruturais da mesma o que possibilita uma caracterização detalhada através da sua associação aos diferentes elementos e/ou componentes.

É claro que a funcionalidade desta base de dados depende do seu preenchimento com um volume significativo de informação fiável, acerca de diferentes tipos de estruturas e de condições ambientais, pelo que será essencial o contributo das entidades gestoras e donos de obra, para disponibilizarem este tipo de dados técnicos, relativos ao desempenho dos materiais nas estruturas estudadas.

A DB-DURATI está disponível desde o encerramento do projeto DURATINET, em 2012, e a sua gestão está sediada no LNEC, sendo disponibilizadas oportunamente alterações de otimização e atualização do funcionamento da base de dados.

De referir ainda, que a gestão de utilizadores implementada na DB-DURATI permite a definição de diferentes níveis de acesso, desde restrito a integral ou público, o que permite garantir a confidencialidade parcial de grupos de dados, sempre que requerido pela entidade que os disponibiliza. Esta definição dos níveis de acesso é efetuada pelo administrador, para os grupos e utilizadores pertencentes a um determinado grupo. Cada gestor de grupo (empresa/dono de obra) define o que deverá ser público e privado, podendo isto ser também definido nos diferentes campos de dados e de informação prestada acerca de cada obra/estrutura. A consulta dos dados classificados de domínio público é livre e acessível em dbdurati.lnec.pt.

Não se tem conhecimento da existência de qualquer outra base de dados do mesmo tipo, em Portugal ou fora, que fosse também criada objetivando a partilha de informação relativa ao desempenho dos materiais de construção. A DB-DURATI é também referida e deverá ser utilizada fora de Portugal, não existindo quaisquer restrições neste domínio.

Relativamente à situação atual da base de dados, existem já várias obras com informação arquivada na DB-DURATI, porém, em muitas delas, o acesso aos dados está limitado, pois as entidades envolvidas contactadas não autorizaram o livre acesso.

A DB-DURATI será alvo de novas propostas de projetos de divulgação e utilização, visando a sua adequada divulgação e a minimização das limitações identificadas entretanto, pretendendo-se também otimizar a facilidade de introdução de dados e oferecer formas de “upload” automáticas.

Uma vez que a ideia original é disponibilizar os dados à comunidade científica e técnica para que os possam usar para os fins de estudo e análise já referidos, é importante continuar a sensibilizar as várias entidades para a relevância da partilha de informação técnica.

3. VIDA ÚTIL E DURABILIDADE DAS ESTRUTURAS DE BETÃO

A vida útil de uma construção pode ser definida como o período de tempo, após entrada em serviço, durante o qual esta conserva os seus requisitos de projeto, sem recurso a qualquer intervenção profunda ou custos inesperados de manutenção.

Sob o ponto de vista da durabilidade, o período de vida útil é condicionado pela penetração de substâncias agressivas para o betão e pelas reações destrutivas que originam com os componentes do betão armado. De entre essas, a corrosão das armaduras condiciona, na generalidade dos casos, a vida útil da estrutura.

Em 1982, Tuutti propôs um modelo simplificado qualitativo de previsão de vida útil, considerando a degradação por corrosão (ver Figura 2). O período de iniciação (t_1) corresponde ao intervalo de tempo ao fim do qual as armaduras perdem parte significativa da proteção conferida pelo betão, quer seja por carbonatação, cloretos ou outros. O período de propagação (t_2) decorre após o período de iniciação e até que a corrosão assuma um nível de degradação inaceitável.



Figura 2: Modelo para a degradação do betão sob ação da carbonatação e cloretos (TUUTTI (1982)).

A vida útil de uma construção ou de um elemento construtivo é, portanto, “o período, depois de entrar em utilização, durante o qual todas as suas propriedades relevantes estão acima de níveis mínimos aceitáveis, considerando uma manutenção corrente” (ASTM E632-81, 1981). Este conceito apresenta, no entanto, várias formas de interpretação, quando se procura aplicá-lo efetivamente à definição da vida útil de uma construção.

Na generalidade, as construções são realizadas para oferecer um serviço à sociedade, referente a um certo período que se define como a sua vida útil.

Os benefícios deste serviço podem ser quantificados, assim como o valor económico global das construções, durante a sua vida, pode ser estimado, em estudos adequados. Para uma construção ser economicamente rentável, no fim desse período, os benefícios devem ser superiores aos custos de projeto, construção e manutenção.

Os problemas da durabilidade dos materiais estruturais são os mais importantes e correspondem em geral à deterioração do betão ou à corrosão das estruturas metálicas ou das armaduras do betão armado. Atualmente, os Regulamentos, para além das ações e da resistência dos materiais, definem também especificações para os materiais e para os processos construtivos, que garantem que, em termos de durabilidade, se mantenham os mesmos níveis de segurança estrutural no final da vida útil.

A estimativa da vida útil das construções com base na deterioração dos materiais é um problema complexo, sujeito a grandes investigações em muitos países. Para essa estimativa são necessários: a definição dos estados limite associados ao fim da vida útil de projeto, a caracterização do ambiente, o estudo dos fenómenos de degradação e a definição de modelos matemáticos para simular essas degradações.

As normas atuais, nomeadamente as normas portuguesas, tratam este assunto através de duas metodologias distintas, com nível de desenvolvimento diferente: metodologia prescritiva tratada na Especificação E464 - LNEC e metodologia de desempenho tratada na Especificação E465 - LNEC. A nova regulamentação relativa ao betão armado trata a durabilidade de uma forma abrangente e eficaz, relacionando-a diretamente com a qualidade do betão aplicado e com as espessuras do recobrimento das armaduras.

A inspeção/monitorização permitirá obter periodicamente o valor dos parâmetros principais que controlam a degradação do betão, como a profundidade de carbonatação, o teor de cloretos, os níveis de corrosão das armaduras e outros, que permitirão atualizar os modelos de previsão adotados em projeto e realizar previsões mais eficazes da vida útil.

4. PRINCIPAIS ANOMALIAS DO BETÃO

4.1. O PROCESSO DE CORROSÃO DAS ARMADURAS

Um betão de boa qualidade contém nos seus poros uma solução de alta alcalinidade, com valores de pH da ordem dos 12.5 a 13.5, que é devida essencialmente à presença de hidróxido de cálcio, Ca(OH)_2 , resultante da hidratação do cimento, e, em menores quantidades, de hidróxidos de sódio e de potássio.

Numa estrutura em betão armado, o aço das armaduras encontra-se em contacto com esta solução alcalina, em que o metal está no estado passivo, formando-se uma película protetora superficial de óxido de ferro, $\gamma\text{Fe}_2\text{O}_3$, que impede a corrosão. A passivação trata-se, portanto, de um mecanismo natural de proteção das armaduras.

Por outro lado, o betão de recobrimento funciona como uma proteção contra o acesso de agentes agressivos exteriores, constituindo uma barreira de proteção entre as armaduras e o meio ambiente exterior.

A ocorrência de corrosão do aço das armaduras, em estruturas de betão armado, pode ser resultado de um ou da combinação de vários fatores, como: insuficiências de projeto; a incorreta caracterização das ações ambientais; deficiências construtivas; a utilização de betões de má qualidade; a execução inadequada das estruturas com recobrimentos reduzidos; a redução do pH devida à carbonatação do betão; a contaminação do betão por iões cloro; etc.

O processo de degradação, na vida útil de uma estrutura, desenvolve-se em duas fases: iniciação e propagação. Na fase de iniciação ocorre a penetração dos agentes agressivos no betão de recobrimento, até atingirem o nível das armaduras e provocarem a destruição da película passiva. Esta fase tem uma duração que depende principalmente das condições ambientais do meio onde a estrutura se encontra, que determinam os mecanismos de transporte dos agentes agressivos, e da qualidade e da espessura do betão de recobrimento, assegurando o grau de proteção das armaduras. Na fase de propagação ocorre o desenvolvimento do processo de corrosão das armaduras e das suas consequências a nível estrutural. Nesta fase, a velocidade com que a estrutura se deteriora depende essencialmente das condições de exposição.

O processo de corrosão do aço das armaduras no betão armado é um processo eletroquímico, induzido por diferenças de potencial existentes entre as várias zonas das armaduras. As zonas despassivadas da armadura funcionam como ânodo e as zonas com acesso ao oxigénio funcionam como cátodo (ver Figura 3). No ânodo ocorre a dissolução do ferro, passando os iões para a solução na forma Fe^{++} , libertando dois eletrões ($\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{++} + 2\text{e}^-$). A armadura funciona como condutor elétrico, permitindo a passagem destes eletrões para o cátodo. Na interface betão/armadura os eletrões reagem com o oxigénio e a água, resultando em iões de hidróxido (OH^-) que se direcionam

para o ânodo através do betão (eletrólito), completando o circuito elétrico ($1/2\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow 2\text{OH}^-$). Os íões de hidróxido gerados na reação catódica aumentam a alcalinidade do betão e fortalecem a película passiva na zona catódica. Na zona anódica ocorrem ainda reações secundárias, das quais resultam produtos de corrosão (hidróxido de ferro), cuja forma final depende principalmente da humidade e da disponibilidade de oxigénio ($\text{Fe}^{++} + 2\text{OH}^- \rightarrow \text{Fe}(\text{OH})_2$).

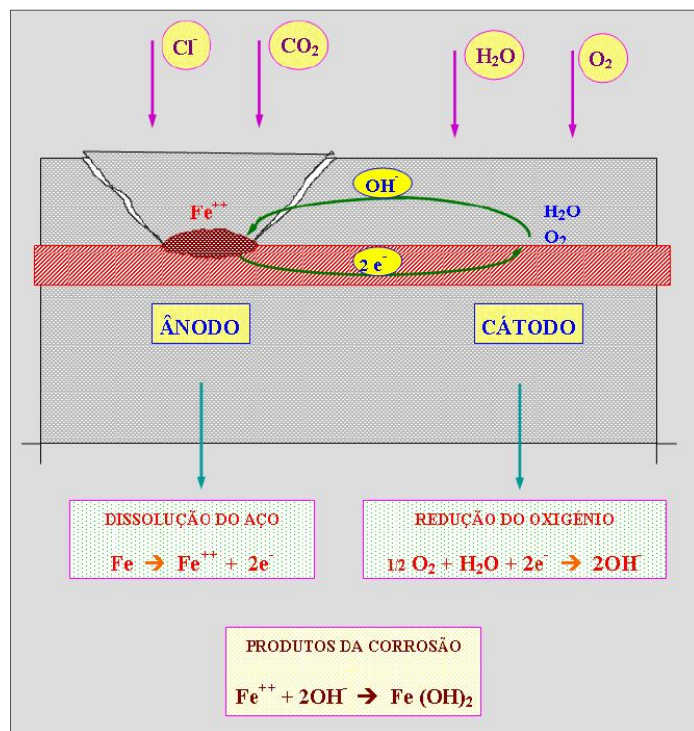


Figura 3: Mecanismo da corrosão: modelo de uma célula de corrosão (Costa, A. (2015)).

Os produtos (“ferrugem”) resultantes da corrosão das armaduras fazem aumentar de 2 a 8 vezes o volume dos varões de aço, depositam-se na interface armaduras/betão, preenchendo e exercendo pressões nos poros e microfissuras, podendo provocar a fendilhação e delaminação do betão (ver Figura 4).

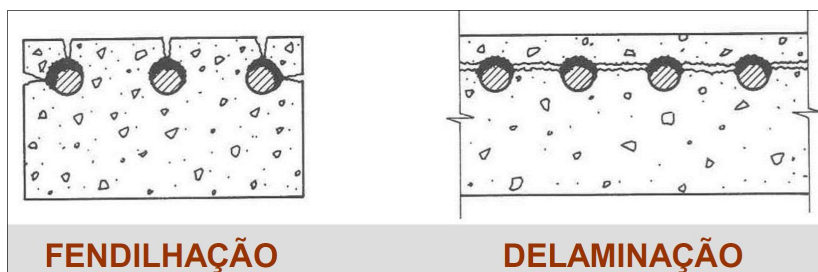


Figura 4: Fendilhação e delaminação da camada de betão de recobrimento, consequentes da corrosão das armaduras (Costa, A. (2015)).

4.2. DETERIORAÇÃO POR CORROSÃO

4.2.1. CARBONATAÇÃO

A carbonatação do betão é um dos principais mecanismos de deterioração que tem como consequência a corrosão das armaduras no betão armado.

O dióxido de carbono, CO_2 , proveniente do meio ambiente exterior, penetra no betão e vai reagir com os produtos alcalinos da pasta de cimento, provocando a redução do pH do betão, para valores em relação aos quais as armaduras deixam de estar passivas.

Na carbonatação do betão, a principal reação associada é a que envolve o hidróxido de cálcio, Ca(OH)_2 , sendo $\text{Ca(OH)}_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O}$, a qual neutraliza a solução presente nos poros do betão para valores de pH inferiores a 9.

No desenvolvimento do processo de carbonatação do betão, distinguem-se três zonas: a zona carbonatada, onde o Ca(OH)_2 foi convertido em carbonato de cálcio, CaCO_3 ; uma zona intermédia, onde ocorre a reação de carbonatação (frente de carbonatação); e a zona não carbonatada, onde o CO_2 ainda não penetrou.

Os fatores que mais condicionam a velocidade de carbonatação do betão são: a composição, a compactação e a cura do betão; e as condições de exposição. As referidas características do betão e da sua execução vão determinar a sua estrutura porosa. As condições de exposição em que se encontra o betão vão determinar o teor de humidade nas camadas superficiais.

Uma carbonatação excessiva do betão pode implicar a sua deterioração, dado que, para além dos produtos alcalinos, também os silicatos e aluminatos são carbonatados, originando a sua decomposição e tendo assim como consequência a perda da capacidade ligante da pasta de cimento.

A corrosão das armaduras devida à carbonatação do betão desenvolve-se geralmente com ânodos e cátodos muito pequenos e muito próximos entre si, constituindo micro-células de corrosão, ou seja, é um tipo de corrosão generalizada das armaduras.

Normalmente, a velocidade de desenvolvimento do processo de corrosão depende de dois fatores principais: a facilidade de acesso do oxigénio, O_2 , às armaduras, para alimentar a reação catódica; e a condutividade elétrica do betão, permitindo o movimento dos iões entre cátodos e ânodos. Da mesma forma que o betão permite a penetração do CO_2 , permite também a penetração do O_2 , pelo que a acessibilidade do oxigénio às armaduras não se revela um fator limitador da corrosão.

Assim sendo, a velocidade de corrosão é condicionada pela resistividade do betão, a qual limita o movimento de iões entre cátodos e ânodos. Por sua vez, os fatores que influenciam a resistividade do betão são o teor de humidade e a sua porosidade, visto ser através da água contida nos poros que ocorre o fluxo de iões no interior do betão.

Posto isto, verifica-se que a velocidade de corrosão das armaduras será condicionada, principalmente, pelas condições de exposição, dadas pela humidade relativa e/ou por ciclos de molhagem/secagem do betão, associadas à permeabilidade da camada de betão de recobrimento.

4.2.2. CONTAMINAÇÃO POR CLORETOS

Uma das maiores causas da deterioração das estruturas de betão armado é a contaminação do betão por cloretos, afetando um grande número de estruturas, principalmente as expostas ao ambiente marítimo ou à ação de sais de degelo. A introdução dos cloretos no betão pode ocorrer logo durante o processo de fabrico, como contaminante da mistura original, ou durante a vida da estrutura, por exposição a meio ambiente exterior agressivo. A penetração de cloretos provenientes do meio exterior verifica-se através da estrutura porosa do betão, ou seja, através da rede contínua de poros capilares da pasta de cimento, da rede de poros na interface pasta-agregados e das eventuais microfendas e fendas. Para que ocorra a penetração de cloretos é necessário que os poros do betão contenham água, sendo este um processo que se verifica apenas em meio líquido.

O teor de cloretos da solução existente nos poros do betão vai aumentando com o tempo e acaba por atingir um valor crítico, a partir do qual provoca a rutura localizada da película de óxido das armaduras, iniciando-se a corrosão.

Os fatores mais condicionantes na ocorrência e velocidade do processo de penetração dos cloretos no betão são: a estrutura porosa do betão; as propriedades de fixação dos cloretos pela pasta de cimento; o teor de humidade do betão; e o tipo de exposição ambiental da estrutura. Por sua vez, a estrutura porosa do betão é determinada pela sua composição, compactação e cura; as propriedades de fixação dos cloretos são dadas pela composição do cimento e presença de adições; e o teor de humidade e o tipo de exposição aos cloretos são definidos pelas condições micro e macro ambientais a que o betão está exposto.

O risco de corrosão do aço no betão armado está associado à concentração total de cloretos no betão, sendo considerados, na prática, os seguintes teores máximos de cloretos que o betão pode conter no seu fabrico (classe de teor de cloretos), de acordo com a NP EN 206-1: para estruturas em zonas de exposição favoráveis a contaminação por cloretos, provenientes ou não da água do mar: 0.2% de teor de cloretos na massa de cimento, ou 0.1%, no caso de betão com armaduras pré-esforçadas; para as restantes zonas de exposição: 0.4% de teor de cloretos na massa de cimento, ou 0.2%, no caso de betão com armaduras pré-esforçadas.

O teor crítico de cloretos numa estrutura existente, necessário para destruir a película passiva das armaduras e ativar o mecanismo da corrosão, depende de muitos fatores (ver Figura 5), sendo objeto de investigação desde há muitos anos e sendo difícil definir valores precisos. É frequentemente admitido e usado como referência o valor crítico de 0.4% de cloretos na massa de cimento.

Na maior parte dos casos, não sendo possível apurar a dosagem de cimento presente na composição do betão da estrutura existente, admite-se uma dosagem média correntemente utilizada de cerca de 300 kg/m³ de cimento no betão. Assim sendo, a percentagem máxima de teor de cloretos indicada converte-se em 0.05% de Cl⁻ na massa de betão.

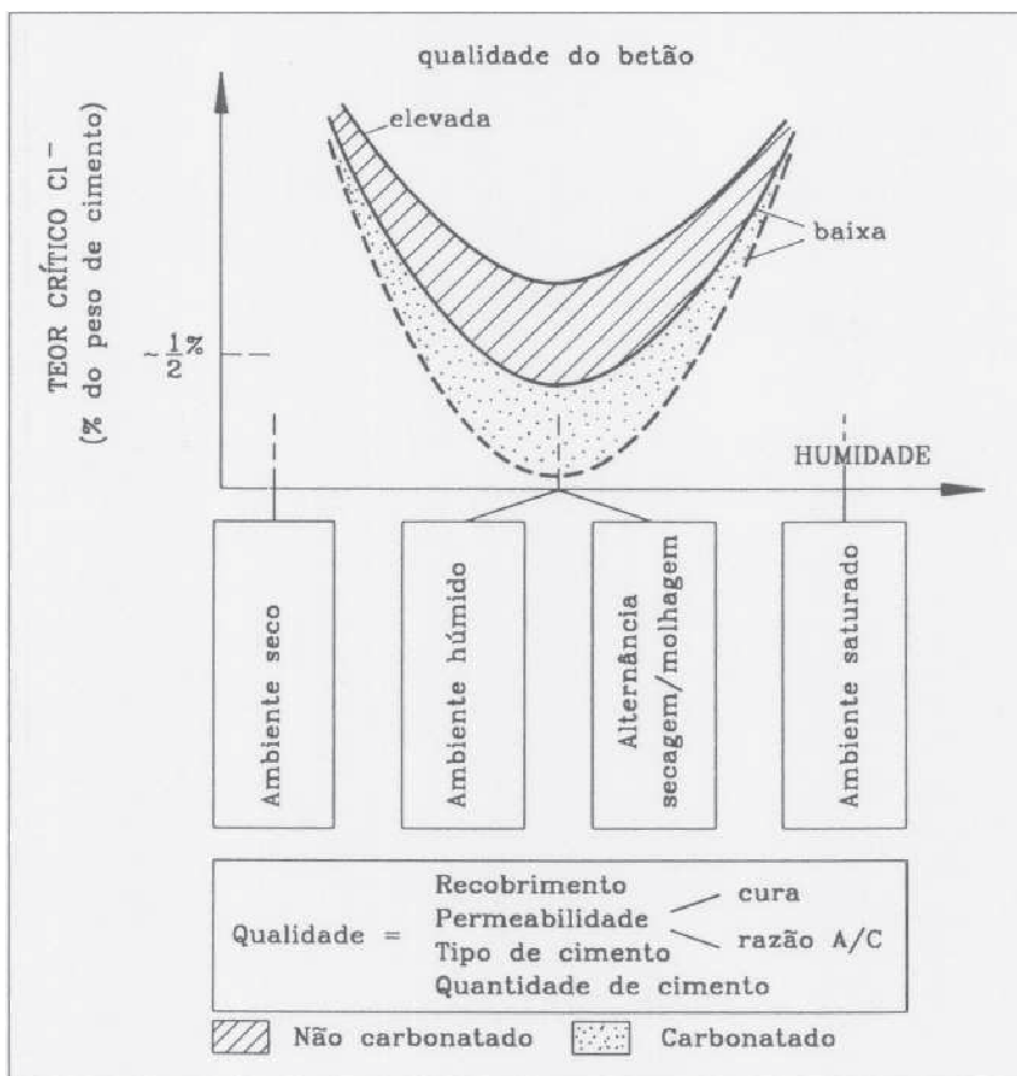
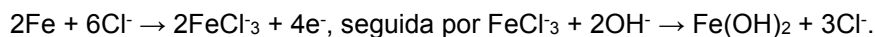


Figura 5: Efeito das condições de exposição e da qualidade do betão no teor crítico de cloretos (Costa, A. (1997)).

O tipo de corrosão resultante da ação de cloretos caracteriza-se pela ocorrência de corrosão localizada das armaduras e corrosão por picadas, com zonas anódicas pequenas, onde foi atingido o teor crítico de cloretos, e grandes zonas catódicas, formando macro células de corrosão.

Quando o teor de cloretos é muito elevado, pode ocorrer a destruição total da película passiva e a corrosão generalizada das armaduras.

A corrosão por ação de cloretos processa-se geralmente a uma velocidade elevada, tratando-se assim de uma situação muito gravosa, com consequentes perdas bastante acentuadas na secção das armaduras. A velocidade de corrosão é aumentada pela ação catalizadora dos cloretos nas zonas anódicas. O mecanismo de corrosão traduz-se, neste caso, pelas seguintes reações:



4.3. DETERIORAÇÃO DEVIDA A REAÇÕES EXPANSIVAS INTERNAS

4.3.1. AÇÃO DOS SULFATOS

O ataque dos sulfatos caracteriza-se pela reação entre os iões sulfato e os aluminatos do betão, formando um composto expansivo, o qual provoca fendilhação e desagregação, facilitando o acesso à penetração de novos agentes agressivos e acelerando o processo de deterioração do betão armado. É necessária a presença de água para que esta reação ocorra. Os sulfatos, quando presentes em solução, reagem com a pasta de cimento hidratada do betão, originando as designadas reações expansivas.

Dependendo da concentração e tipo de sulfatos e da composição da pasta de cimento, a degradação do betão originada pelo ataque dos sulfatos pode manifestar-se por duas formas diferentes: através da expansão do betão ou através da perda progressiva da resistência. A expansão do betão é devida à formação de etringite ou sal de Candlot, ou seja, trissulfoaluminato de cálcio hidratado, produto da reação dos sulfatos com os aluminatos de cálcio hidratados, a qual implica um grande aumento de volume. Associada a esta expansão ocorre a fendilhação do betão, que conduz a um aumento da permeabilidade e facilita a penetração de substâncias agressivas no betão, favorecendo a corrosão das armaduras e a degradação do betão armado (ver Figura 6).

A perda progressiva de resistência é devida à decomposição dos produtos hidratados da pasta de cimento, que origina a diminuição da sua capacidade ligante e tem como consequência a degradação do betão.

Os principais fatores que influenciam, em termos práticos, o ataque dos sulfatos são: as condições de exposição, ou seja, a quantidade de sulfatos no meio ambiente, a quantidade de água disponível e os mecanismos de penetração no betão; a permeabilidade do betão, sendo a dimensão e continuidade da estrutura porosa que irá condicionar a velocidade de penetração dos sulfatos; e a suscetibilidade do betão a este ataque dos sulfatos, ou seja, a composição química do cimento que irá determinar a quantidade de substâncias reativas.

De acordo com a Norma NP 2064, a percentagem máxima de sulfatos (SO_3) a utilizar na massa de cimento no fabrico do betão é de 3.5%. Em "Fabrico e propriedades do betão - Vol. I" (1988), A. de Sousa Coutinho refere que os cimentos nacionais começam a ser sensíveis à formação de sulfoaluminato de cálcio expansivo, quando o teor de sulfatos no betão excede os 6% da massa de cimento.

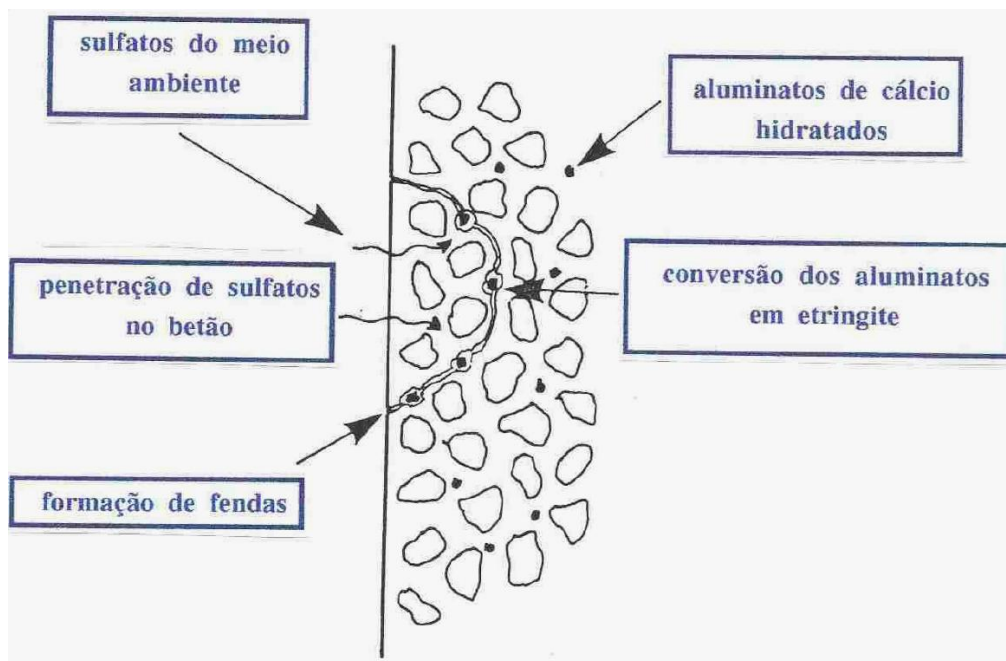


Figura 6: Mecanismo do ataque de sulfatos provenientes do exterior (adaptada de CEB – Bulletin 183).

Os sulfatos, provenientes de fonte exterior, iniciam o processo de contaminação reagindo com a zona superficial do betão. Depois, em função da porosidade do betão e do mecanismo de transporte associado, os sulfatos penetrarão até certa profundidade, reagindo aí com os componentes da pasta de cimento.

Este fenómeno resulta no desenvolvimento de um processo de deterioração do betão, pelo seu enfraquecimento progressivo e pela desintegração das camadas superficiais do betão.

No que respeita à reação sulfática de origem interna (RSI), a deterioração do betão é causada pela formação de etringite retardada, tendo como origem a remobilização dos sulfatos inicialmente contidos na pasta de cimento, após o endurecimento do betão. Este fenómeno tem como principal causa o aumento da temperatura aquando do endurecimento do betão. Este tipo de deterioração tem vindo a manifestar-se de forma crescente nos últimos anos, nomeadamente ao nível das pontes.

4.3.2. AÇÃO DOS ÁLCALIS

A deterioração do betão por ação dos álcalis manifesta-se de forma idêntica à dos sulfatos, originando fendilhação devida a reações expansivas de origem interna. Este fenómeno é, na generalidade, causado pelas reações entre os álcalis contidos no cimento e a sílica dos agregados no betão (RAS).

A reação álcalis-sílica ocorre apenas na presença de água e baseia-se no ataque dos minerais de sílica reativa pelos hidróxidos alcalinos existentes na solução dos poros do betão originados pelo

sódio e potássio (Na_2O e K_2O) contidos no cimento. Destas reações resulta um gel de silicato alcalino, sendo um gel expansivo, capaz de absorver uma grande quantidade de água.

Assim, frequentemente este mecanismo conduz à fendilhação e consequente degradação do betão, uma vez que a hidratação do referido gel resulta num grande aumento de volume, originando elevadas pressões internas no betão (ver Figura 7).

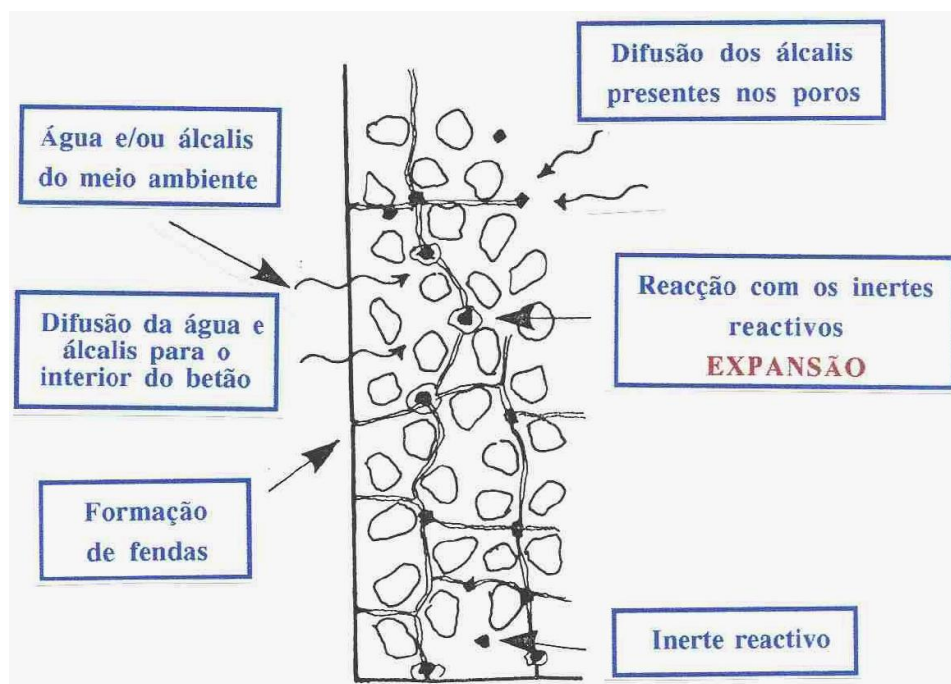


Figura 7: Mecanismo do ataque dos álcalis (adaptada de CEB – Bulletin 183).

A velocidade de desenvolvimento deste mecanismo de degradação do betão depende dos seguintes fatores principais: a porosidade e tamanho das partículas de sílica dos agregados reativos; a concentração de álcalis na solução dos poros do betão; a permeabilidade do betão; o tipo de cimento; e as condições de exposição.

O teor de álcalis no cimento na preparação do betão deverá ser limitado a 0.6%, de acordo com a Especificação E461 – LNEC. Considerou-se também, conforme Silva, A. (2005), o limite de 3 kg/m^3 de Na_2O (sódio) equivalente de álcalis solúveis no betão ($\%(\text{Na}_2\text{O}) + 0.658 \times \%(\text{K}_2\text{O})$).

No geral, trata-se de uma reação muito lenta, sendo característico causar uma fendilhação irregular superficial e visível no betão, manifestando-se normalmente em estruturas já construídas há muitos anos. Tal como no caso da RSI, este tipo de deterioração tem vindo a manifestar-se de forma crescente nas estruturas de betão.

4.4. DETERIORAÇÃO POR AÇÃO DA ÁGUA DO MAR

A ação da água do mar no betão é um fenómeno complexo, resultando da interação entre vários componentes da pasta de cimento e um grande número de iões e sais presentes na água, conduzindo a reações químicas (ver Figura 8), que têm como consequência a deterioração do betão.

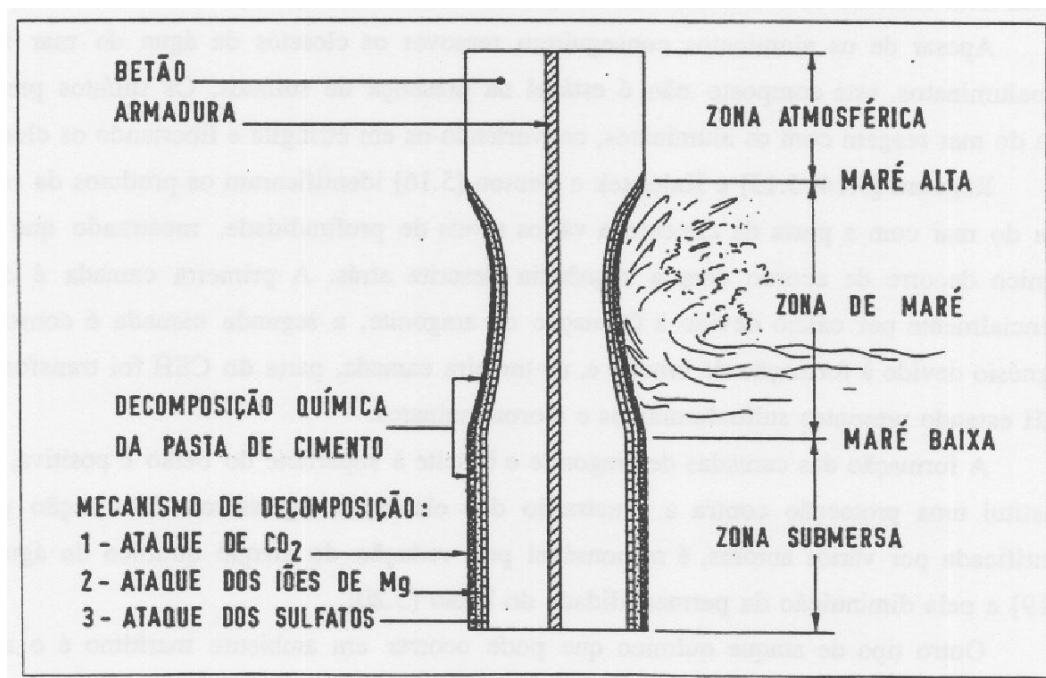


Figura 8: Mecanismo do ataque químico pela água do mar (Costa, A. (1999)).

O componente da pasta de cimento que é mais facilmente atacado pelos agentes agressivos presentes na água do mar, principalmente pelo dióxido de carbono, cloreto de sódio e sulfato de magnésio, é o hidróxido de cálcio.

Alguns produtos destas reações são solúveis na água do mar e originam a remoção do hidróxido de cálcio da pasta de cimento. Assim, ocorre a lixiviação do hidróxido de cálcio, o que enfraquece a pasta de cimento e aumenta a sua permeabilidade, facilitando por sua vez a penetração de outros componentes agressivos.

O principal mecanismo de deterioração do betão por ação da água do mar manifesta-se pelo enfraquecimento, perda de material e erosão do betão. Verifica-se que o fator mais condicionante na ocorrência e no desenvolvimento deste mecanismo de deterioração é a permeabilidade do betão.

4.5. OUTRAS ANOMALIAS

Através da inspeção visual das estruturas é possível detetar as principais anomalias relevantes:

- Fendilhação e delaminação do betão: associadas aos mecanismos de deterioração já referidos, nomeadamente à corrosão das armaduras, devida a carbonatação do betão ou a

contaminação por cloretos, ao fenómeno das reações expansivas internas, com presença de sulfatos e álcalis, e à degradação do betão por ação da água do mar;

- Fendilhação do betão: devida a retração do betão ou a fenómenos localizados de mau funcionamento estrutural (esforços de tração elevados);

- Presença de água e/ou humidade no betão: associada a problemas de exposição ambiental, de elevada permeabilidade do betão, de infiltrações/acumulações localizadas de água anormais na estrutura, etc, potenciando a degradação e os mecanismos típicos de deterioração do betão já referidos;

- Escorrências com presença de sais ou outras: consequentes de reações devidas a infiltrações de águas no betão ou devidas a eventual presença de agentes químicos agressivos específicos nas estruturas (sais, ácidos, águas puras, etc);

- Enfraquecimento e degradação do betão: em consequência da ação da água do mar ou de agentes químicos agressivos como sais de magnésio e amónio, ácidos, águas puras, etc, que promovem a dissolução do cimento.

4.6. REPARAÇÃO/REABILITAÇÃO DAS ESTRUTURAS DE BETÃO

A Norma NP EN 1504 define 37 métodos de reparação, relacionados com 11 princípios aplicáveis para a reabilitação, associados aos mecanismos de deterioração e às anomalias que ocorrem nas estruturas de betão.

As principais soluções correntemente adotadas, para a reabilitação de estruturas em betão armado, incluem técnicas como: a reparação localizada; a substituição parcial ou total do betão de recobrimento; a introdução de inibidores de corrosão; a aplicação de revestimentos e tratamentos na superfície do betão; a proteção catódica; a realcalinização; e a dessalinização ou extração eletroquímica de cloretos.

5. MÉTODOS DE INSPECÇÃO ESTRUTURAL E ENSAIOS PARA DIAGNÓSTICO

As campanhas de ensaios e inspeção estrutural e a inspeção visual fazem parte das ações implementadas para avaliação do estado de uma estrutura. A estas ações estão também associadas outras com o mesmo objetivo: a recolha de informação acerca do projeto original da estrutura em estudo e acerca da sua construção e posterior manutenção; a avaliação da deterioração; e a avaliação de segurança estrutural.

Os principais objetivos são: a definição do tipo e das causas da deterioração; a definição do nível da deterioração; a previsão da evolução da deterioração; e a avaliação do nível de segurança da estrutura de betão.

Os resultados obtidos e a sua análise permitirão definir o tipo e a metodologia de intervenção de reabilitação a realizar na estrutura, em função do tipo e nível de deterioração, da sua utilização e dos custos envolvidos.

5.1. CARACTERIZAÇÃO DO BETÃO

5.1.1. ENSAIO DE COMPRESSÃO

Com recurso a uma caroteadora, são extraídas carotes de betão da estrutura, de acordo com um criterioso plano de inspeção previamente realizado (ver Figura 9).



Figura 9: Exemplo de execução de carotagem.

As carotagens são executadas de forma a interferir o mínimo com as armaduras existentes, procedendo-se, para tal, à deteção dos varões no betão armado, recorrendo a um pacómetro. A

Norma NP EN 12504-1:2003 fornece indicações relativas à extração de carotes. Os ensaios de compressão uniaxial são posteriormente realizados nas carotes de betão extraídas, por um laboratório de materiais devidamente habilitado, de acordo com a Norma NP EN 12390-3.

A resistência atual e a resistência potencial do betão podem ser determinadas de acordo com o estipulado no documento "CSTR n.º 11 - Concrete Society Technical Report n.º 11", intitulado "Concrete Core Testing for Strength", tendo em consideração vários fatores, como a presença de varões de aço na carote ensaiada, a direção da extração da carote relativamente à direção de aplicação durante a betonagem e a relação altura/diâmetro do provete.

Conforme definido no documento de referência "CSTR n.º 11", a resistência potencial é uma estimativa da resistência do betão, com base na resistência obtida na carote, a qual seria obtida num cubo colhido, fabricado, conservado e ensaiado em condições normalizadas aos 28 dias. A estimativa do valor característico da tensão de rotura à compressão do betão de cada lote é efetuada de acordo com a Norma NP EN 13791: 2008, através do cálculo da resistência potencial.

5.1.2. ENSAIO ESCLEROMÉTRICO

O ensaio esclerométrico, utilizando o esclerómetro de Schmidt, tem como objetivo avaliar a dureza superficial do betão. A sua principal finalidade é estabelecer uma correlação da referida dureza superficial do betão com a resistência à compressão uniaxial obtida em ensaios laboratoriais nas mesmas zonas de ensaio. O ensaio baseia-se nas Normas BS 1881: Part 202: 1986 e, a mais atualizada, EN 12504-2: 2001 (ver Figura 10).



Figura 10: Ensaio esclerométrico.

Durante cada ensaio é projetada uma peça metálica contra uma superfície de betão, através de uma mola, sendo medido o seu ressalto na escala do martelo/esclerómetro, correspondendo uma leitura a cada impacto.

Os ensaios são realizados sobre uma superfície lisa, sem particular concentração de agregados, com o mínimo de carbonatação, e com o esclerómetro posicionado perpendicularmente à superfície a ensaiar. Para análise de cada zona são feitas 12 leituras definidas pela intersecção de linhas ortogonais cujo afastamento oscile entre 20 e 50 mm. Estas linhas formam uma grelha regular. A média destas doze leituras corresponde ao resultado do ensaio (índice esclerométrico – R). É possível determinar depois a resistência superficial do betão (W_m) recorrendo às correlações com o índice esclerométrico (R) medido, que dependem da posição horizontal ou vertical do ensaio. Os gráficos que permitem estabelecer estas correlações encontram-se normalmente no manual do equipamento e também fixados no corpo do esclerómetro.

5.1.3. RESISTIVIDADE ELÉTRICA

A determinação da resistividade elétrica do betão permite estimar o índice de corrosão possível para as armaduras. Depende essencialmente da maior ou menor comunicação entre os poros do betão e da sua humidade relativa. A velocidade de corrosão depende da resistividade do betão e do acesso de oxigénio às armaduras.

O ensaio é realizado em laboratório habilitado, a partir de amostras de betão obtidas de carotes extraídas da estrutura, e consiste em medir a resistência à passagem de corrente elétrica através do provete. Os provetes ensaiados em laboratório são saturados, determinando-se desta forma a resistividade mínima, correspondente ao máximo índice de corrosão possível para o betão em causa.

A resistividade efetiva do betão “in situ” dependerá do valor da humidade relativa do betão, que varia de zona para zona e com a variação da humidade e temperatura ambiente e será sempre superior ao valor determinado em laboratório.

A interpretação dos resultados pode ser feita de acordo com os seguintes critérios, como disposto no CEB - Bulletin 243:

- Resistividade ($k\Omega cm$) > 20 a 100 → Baixo Índice de Corrosão Possível;
- Resistividade ($k\Omega cm$) < 5 a 10 → Muito Alto Índice de Corrosão Possível.

5.1.4. PERMEABILIDADE DO BETÃO

Os ensaios de determinação do coeficiente de permeabilidade do betão à água são realizados em laboratório habilitado, de acordo com o método descrito no volume III do livro “Fabrico e Propriedades do Betão” de A. Sousa Coutinho e Arlindo Gonçalves, parágrafo 12.5.1., a partir de amostras de betão obtidas de carotes extraídas da estrutura.

A interpretação dos resultados pode ser efetuada de acordo com o seguinte critério, como disposto no CEB – Bulletin 192:

- Coef. de Permeabilidade k_w (ms^{-1}) $< 10^{-12}$ → Boa Qualidade do Betão;
- Coef. de Permeabilidade k_w (ms^{-1}) 10^{-12} a 10^{-10} → Média Qualidade do Betão;
- Coef. de Permeabilidade k_w (ms^{-1}) $> 10^{-10}$ → Fraca Qualidade do Betão.

5.1.5. POROSIDADE DO BETÃO

A porosidade do betão define-se como a relação entre o volume de vazios e o volume total do material. Esta porosidade é a soma da porosidade fechada, constituída pelos vazios que não comunicam entre si, com a porosidade aberta, constituída por vazios que comunicam entre si por poros capilares.

Do ponto de vista da durabilidade, é a porosidade aberta que interessa considerar, sendo uma medida do volume de canais que comunicam com o exterior do betão e que permitem o acesso das substâncias agressivas.

A porosidade acessível à água fornece informação sobre o volume total de poros abertos e é medida através da quantidade total de água que penetra para o interior do betão, calculada e traduzida em percentagem. O ensaio de porosidade pressupõe a fase de saturação e de secagem dos provetes, com ciclos de molhagem e de secagem, até se atingir um patamar de massa constante, que se considera ser correspondente a uma variação de massa $< 0.2\%$ num período de 24 horas.

Os ensaios de porosidade, indicados neste documento, das carotes extraídas de betão, foram realizados em Laboratório habilitado, segundo a Norma ASTM C642: 2006 – “Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete”.

5.1.6. ENSAIO DE MICROSCOPIA

A análise da microestrutura do betão é efetuada por microscopia eletrónica de varrimento (MEV), complementada com a microanálise de raios X por dispersão em energias (MEV/EDS), associada aos espectros de composição elementar. Os provetes ensaiados são constituídos por pequenos fragmentos retirados das amostras de betão, obtidas das carotes extraídas da estrutura. Estes ensaios micrográficos são realizados por laboratório habilitado.

As observações da microestrutura do betão em estudo permitem detetar sinais da presença de produtos indiciadores de degradação.

5.2. ENSAIO DE TRAÇÃO DO AÇO EM ARMADURAS

Para a caracterização das armaduras são recolhidas amostras de varões de aço para observação e ensaios de tração. Estes ensaios são realizados por laboratório habilitado, de acordo com a Norma NP EN 10002-1:2006.

Os valores dos resultados obtidos e o respetivo diagrama de tensões/deformações são depois apresentados. Estes permitem analisar e identificar as características resistentes e de desempenho do tipo de aço em causa, o seu módulo de elasticidade, a extensão na rotura, etc.

5.3. DETEÇÃO DE ARMADURAS E RECOBRIMENTO

A detecção e identificação das armaduras são realizadas preferencialmente por métodos não destrutivos, nomeadamente através do uso de um detetor de armaduras, pacómetro, o qual utiliza o princípio da indução magnética (ver Figuras 11a e 11b).



Figuras 11a e 11b: Pacómetro para detecção de armaduras: equipamento e exemplo de utilização.

O método baseia-se no seguinte: o detetor gera um campo eletromagnético e a perturbação produzida neste campo pela presença de cada varão de aço das armaduras no betão armado é registada e indicada pelo equipamento, detetando assim a sua localização e dimensões. Estes ensaios permitem determinar espaçamentos e recobrimentos das armaduras da zona em estudo.

Também como método de ensaio e prospeção estrutural, como alternativa ou complemento, são executadas sondagens de reconhecimento estrutural, através da abertura de “janelas” de inspeção, de dimensão mínima, por picagem da camada superficial do betão e recobrimento, permitindo visualizar as armaduras e a sua posição no betão.

5.4. DETERIORAÇÃO POR CORROSÃO

5.4.1. MEDIÇÃO DA PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO

A medição da profundidade de carbonatação permite avaliar o risco de corrosão das armaduras, por desp passivação devida ao abaixamento do pH do betão, associado à evolução da frente de carbonatação, a partir da superfície dos elementos em contacto com o ar.

Para a determinação da profundidade de carbonatação, aplica-se uma solução alcoólica de fenolftaleína (com 1% de concentração), sobre uma superfície recém-exposta de betão e limpa, logo após a execução do furo, tendo como referência normativa a Especificação E391-LNEC. Para a execução de cada ensaio será necessário realizar uma furação na peça mediante dois processos possíveis: berbequim com percussão equipado com broca de 20 mm ou superior; caroteadora

equipada com coroa diamantada. Caso o furo seja executado com o berbequim, este é bem limpo e só depois se deve aplicar a fenolftaleína na parede do furo, abrangendo a zona adjacente à face exterior da peça e em profundidade para o interior deste. Caso o furo seja executado com carotadora, termina-se o furo até à profundidade desejada, remove-se a carote, limpam-se as faces com um pano húmido, deixa-se secar e depois pulveriza-se com fenolftaleína uma superfície que cubra a face lateral a partir da face exterior da carote. Deve-se aguardar aproximadamente 30 segundos para dar tempo de se produzir a reação e depois observar se existe alteração de cor.

A zona carbonatada apresenta-se incolor e a não carbonatada apresenta uma coloração violeta, sendo a profundidade de carbonatação medida na transição de uma zona para a outra, utilizando uma régua graduada em mm (ver Figuras 12a e 12b). A profundidade de carbonatação é, portanto, determinada pela distância da linha que separa a zona onde se deu reação (violeta) da zona onde não houve reação (incolor) até à superfície exterior da peça, medida na perpendicular à mesma. A fenolftaleína é um indicador ácido-base com intervalo de viragem entre pH de 8.2 a 9.8, variando a sua tonalidade de incolor (ácido) a violeta (base).

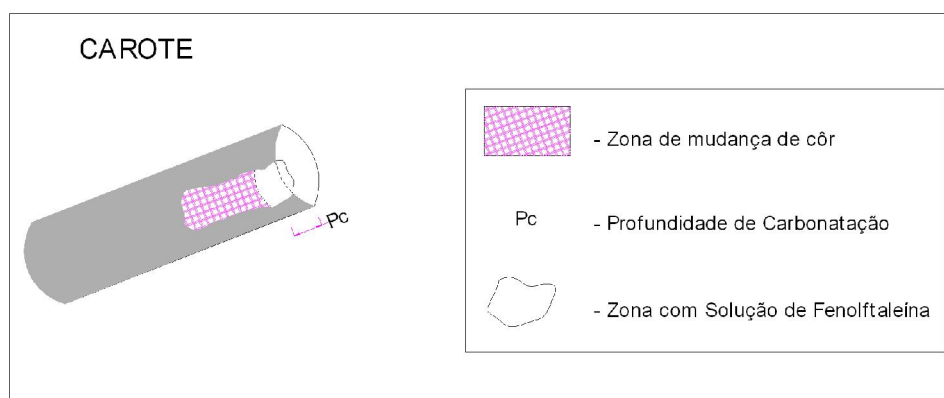


Figura 12a: Esquema de aplicação de fenolftaleína.



Figura 12b: Carotes de betão após aplicação de fenolftaleína.

5.4.2. TEOR DE CLORETOS

Os resultados obtidos neste ensaio permitem avaliar o risco de corrosão das armaduras, originado quer pela penetração de cloretos do meio exterior, quer pela eventual contaminação inicial do betão por este agente agressivo.

A determinação do teor de cloretos é realizada a partir de amostras extraídas do elemento estrutural interessado, a vários níveis de profundidade, através de furos executados com berbequim no betão e recolha do pó “in situ”. Primeiramente é necessário proceder à verificação e localização das zonas nos elementos onde é permitido efetuar a recolha de pó de betão sem intersectar qualquer armadura, recorrendo a pacómetro.

Quanto à recolha do pó de betão, existem duas formas para a recolha das amostras: efetuada “in situ”, recolhendo o pó de betão diretamente no elemento; ou realizada em laboratório, extraindo uma carote do elemento, com caroteadora, e procedendo posteriormente à recolha das amostras. A recolha deverá ser efetuada por intermédio de perfuração com berbequim e broca, às profundidades definidas no Plano de Inspeção, de modo a reunir a quantidade necessária à realização do ensaio (10 a 20 g). A perfuração deve ser efetuada em profundidade, sem recolher pó das faces laterais. O pó a retirar deverá ser o mais fino possível e apresentar-se seco.

Após a recolha, cada amostra deverá ser guardada e fechada em saquetas, devidamente identificadas, para posterior ensaio. Cada amostra de pó do betão é depois dissolvida numa solução ácida normalizada, que permite extrair os iões cloretos da amostra para a solução (ver Figura 13).



Figura 13: Conjunto de elementos para realização do Teste Rápido de Cloretos no betão.

Com o auxílio de um elétrodo específico de cloretos, mede-se o potencial da amostra, o qual é comparado com os potenciais de soluções de referência, cujo teor em cloretos é conhecido. Esta comparação permite determinar o teor de cloretos na amostra de betão dissolvida na solução ácida.

Estes valores permitem a elaboração de perfis de concentração, a partir dos quais é possível avaliar os riscos envolvidos para as armaduras.

5.5. DETERIORAÇÃO DEVIDA A REAÇÕES EXPANSIVAS INTERNA

5.5.1. SULFATOS

A determinação do teor de sulfatos no betão é realizada por laboratório habilitado, de acordo com a Norma BS 1881:124-1988, a partir de amostras obtidas das carotes extraídas do elemento estrutural interessado, permitindo apreciar o risco de ocorrência de reações sulfáticas internas.

5.5.2. ÁLCALIS

O teor de álcalis (óxidos de sódio, Na_2O , e de potássio, K_2O) no betão, em conjunto com a presença de sílicas reativas nos agregados e de humidade, permite avaliar o risco de ocorrência de reações expansivas do tipo álcalis-sílica, que causam fendilhação e desagregação do betão.

Os ensaios são realizados por laboratório habilitado, de acordo com a Norma BS 1881:124-1988, a partir de amostras obtidas das carotes extraídas da estrutura, sendo os resultados obtidos considerados em relação à massa de betão. Os valores da percentagem de Na_2O equivalente no betão, obtidos nos ensaios, são dados por: $\% (\text{Na}_2\text{O}) + 0.658 \times \% (\text{K}_2\text{O})$.

5.6. MEDIÇÃO DOS POTENCIAIS ELÉTRICOS

Como indicador da probabilidade de ocorrência de corrosão, é medido o potencial elétrico em diversos pontos de malhas pré-definidas em elementos de betão armado.

Para tal é utilizado um aparelho de eletrodo de sulfato de cobre, segundo a Norma ASTM C876-86.

A realização do ensaio consiste, sucintamente, no seguinte procedimento: verificação de que as superfícies a ensaiar se encontram limpas, de forma a não haver interferências no circuito elétrico que se irá gerar; ligação do cabo de terra a um varão da peça em análise, através de um grampo ou crocodilo (caso não esteja descoberto nenhum varão que se garanta pertencer à malha de armaduras da peça, determinar com o pacómetro e expor o troço de varão, o qual deverá ser limpo por escovagem, garantindo a boa ligação do equipamento); escolha da malha de pontos de ensaios, garantindo que todos os pontos a ensaiar se encontram sobre varões da malha de armaduras, efetuando, para tal, o levantamento das armaduras com pacómetro (à medida que o ensaio avança pode-se encurtar a malha, caso se verifiquem diferenças de potencial superiores a 150 mV entre leituras vizinhas); medição de dados, em que o aparelho funciona como um voltímetro digital, registando os valores em mV de cada leitura na sua memória (ver Figura 14); o operador dispõe de um ecrã onde observa na malha o ponto em análise e o valor medido pelo voltímetro; para que o valor atribuído a uma leitura seja considerado válido, terá que se garantir que o valor lido no voltímetro esteja estável ($\pm 0,02$ V).

A interpretação dos resultados é feita de acordo com as seguintes considerações, como disposto no CEB - Bulletin 243:

- Potencial Elétrico (mV) > -200 mV \rightarrow Risco de Corrosão Ativa $< 10\%$;
- Potencial Elétrico (mV) > -350 a -200 mV \rightarrow Risco de Corrosão Ativa $\approx 50\%$;
- Potencial Elétrico (mV) < -350 mV \rightarrow Risco de Corrosão Ativa $> 90\%$.

Em peças húmidas ou sujeitas à subida do nível das águas, só deverão ser feitas comparações entre leituras que se encontrem no mesmo plano de nível devido ao facto da humidade existente na peça influir na condutividade elétrica.

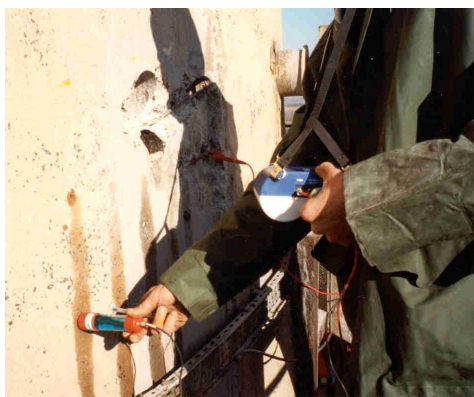


Figura 14: Exemplo da realização de medições de potenciais elétricos.

5.7. MEDIÇÃO DE POTENCIAIS ELÉTRICOS, RESISTIVIDADE E VELOCIDADE DE CORROSÃO

O equipamento permite efetuar ensaios eletroquímicos em estruturas de betão armado (ver Figuras 15a, 15b, 16a e 16b). Estes ensaios e medições permitem elaborar mapas de potencial e de resistividade, e efetuar ensaios de velocidade de corrosão em pontos de maior risco de corrosão, tendo em conta o potencial e a resistividade lidos nos respetivos mapas.

A interpretação dos resultados é feita de acordo com as seguintes considerações, como disposto no CEB - Bulletin 243:

- Velocidade de Corrosão ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$): $I_{\text{corr}} < 0.1$ a $0.2 \mu\text{A}/\text{cm}^2 \rightarrow$ Nível de Corrosão Ativa: Negligenciável;
- Velocidade de Corrosão ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$): $0.1 < I_{\text{corr}} < 0.5 \mu\text{A}/\text{cm}^2 \rightarrow$ Nível de Corrosão Ativa: Baixo a Moderado;
- Velocidade de Corrosão ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$): $0.5 < I_{\text{corr}} < 1.0 \mu\text{A}/\text{cm}^2 \rightarrow$ Nível de Corrosão Ativa: Moderado a Elevado;
- Velocidade de Corrosão ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$): $I_{\text{corr}} > 1.0 \mu\text{A}/\text{cm}^2 \rightarrow$ Nível de Corrosão Ativa: Elevado.



Figuras 15a e 15b: Equipamento de ensaios eletroquímicos e exemplo de utilização.



Figuras 16a e 16b: Equipamento de ensaios eletroquímicos e exemplos de utilização.

5.8. CAROTES PARA AVALIAÇÃO DE FENDAS

Com o objetivo de observar e avaliar as fendas existentes em determinados elementos estruturais de betão, pode optar-se pela extração de carotes de betão que as atravessem (ver Figura 17).



Figura 17: Exemplo de carote extraída para avaliação de fenda.

As carotes extraídas têm correntemente cerca de 50 mm de diâmetro e são centradas na fenda, permitindo avaliar a sua atitude em profundidade, registando-se a variação da abertura da fenda ao longo da profundidade da espessura do elemento de betão.

5.9. INSPEÇÃO VISUAL

A inspeção visual permite observar e detetar outras anomalias ou indícios de mecanismos de deterioração e complementar também a informação obtida através dos métodos e ensaios de inspeção estrutural referidos anteriormente.

É um trabalho que resulta no mapeamento das anomalias observadas, através do registo da informação sobre peças desenhadas representativas da estrutura em estudo, complementado também com levantamento fotográfico.

6. ESTRUTURA E FUNCIONAMENTO DA BASE DE DADOS

Nesta dissertação foi definida e criada uma estrutura genérica original de base de dados, em conformidade com o tipo de obras e inspeções estruturais estudadas pela autora ao longo dos anos.

A estrutura da Base de Dados de Durabilidade e Anomalias de Estruturas de Betão foi concebida em Excel, com os seguintes objetivos:

- Permitir a qualquer utilizador maior facilidade de utilização e/ou consulta;
- Não vincular o trabalho a qualquer programa específico de gestão de bases de dados, evitando incompatibilidades informáticas futuras e favorecendo a versatilidade de utilização, de desenvolvimentos futuros e de transferências de dados para outras bases de dados geridas por outras entidades;
- Permitir obter uma tabela base simples e planificada de compilação de dados, cuja informação possa ser recolhida e transposta para criação ou carregamento de qualquer outra base de dados suportada por software específico.

Cada Estrutura é introduzida na Base de Dados apenas com referências genéricas de enquadramento e de descrição e dados técnicos, mantendo-se sempre o seu anonimato e o do respetivo cliente da obra ou intervenção e do estudo realizados.

As Estruturas são numeradas, nas colunas da tabela, sequencialmente por ordem de introdução na BD (“Estrutura 1”, “Estrutura 2”, etc).

Os diversos campos de introdução de dados são identificados na coluna de “Input”, também com identificação numérica sequencial, por ordem de aparição nas linhas da tabela (“ID” – 1, 2, etc, e “Dados” – título do campo de dados).

O conteúdo introduzido em cada campo, com a informação relativa aos dados indicados, pretende-se sucinto e com indicação dos valores ou parâmetros de referência mais representativos para cada Estrutura.

Os resultados de ensaios a introduzir nesta BD são os referentes principalmente ao betão e betão armado, não sendo registados indicadores de ensaios e observações realizados a outras partes da estrutura (elementos de estrutura metálica, estruturas de madeira, etc) ou para avaliação de questões complementares, como, por exemplo, ensaios de arrancamento (“pull-off”) para avaliar aderência ou outros.

Sempre que possível ou aplicável, sob o título de cada campo, é referido o Documento Normativo segundo o qual se regeu a execução do respetivo ensaio.

6.1. IDENTIFICAÇÃO E DESCRIÇÃO DA ESTRUTURA E SEU ENQUADRAMENTO

Os campos de introdução de dados referentes à identificação e descrição da estrutura e seu enquadramento são os identificados por "ID" nº 1 a 8:

- ID 1 – Tipo e Designação da Estrutura: para identificação do tipo de estrutura e sua função (ex. Edifício, Ponte, Reservatório, etc);
- ID 2 – Localização: para localizar a estrutura geograficamente, apenas com referências à localidade ou região e ao país;
- ID 3 – Breve Descrição Estrutural e Dimensional: para descrever a estrutura na sua constituição estrutural e, sempre que possível, também com indicação prévia de dimensões;
- ID 4 – Enquadramento e Exposição Ambiental: com indicação da classe de exposição ambiental em que se enquadra a estrutura, de acordo com o preconizado na Especificação E464 – LNEC, na NP EN 206 e no EC2;
- ID 5 – Data de Construção: com indicação, quando conhecidos, do mês e ano de construção da estrutura;
- ID 6 – Historial de Inspeções ou Intervenções de Reabilitação: com indicações acerca de inspeções realizadas anteriormente àquela que vamos registar ou intervenções de reabilitação também executadas no passado, quando foi possível obter esta informação sobre a estrutura em estudo;
- ID 7 – Data Desta Inspeção: com indicação do mês e ano de realização da campanha de inspeção estrutural a que se referem os dados e resultados que se estão a registar na BD sobre a estrutura;
- ID 8 – Descrição de Outras Anomalias Visíveis: para descrição das principais anomalias detetadas através de inspeção visual da estrutura, tais como fendilhação, delaminação do betão, armaduras expostas e corroídas, escorrências, humidade ou infiltração de água, deformações, assentamentos, desaprumos, deslocamentos, etc.

6.2. CARACTERÍSTICAS DO BETÃO

Os campos de introdução de dados referentes às características do betão são os identificados por "ID" nº 9, designadamente de "ID" nº 9-a até nº 9-f:

- ID 9-a – Resistência à Compressão: com indicação da classe de resistência do betão, de acordo com a NP EN 206, e valores característico e de cálculo da tensão de rotura à compressão do betão, respetivamente f_{ck} e f_{cd} , apurados por análise específica realizada pelo laboratório, em conformidade com o documento "CSTR n.º 11 - Concrete Society Technical Report n.º 11", intitulado "Concrete Core Testing for Strength" e a Norma NP EN 13791: 2008, sobre o conjunto dos valores obtidos para a tensão de rotura das carotes ensaiadas;

- ID 9-b – Ensaio Esclerométrico: com o registo dos resultados obtidos para a tensão de resistência superficial do betão (W_m) e também, sempre que esta é possível determinar, a indicação da correlação entre os valores do índice esclerométrico (R) e os da tensão de rotura do betão, obtidos através dos ensaios de compressão axial em laboratório, para as carotes na mesma zona da estrutura;
- ID 9-c – Resistividade Elétrica: com indicação do(s) valor(es) da resistividade elétrica obtidos para as amostras de betão ensaiadas;
- ID 9-d – Permeabilidade: para registo dos valores indicadores da permeabilidade do betão, obtidos nos ensaios efetuados;
- ID 9-e – Porosidade: para registo dos valores indicadores da porosidade do betão, obtidos nos ensaios efetuados;
- ID 9-f – Ensaio de Microscopia: com a descrição sucinta das principais observações e dos resultados mais relevantes obtidos, em provetes de betão, através do ensaio de microscopia, realizado em laboratório, e, muitas vezes, complementado também por uma análise de observação macroscópica.

6.3. ARMADURAS E ESPESSURA DO RECOBRIMENTO

Os campos de introdução de dados referentes às armaduras e à espessura do recobrimento são os identificados por “ID” nº 10 e 11:

- ID 10 – Aço em Armaduras: com registo dos resultados obtidos nos ensaios de tração efetuados em amostras de armaduras do betão armado e indicação da classe de resistência;
- ID 11 – Armaduras e Espessura do Recobrimento: com resultados acerca da identificação e localização das armaduras no betão armado, seus diâmetros e espaçamentos, e a espessura do recobrimento, detetados através de pacómetro e/ou de observação de sondagens de reconhecimento estrutural.

6.4. ENSAIOS QUÍMICOS E ELETROQUÍMICOS

Os campos de introdução de dados referentes aos ensaios químicos e eletroquímicos são os identificados por “ID” nº 12 a 17:

- ID 12 – Profundidade de Carbonatação no Betão: com registo dos resultados obtidos nos ensaios de determinação da profundidade de carbonatação, nos elementos estruturais inspecionados;
- ID 13 – Teor de Cloretos no Betão: com registo dos resultados obtidos, “in situ” ou em laboratório, nos ensaios de determinação do teor de cloretos, em amostras extraídas dos elementos estruturais inspecionados;

- ID 14 – Teor de Sulfatos no Betão: com registo dos resultados obtidos nos ensaios laboratoriais de determinação do teor de sulfatos, em amostras extraídas dos elementos estruturais inspecionados;
- ID 15 – Teor de Álcalis no Betão: com registo dos resultados obtidos nos ensaios laboratoriais de determinação do teor de álcalis, em amostras extraídas dos elementos estruturais inspecionados;
- ID 16 – Potenciais Elétricos: com indicação dos valores obtidos nos ensaios de medição de potenciais elétricos realizados na estrutura;
- ID 17 – Velocidade de Corrosão: com indicação dos valores obtidos para a velocidade de corrosão, através dos ensaios realizados na estrutura.

6.5. OUTRAS OBSERVAÇÕES OU DADOS ADICIONAIS

O campo de introdução de dados referente a outras observações ou dados adicionais é identificado por “ID” nº 18.

Pretende-se neste campo registar outras observações e informação relevantes, acerca das características da estrutura, sua situação e estado de conservação, e que não estejam enquadradas nos campos anteriores.

Estes dados adicionais poderão ser informação complementar na descrição, avaliação e estudo da estrutura.

6.6. INDICAÇÕES ACERCA DE INTERVENÇÃO DE REABILITAÇÃO POSTERIOR

O campo de introdução de dados referente à informação disponível acerca de intervenções de reabilitação posteriores à inspeção que se está a registar é identificado por “ID” nº 19 e está designado pelo título: Notas de Indicação/Descrição da Intervenção/Metodologia de Reabilitação Executada após esta Inspeção.

Pretende-se neste campo indicar ou descrever, de forma muito sucinta, os dados acerca da intervenção ou da metodologia de reabilitação, que tenha sido executada na estrutura após a realização desta inspeção, sempre que se tenha acesso a essa informação.

6.7. REGISTOS FOTOGRÁFICOS

O campo de introdução de dados referente aos registos fotográficos é identificado por “ID” nº 20.

É composto por três linhas, disponíveis para apresentação de um máximo de três fotografias (Foto 1, Foto 2 e Foto 3) e respetivas legendas, com registos que ilustrem exemplos das anomalias detetadas na estrutura inspecionada.

As fotos introduzidas na BD deverão ser de vistas parciais da estrutura ou dos elementos estruturais, permitindo visualizar aspetos localizados e mantendo sempre, assim, o anonimato da estrutura em estudo.

6.8. ANÁLISE DE DADOS E RESULTADOS

A análise dos dados e dos resultados obtidos na amostragem contida na BD é realizada especialmente através do desenvolvimento de um conjunto de gráficos que lhe estão associados.

Os dados e indicadores utilizados na análise estatística e comparativa, são aqueles mais relevantes e também os que têm maior frequência de registo de resultados obtidos na amostragem conseguida nesta versão da BD.

Logo nas linhas seguintes a cada um desses campos de introdução de dados, são registados isoladamente os valores que serão utilizados na referida análise e nos respetivos gráficos, sendo adotado o seguinte critério:

- Para a classe do betão: indicação do valor mais significativo;
- Para a resistividade: indicação de valor aproximado ao valor médio;
- Para os recobrimentos mínimos das armaduras: indicação de valor aproximado ao valor médio;
- Para a profundidade de carbonatação no betão: indicação de valor aproximado ao valor médio ou o mais significativo, consoante o mais representativo para cada caso;
- Para o teor máximo de cloretos: indicação de valor máximo e respetiva profundidade de ocorrência no betão.

6.8.1. ANÁLISE DE ENQUADRAMENTO GERAL

Numa análise de enquadramento geral das estruturas estudadas e registadas, são desenvolvidos quatro gráficos:

- Estruturas: gráfico circular com a análise da quantidade de estruturas de cada tipo e a sua representatividade face ao total de estruturas registadas na BD;
- Classes de Exposição Ambiental: gráfico circular com a análise da quantidade de estruturas registadas em cada classe de exposição ambiental e a sua representatividade face ao total de estruturas na BD;
- País: gráfico circular com a análise do número de obras registadas em cada país e a sua representatividade face ao total da BD;
- Ano de Construção / Inspeção: gráfico xy de dispersão com a análise conjunta do ano de construção e do ano de inspeção de cada obra registada na BD. Pretende-se ter também a noção do tempo de vida útil da estrutura já decorrido aquando da inspeção registada.

6.8.2. ANÁLISE DA CLASSE DE RESISTÊNCIA DO BETÃO

Na análise da classe de resistência do betão registada nas estruturas estudadas, são desenvolvidos cinco gráficos:

- Betão (gráfico do total): gráfico circular com a análise da quantidade de registos de cada classe do betão no conjunto total dos registos associados aos principais elementos estruturais (pilares, vigas e lajes ou paredes) e a sua representatividade face ao total das estruturas na BD;
- Betão em Pilares: gráfico circular com a análise da quantidade de registos de cada classe do betão no conjunto total dos registos em pilares das estruturas na BD e a sua representatividade face ao total;
- Betão em Vigas: gráfico circular com a análise da quantidade de registos de cada classe do betão no conjunto total dos registos em vigas das estruturas na BD e a sua representatividade face ao total;
- Betão em Lajes ou Paredes: gráfico circular com a análise da quantidade de registos de cada classe do betão no conjunto total dos registos em lajes, ou paredes (consoante o tipo de estrutura), nas estruturas da BD e a sua representatividade face ao total;
- Idade da Estrutura vs. Resistência do Betão: gráfico de colunas com a análise conjunta da idade da estrutura à data da inspeção, quando conhecida, e a indicação da resistência do betão registada em pilares, vigas e lajes ou paredes, sempre que possível.

6.8.3. INDICAÇÃO DA RESISTIVIDADE ELÉTRICA DO BETÃO

A análise da resistividade elétrica do betão nas estruturas estudadas e registadas, é desenvolvida num gráfico:

- Resistividade Elétrica Média: gráfico de colunas com a análise do valor médio obtido para a resistividade elétrica do betão, em $k\Omega cm$, para cada estrutura registada na BD.

6.8.4. ANÁLISE DO RECOBRIMENTO, PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO E TEOR DE CLORETOS

Na análise global dos resultados obtidos relativamente às espessuras de recobrimentos das armaduras, profundidade de carbonatação e teor de cloretos no betão, são desenvolvidos os seguintes gráficos, de análise individual e conjunta destes indicadores:

- Recobrimento: gráfico de colunas com a análise do conjunto total dos valores da espessura do recobrimento das armaduras no betão, em mm, registados para cada um dos principais elementos estruturais (pilares, vigas, lajes ou paredes) das estruturas da BD;
- Profundidade de Carbonatação: gráfico de colunas com a análise do conjunto total dos valores da profundidade de carbonatação no betão, em mm, registados para cada um dos principais elementos estruturais (pilares, vigas, lajes ou paredes) das estruturas da BD;

- Recobrimento c/ Profundidade de Carbonatação: gráfico de colunas com a análise conjunta da totalidade dos valores da espessura do recobrimento e da profundidade de carbonatação, ambos em mm, registados para cada um dos principais elementos estruturais (pilares, vigas, lajes ou paredes), possibilitando analisar também a significância dos resultados obtidos, nas estruturas da BD;
- Recobrimento c/ Profundidade de Carbonatação em Pilares: gráfico de colunas com a análise conjunta dos valores da espessura do recobrimento e da profundidade de carbonatação, ambos em mm, registados nos pilares das estruturas da BD, possibilitando analisar também a significância dos resultados obtidos para estes elementos estruturais;
- Recobrimento c/ Profundidade de Carbonatação em Vigas: gráfico de colunas com a análise conjunta dos valores da espessura do recobrimento e da profundidade de carbonatação, ambos em mm, registados nas vigas das estruturas, possibilitando apreciar a significância dos resultados obtidos também para estes elementos estruturais;
- Recobrimento c/ Profundidade de Carbonatação em Lajes ou Paredes: gráfico de colunas com a análise conjunta dos valores da espessura do recobrimento e da profundidade de carbonatação, ambos em mm, registados nas lajes ou paredes, consoante o tipo de estrutura, permitindo analisar a significância dos resultados obtidos para estes elementos estruturais;
- Teor de Cloretos: gráfico de colunas com a análise do conjunto total dos valores do teor de cloretos no betão, em “% no betão”, registados para cada um dos principais elementos estruturais (pilares, vigas, lajes ou paredes) das estruturas da BD;
- Teor de Cloretos c/ Prof. e Recobrimento: gráfico de colunas com a análise conjunta da totalidade dos valores do teor de cloretos no betão, respetiva profundidade de ocorrência e a espessura do recobrimento, registados para cada um dos principais elementos estruturais (pilares, vigas, lajes ou paredes), sendo em “% no betão”, o primeiro, e mm os outros dois, possibilitando analisar também a significância dos resultados obtidos, nas estruturas da BD;
- Teor de Cloretos c/ Prof. e Recobrimento em Pilares: gráfico de colunas com a análise conjunta dos valores do teor de cloretos no betão, respetiva profundidade de ocorrência e a espessura do recobrimento, registados nos pilares, sendo em “% no betão”, o primeiro, e mm os outros dois, permitindo analisar a significância dos resultados obtidos para estes elementos estruturais;
- Teor de Cloretos c/ Prof. e Recobrimento em Vigas: gráfico de colunas com a análise conjunta dos valores do teor de cloretos no betão, respetiva profundidade de ocorrência e a espessura do recobrimento, registados nas vigas, sendo em “% no betão”, o primeiro, e mm os outros dois, possibilitando apreciar a significância dos resultados obtidos também para estes elementos estruturais;
- Teor de Cloretos c/ Prof. e Recobrimento em Lajes ou Paredes: gráfico de colunas com a análise conjunta dos valores do teor de cloretos no betão, respetiva profundidade de ocorrência e a

espessura do recobrimento, registados nas lajes ou paredes, consoante o tipo de estrutura, sendo em “% no betão”, o primeiro, e mm os outros dois, permitindo analisar a significância dos resultados obtidos para estes elementos estruturais.

6.8.5. BASES DE DADOS PARCIAIS

A partir da Base de Dados Geral foi possível criar Bases de Dados Parciais, restringindo o estudo e análise da informação recolhida e compilada, para um determinado tipo de estrutura ou para uma dada classe de exposição ambiental.

Estas BD Parciais funcionam como versões reduzidas da BD Geral e resultam da redução criteriosa da amostragem total da BD Geral, limitada a um tipo de estrutura ou classe de exposição.

Neste sentido, o trabalho desenvolvido resultou em quatro Bases de Dados Parciais, uma para cada um dos principais tipos de estruturas, mais frequentes e representativos na amostragem da BD Geral:

- BD para Cais e Pontes-Cais;
- BD para Edifícios;
- BD para Pontes;
- BD para Reservatórios.

E também o mesmo para as três classes de exposição ambiental mais frequentes e representativas na amostragem da BD Geral, sendo:

- BD para a classe de exposição XC1;
- BD para a classe de exposição XC4;
- BD para a classe de exposição XS3.

Cada uma destas BD Parciais apresenta, portanto, a estrutura e o funcionamento exatamente iguais aos da BD Geral, assim como também a mesma metodologia de análise de dados e resultados.

Com a apresentação destas BD Parciais, pretende-se, por um lado, ir ao encontro mais direto do que poderá ser o interesse técnico específico de determinados utilizadores da BD e, por outro, acrescentar indicadores e resultados adicionais na análise de dados e resultados da BD, focando especificamente os principais tipos de estruturas registadas e as mais representativas classes de exposição ambiental, registados nesta amostragem.

7. ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS

Pelo trabalho desenvolvido no âmbito desta dissertação, no tempo útil disponível, foi possível reunir na Base de Dados uma amostragem com informação de 43 estruturas.

Nos capítulos seguintes apresentam-se os principais resultados obtidos pela referida BD e evidenciam-se algumas observações da análise desenvolvida e a sua apreciação.

7.1. BASE DE DADOS GERAL

A Base de Dados de Durabilidade e Anomalias de Estruturas de Betão reúne nesta amostragem diversos tipos de estruturas, nomeadamente 14 Edifícios, 8 Pontes (em ambiente marítimo, sobre rios e sobre vias), 6 Reservatórios de água (elevados e enterrados), 5 Pontes-Cais e 3 Cais, 2 Conduatas de água potável (elevada e enterrada), ainda um Túnel, um Silo Automóvel, uma Chaminé Industrial, uma Estrutura Industrial de Suporte de Depósitos e um Silo para Cimento (ver Figura 18).

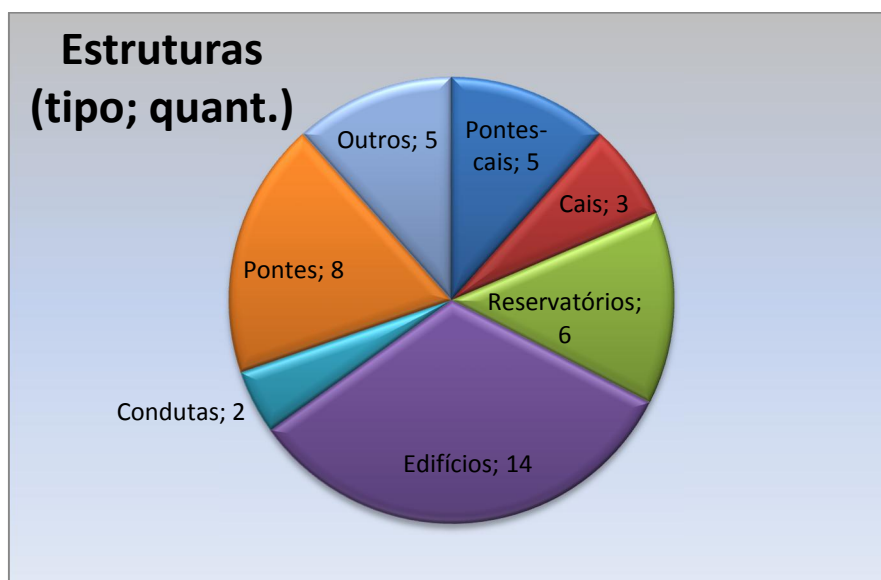


Figura 18: Gráfico do Tipo de Estruturas - BD Geral.

Quanto às classes de exposição ambiental representadas por esta amostragem, verifica-se que a maioria das estruturas está enquadrada nas classes XC1 e XC4, de corrosão induzida por carbonatação, em ambiente seco ou permanentemente húmido e em ambiente ciclicamente húmido e seco, respetivamente, e na classe XS3, de corrosão induzida por cloretos da água do mar, em ambiente de zona de marés, de rebentação e de salpicos (ver Figura 19).

As restantes estruturas enquadram-se ainda nas classes XC2 e XC3, de corrosão induzida por carbonatação, em ambiente húmido, raramente seco e em ambiente moderadamente húmido, respetivamente, e na classe XS1, de corrosão induzida por cloretos da água do mar, em ambiente de exposição ao ar transportando sais marinhos mas sem contacto direto com água do mar.

Existe também uma estrutura registada com enquadramento na classe de exposição X0, um túnel, de betão simples, ou seja, betão sem armaduras, sem risco de corrosão ou ataque.

A BD reúne estruturas localizadas em vários países, predominantemente em Portugal, com 32 estudos registados, e ainda com 5 estruturas em Angola, 4 em Moçambique, uma na Ucrânia (um Silo para cimento) e uma no Brasil (um Cais) (ver Figura 20).

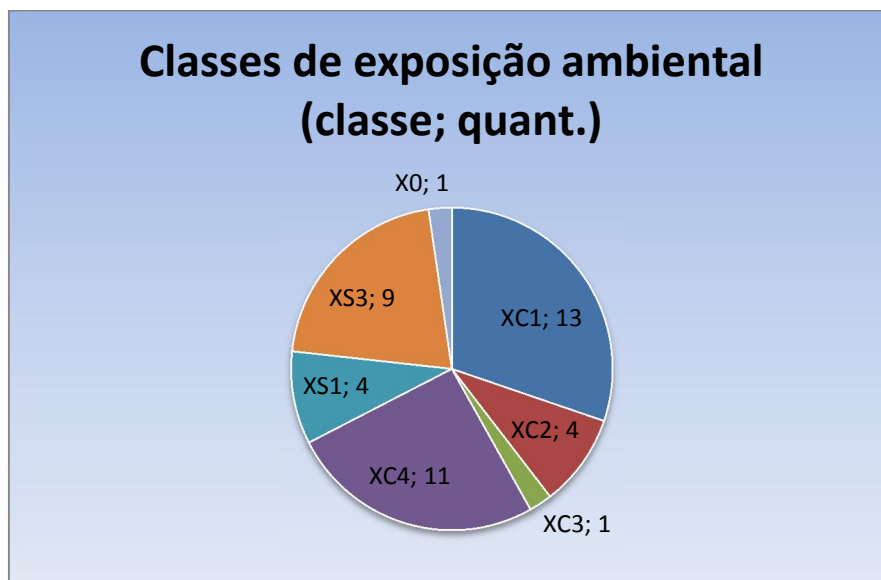


Figura 19: Gráfico das Classes de Exposição Ambiental - BD Geral.

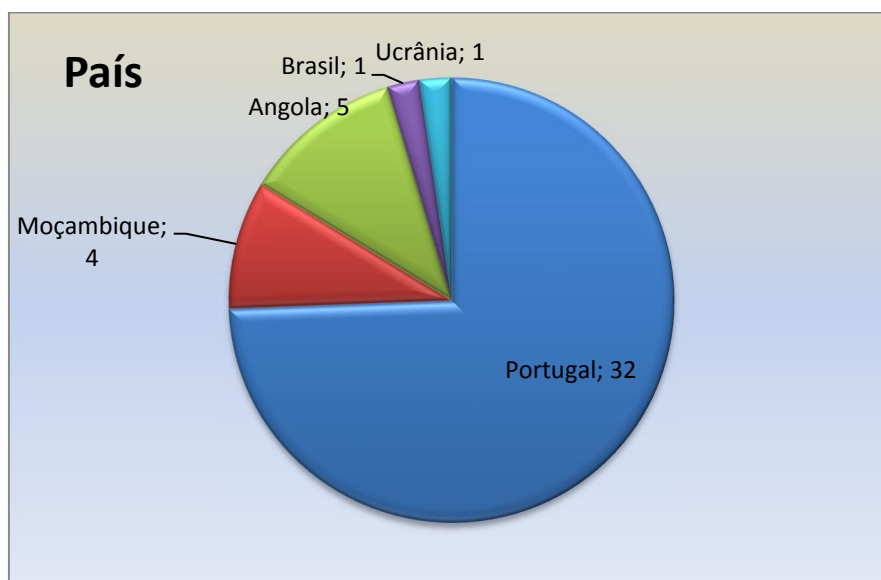


Figura 20: Gráfico dos Países - BD Geral.

No que respeita ao ano de construção das estruturas, aquelas em foi possível obter esta informação, foram inspecionadas as mais antigas construídas em 1912, duas Ponte-Cais, em Moçambique, e as mais recentes datadas de 2008 e 2009, dois Edifícios, em Angola (ver Figura 21).

Relativamente ao ano de inspeção das estruturas, estão registados nesta amostragem os dados e os resultados de campanhas de inspeção estrutural e ensaios realizados entre 1999 e 2015.

Das estruturas com construção datada, aquelas em que a inspeção foi realizada num período mais avançado da sua vida útil são as Estruturas nº 16 e 17, as duas Pontes-cais, em Moçambique, de 1912, inspecionadas em 2007, com cerca de 95 anos de existência na altura.

Por outro lado, aquelas estruturas em que a inspeção registada se realizou com menos tempo decorrido após a sua construção são as Estruturas nº 24 e 25, os dois Edifícios, em Angola, construídos em 2008 e 2009 e inspecionados em 2014 e 2015, com cerca de 6 anos de funcionamento na altura.

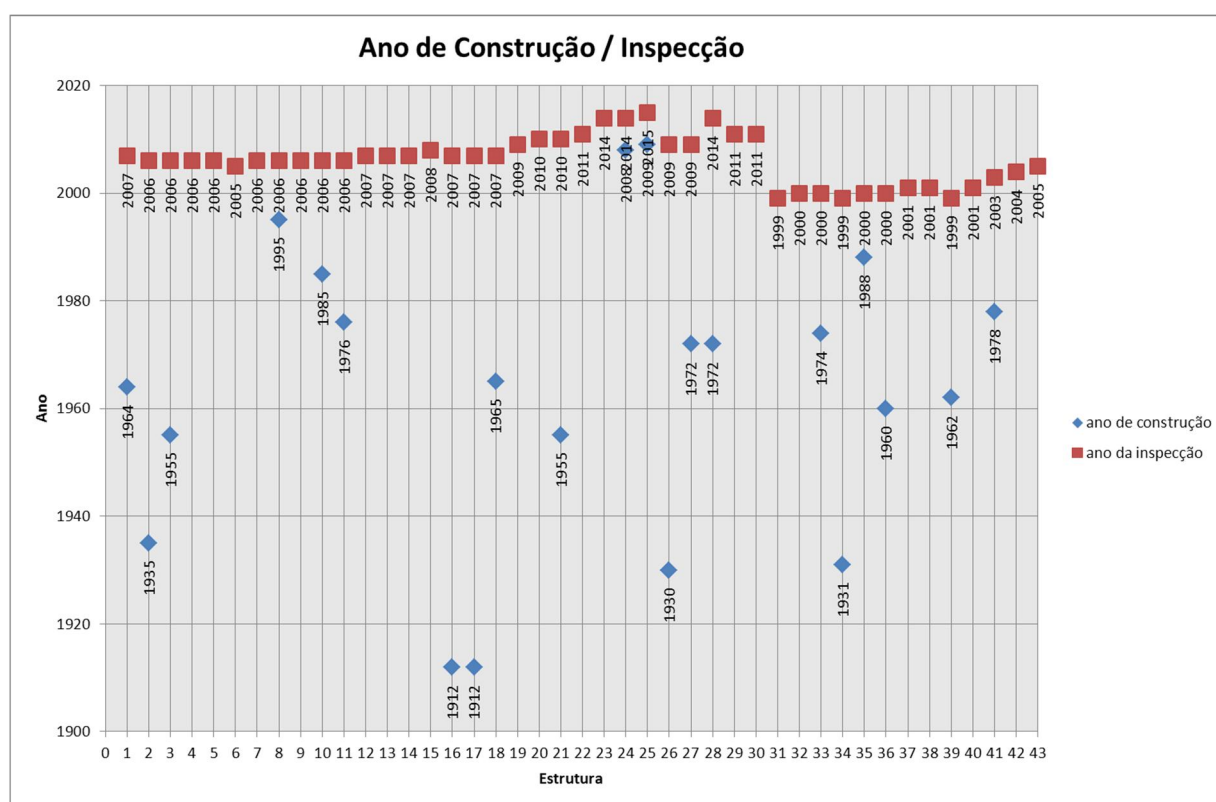


Figura 21: Gráfico do Ano de Construção / Inspeção - BD Geral.

7.1.1. CLASSE DE RESISTÊNCIA DO BETÃO

Analisando a totalidade dos registos da classe de resistência do betão, associados aos principais elementos estruturais inspecionados, pilares, vigas e lajes ou paredes, em todas as estruturas, verifica-se a predominância das classes C20/25, C25/30 e C30/37 (ver Figura 22).

Também, nesta análise global, se verificam bastantes registos de betão das classes C16/20 e C12/15.

As restantes classes de resistência registadas, são C35/45 e C40/50, com 3 e 4 exemplos, respetivamente, e C45/55, C50/60 e C55/67, com um exemplo de cada.

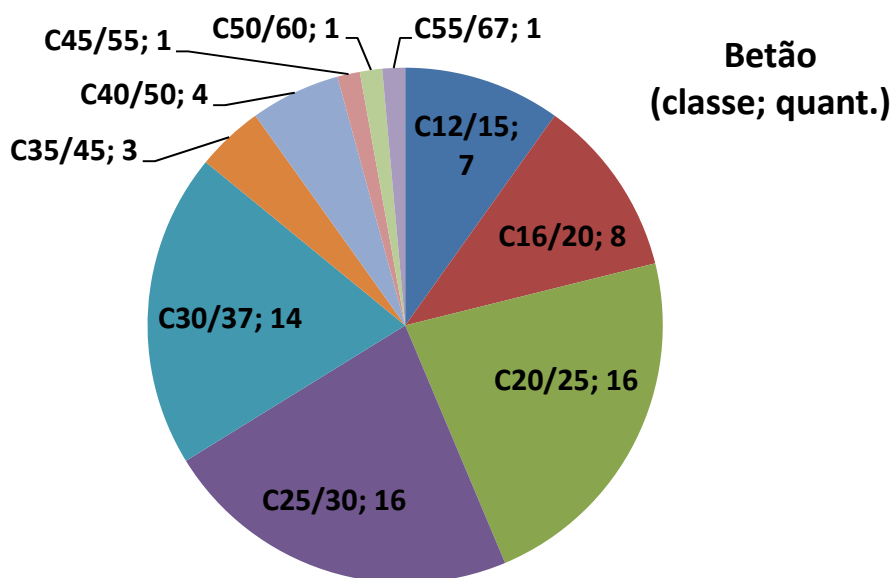


Figura 22: Gráfico Total das Classes de Resistência do Betão - BD Geral.

A mesma apreciação, feita só para as amostras de betão ensaiadas de pilares das estruturas da BD, revela que a maior parte corresponde às classes C16/20, C20/25, C25/30 e C30/37 (ver Figura 23).

Nas vigas, a maioria dos exemplos registados na BD corresponde às classes C12/15, C20/25, C25/30 e C30/37 (ver Figura 24).

No que diz respeito às lajes e paredes, consoante o tipo de estrutura, o betão ensaiado é na sua maioria das classes C16/20, C20/25, C25/30, C30/37 (ver Figura 25).

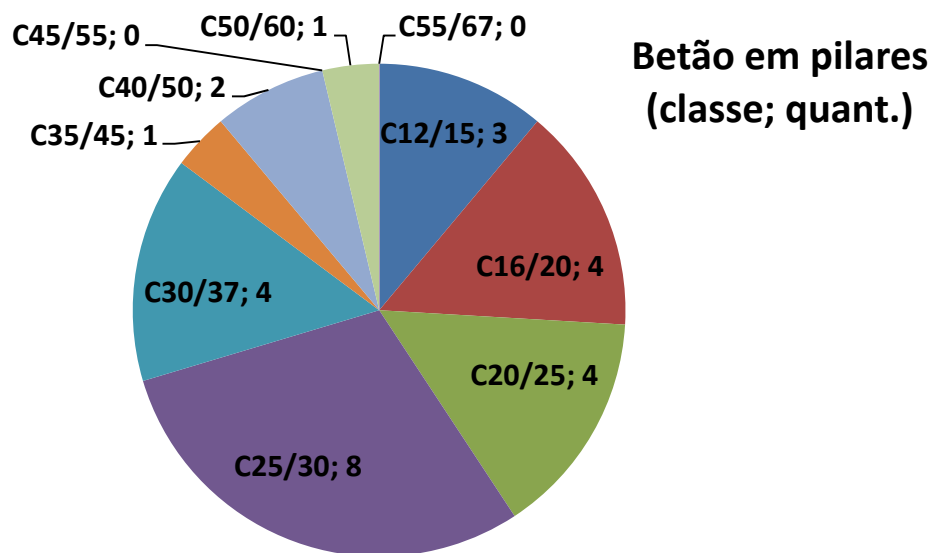


Figura 23: Gráfico das Classes de Resistência do Betão em Pilares - BD Geral.

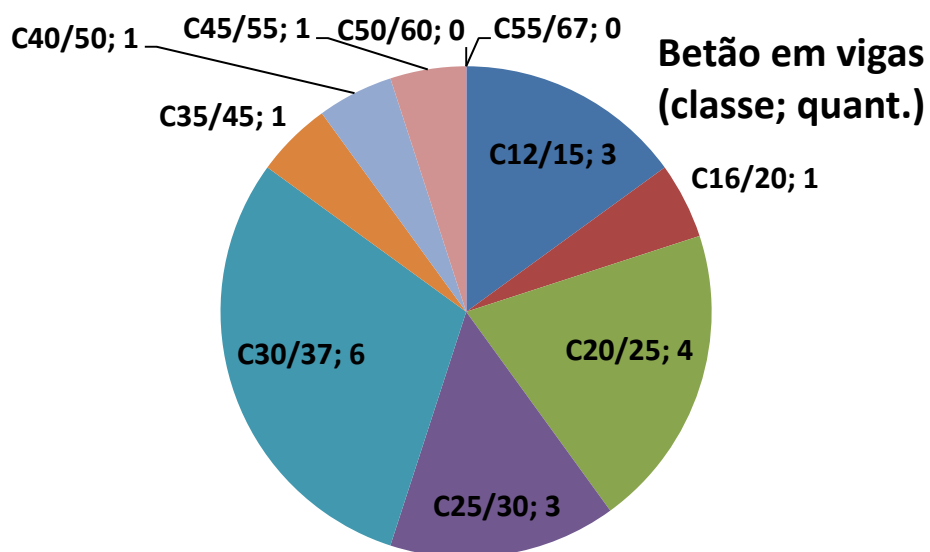


Figura 24: Gráfico das Classes de Resistência do Betão em Vigas - BD Geral.

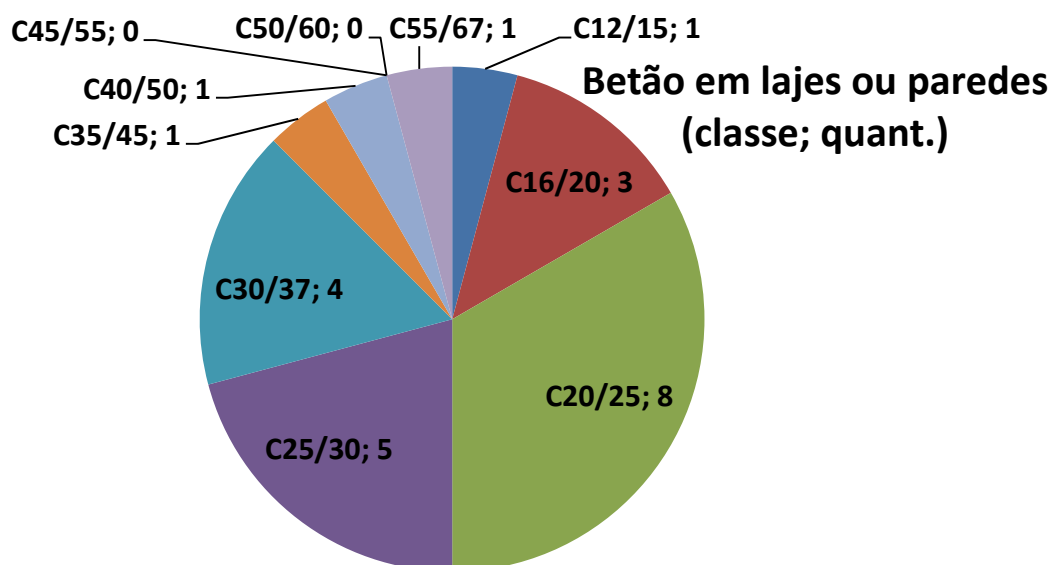


Figura 25: Gráfico das Classes de Resistência do Betão em Lajes ou Paredes - BD Geral.

7.1.2. RESISTIVIDADE ELÉTRICA DO BETÃO

No total de 43 estruturas registadas na Base de Dados, apenas 9 possuem registo de resultados de ensaios de determinação da resistividade elétrica do betão (ver Figura 26).

Os valores de resistividade elétrica do betão apresentados neste campo da BD são obtidos através de ensaios realizados em laboratório, em amostras de betão saturadas, previamente retiradas de carotes extraídas da estrutura.

Os valores médios mais elevados apresentam-se nas Estruturas nº 6 (um Cais), nº 17 (uma Ponte-Cais) e nº 43 (um Reservatório), respetivamente com 24.8, 31 e 30 kΩcm, indicando um baixo índice de corrosão possível, ou seja, indiciando fraca suscetibilidade para a ocorrência de corrosão significativa nas armaduras.

Os restantes valores médios variam de 9 a 16 kΩcm, sendo indicadores de um médio índice de corrosão possível, mais baixo ou mais elevado consoante o caso.

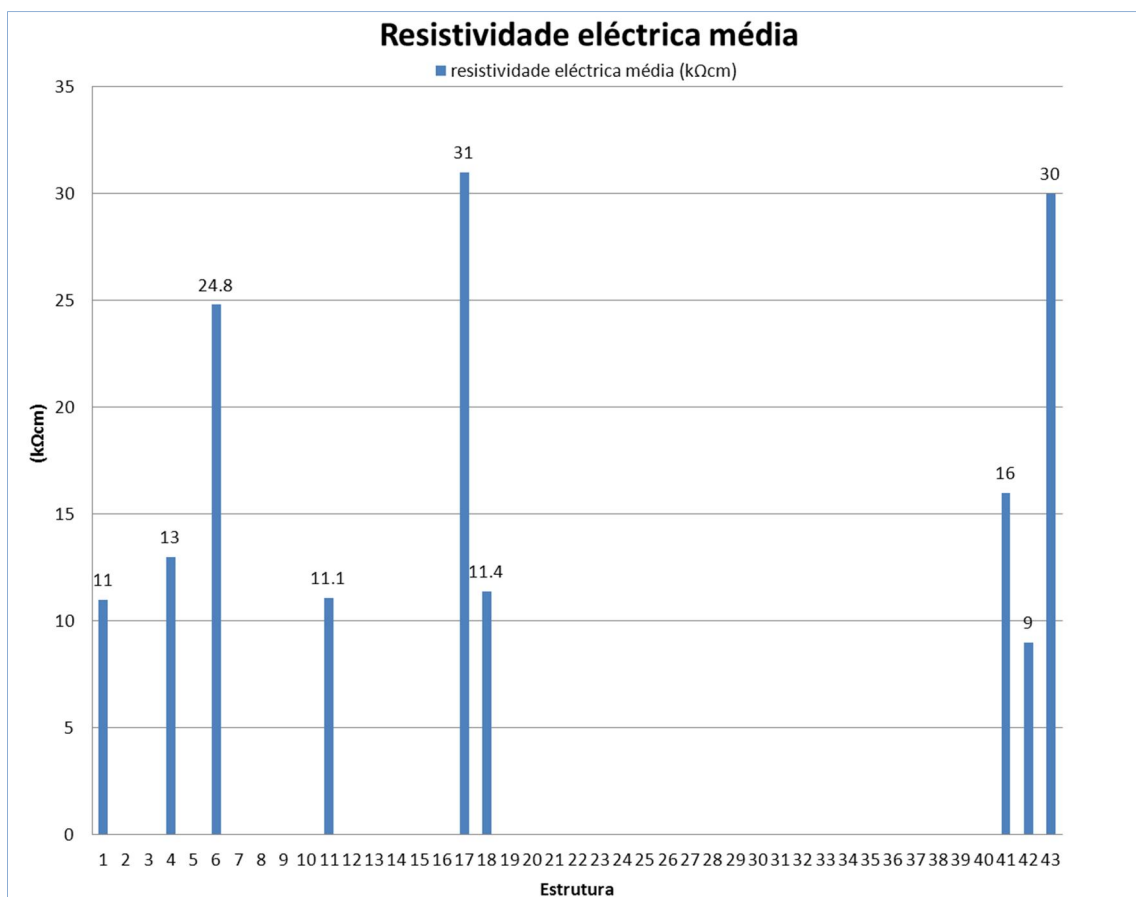


Figura 26: Gráfico da Resistividade Elétrica do Betão - BD Geral.

7.1.3. RECOBRIMENTOS DAS ARMADURAS

Analisando o conjunto total dos valores médios, não nulos, da espessura do recobrimento mínimo das armaduras no betão (média dos valores mínimos do recobrimento em cada zona de ensaio), em mm, registados para cada um dos principais elementos estruturais (pilares, vigas, lajes ou paredes), pode verificar-se o seguinte (ver Figura 27):

- A maior parte dos recobrimentos apresentam uma espessura inferior ou igual a 30 mm;
- As espessuras máximas de recobrimento mínimo, nesta amostragem, variam dos 50 aos 85 mm, ocorrendo principalmente em pilares e lajes ou paredes, consoante o caso;
- O valor máximo do recobrimento mínimo detetado em pilares das estruturas inspecionadas é de 85 mm, na Estrutura nº 6, um Cais;
- O valor máximo do recobrimento mínimo detetado em vigas é de 60 e 67 mm, nas Estruturas nº 2 e nº 17, respetivamente, duas Pontes-Cais;
- O valor máximo do recobrimento mínimo detetado em lajes e paredes é de 80 mm, na Estrutura nº 40, um Edifício de uma Indústria.

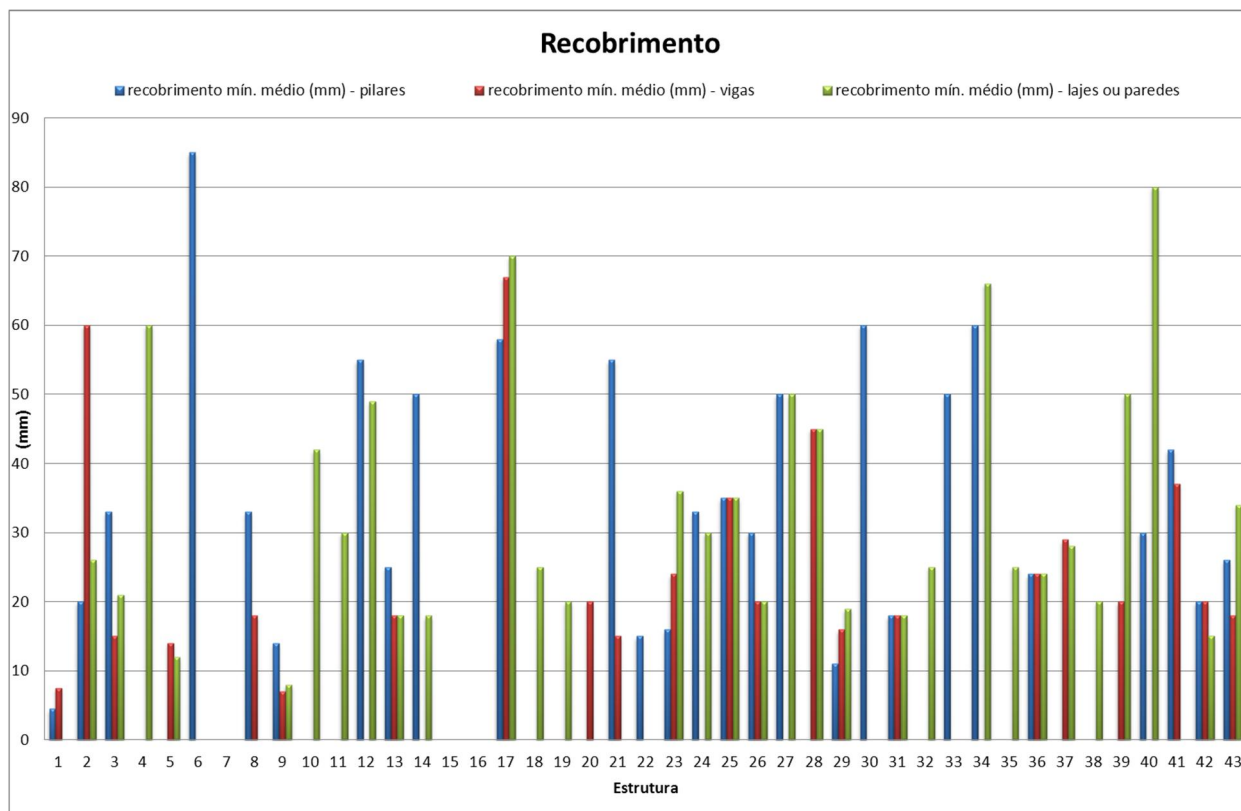


Figura 27: Gráfico do Recobrimento das Armaduras - BD Geral.

7.1.4. PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO NO BETÃO

A análise do conjunto total dos valores médios, não nulos, da profundidade de carbonatação no betão, em mm, registados para cada um dos principais elementos estruturais (pilares, vigas, lajes ou paredes) das estruturas da BD, permite observar que:

- As maiores profundidades médias de carbonatação registadas são na Estrutura nº 26, um Edifício;
- A maioria dos resultados registados é inferior a 20 mm (ver Figura 28).

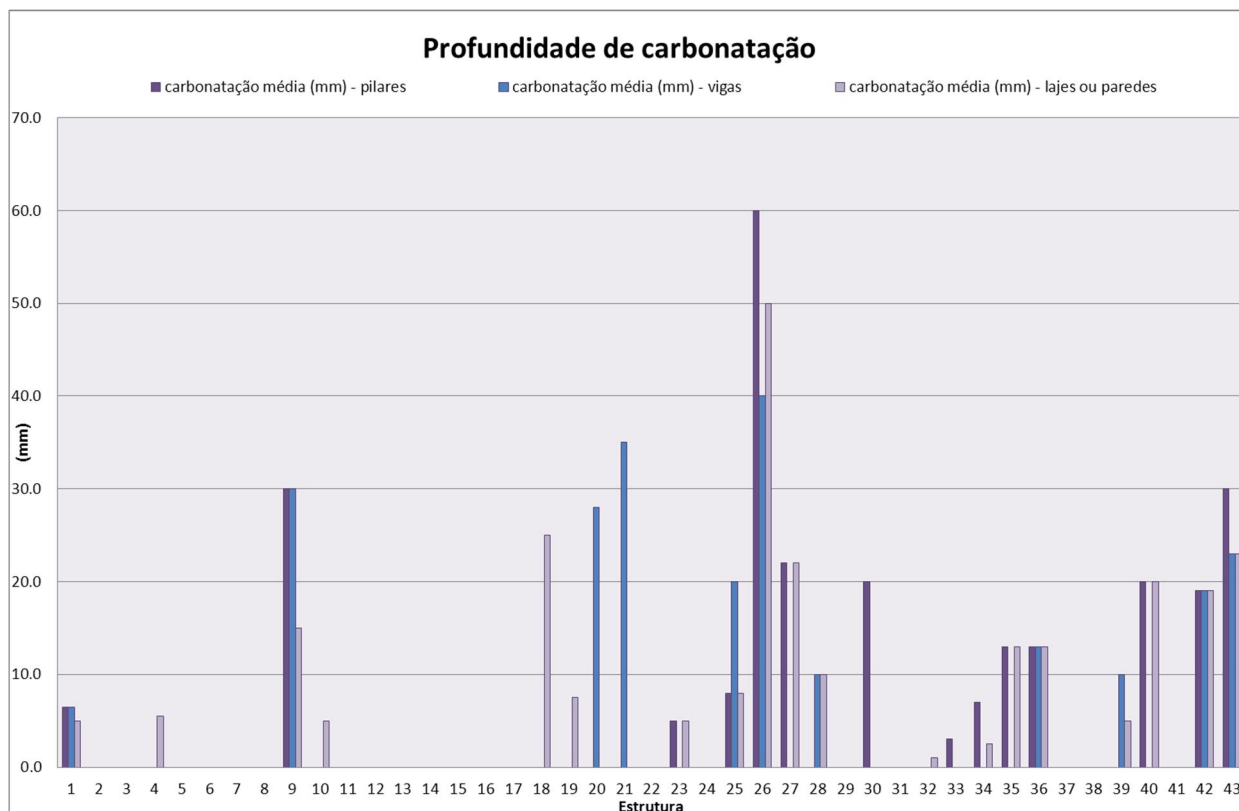


Figura 28: Gráfico da Profundidade de Carbonatação no Betão - BD Geral.

A análise conjunta da espessura do recobrimento e da profundidade de carbonatação, ambos em mm, registados nos pilares, nas vigas e nas lajes ou paredes, separadamente, permite apreciar a significância dos resultados obtidos para cada elemento estrutural (ver Figuras 29, 30 e 31).

Nos pilares existem vários casos de estudo onde a profundidade de carbonatação excede a espessura do recobrimento, representando risco de desenvolvimento de corrosão do aço das armaduras, nomeadamente nas Estruturas nº 1 (um Reservatório Enterrado), nº 9 e nº 26 (ambas Edifícios) e nº 43 (um Reservatório Semienterrado).

Nas vigas verifica-se que a frente de carbonatação também ultrapassa a profundidade das armaduras no betão nas Estruturas nº 9, nº 26 e nº 43.

Nas lajes e paredes, consoante o caso, a carbonatação detetada atinge a profundidade das armaduras na Estrutura nº 18 (um Silo para Cimento) e ultrapassa este nível nas Estruturas nº 9, nº 26 e nº 42 (Reservatório Elevado).

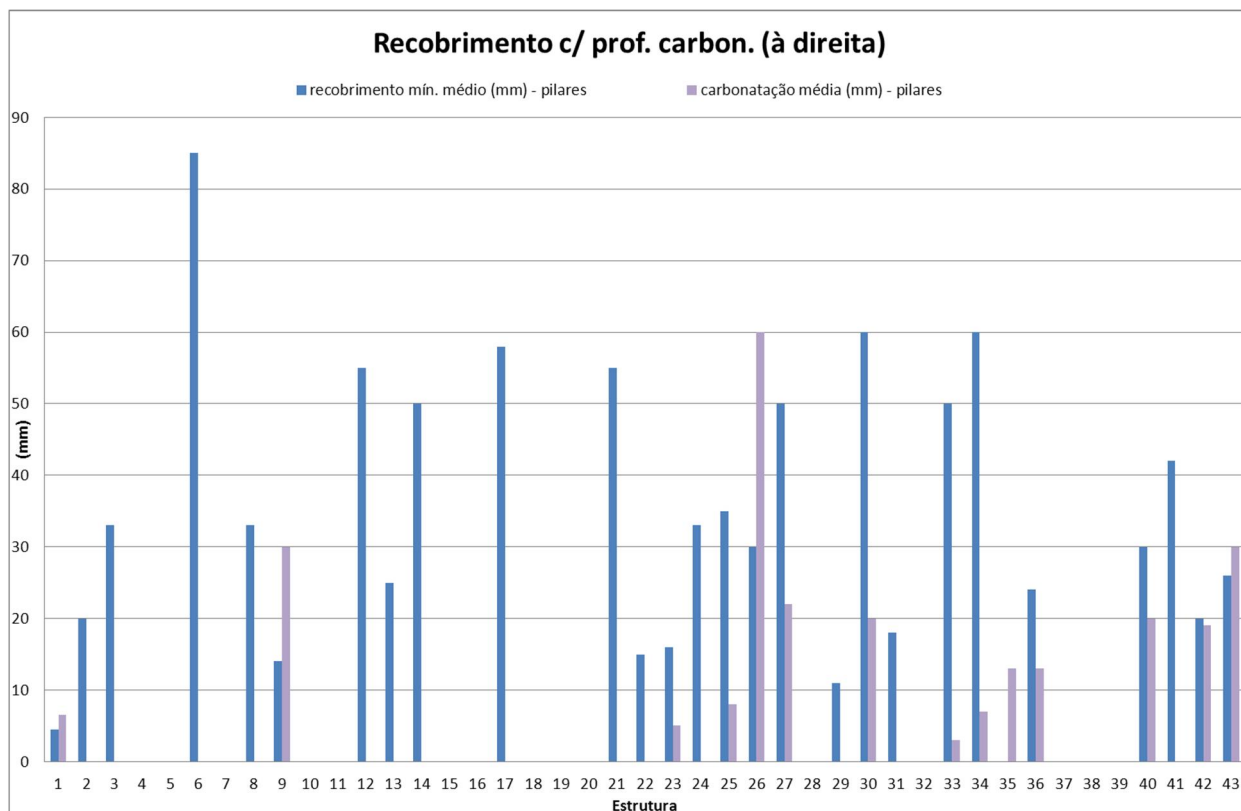


Figura 29: Gráfico da Profundidade de Carbonatação no Betão e Recobrimento em Pilares - BD Geral.

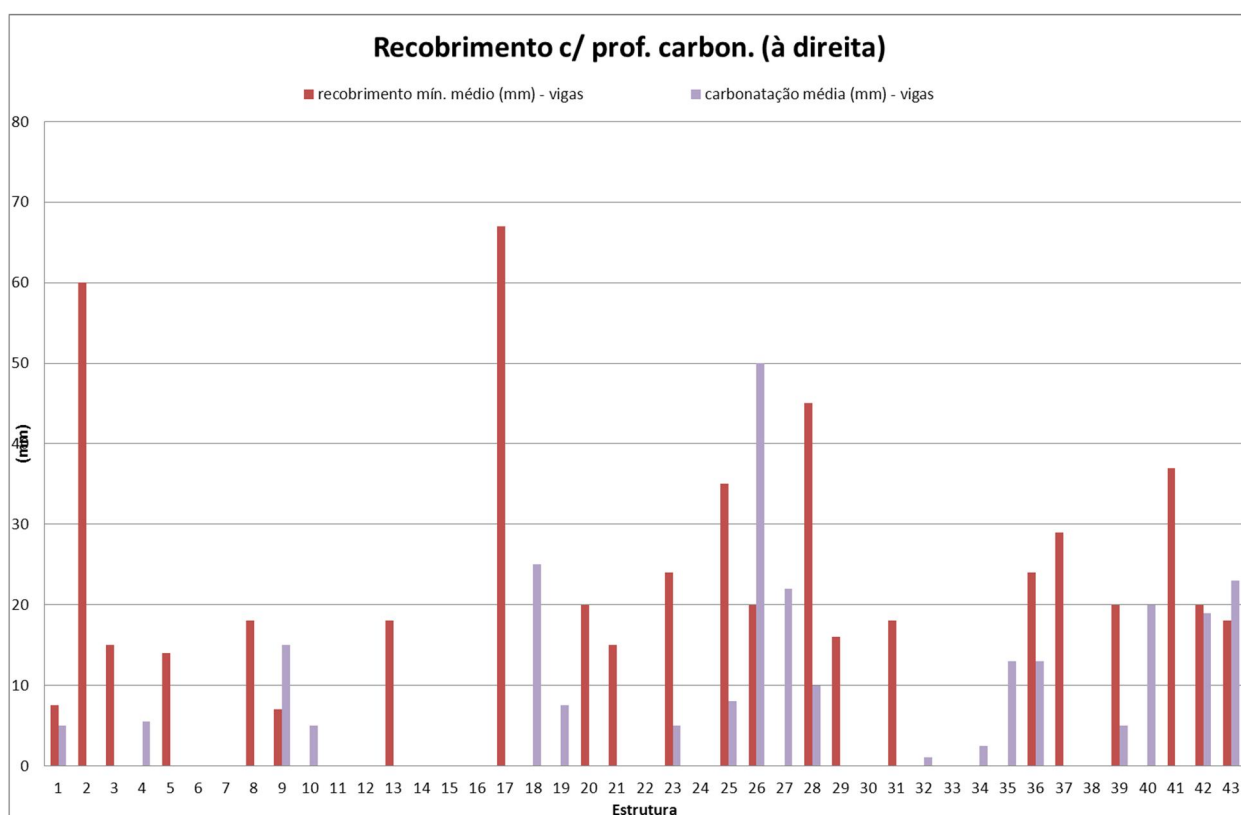


Figura 30: Gráfico da Profundidade de Carbonatação no Betão e Recobrimento em Vigas - BD Geral.

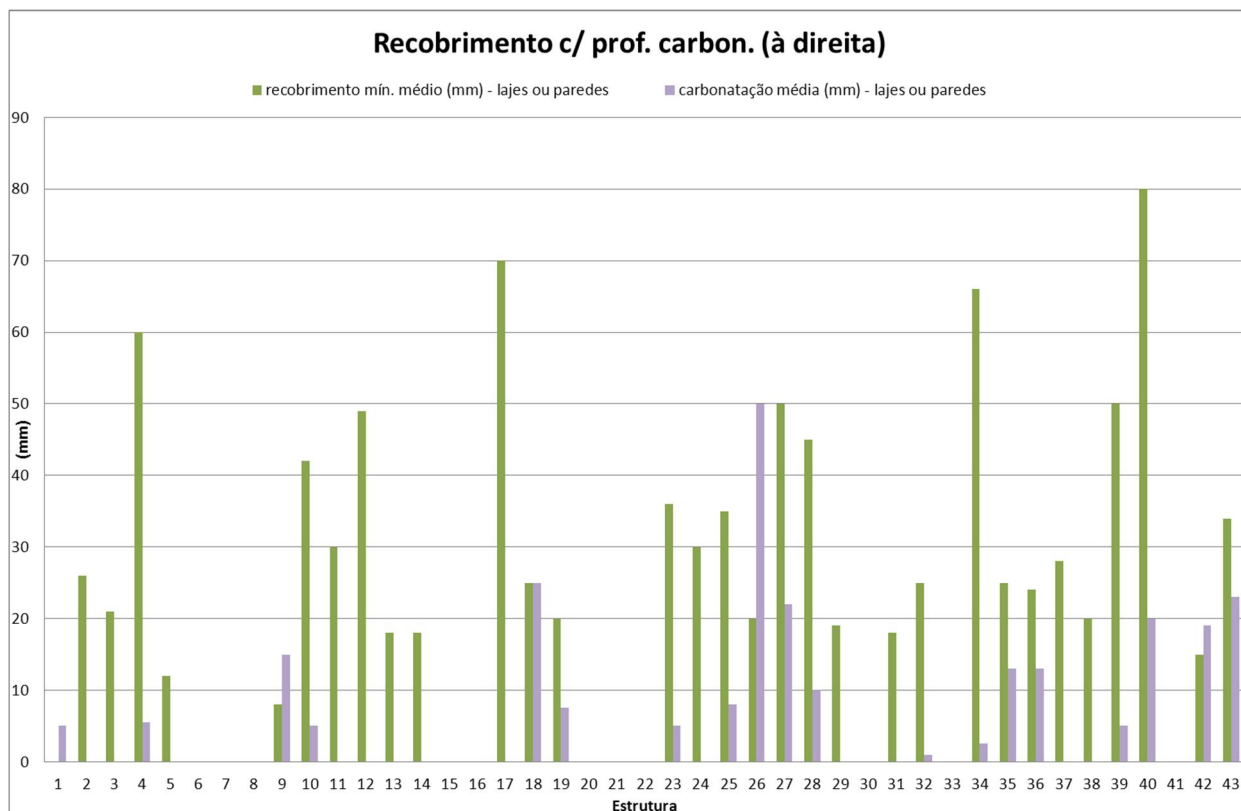


Figura 31: Gráfico da Profundidade de Carbonatação no Betão e Recobrimento em Lajes ou Paredes - BD Geral.

7.1.5. TEOR DE CLORETOS NO BETÃO

No que respeita à análise do conjunto total dos valores máximos não nulos do teor de cloretos no betão, em “% no betão”, registados para cada um dos principais elementos estruturais (pilares, vigas, lajes ou paredes) das estruturas da BD, verifica-se que:

- Os valores máximos ocorrem na Estrutura nº 41 (uma Ponte-Cais), com 2.0% nas vigas e 1.0% nos pilares;
- Nas Estruturas nº 2 e nº 3 (duas Pontes-Cais) ocorrem também valores dos mais elevados nesta amostragem, com 0.65% e 0.60% de Cl⁻ na massa de betão.

Uma apreciação global dos resultados obtidos revela que grande parte dos valores máximos de teor de cloretos no betão, a diversas profundidades, registados na BD, é considerada com registos elevados.

A análise conjunta dos valores máximos do teor de cloretos no betão, respetiva profundidade de ocorrência e a espessura média do recobrimento mínimo, registados para cada um dos principais elementos estruturais (pilares, vigas, lajes ou paredes), permite avaliar quais os casos de estudo onde esta contaminação é mais gravosa e qual a profundidade dos teores elevados detetados, em

relação à espessura do recobrimento, atingindo ou ultrapassando o nível das armaduras, indiciando o desenvolvimento da corrosão no aço (ver Figuras 33, 34 e 35).

Exemplifica-se o esquema de leitura destes gráficos referidos nas figuras (ver Figura 32):

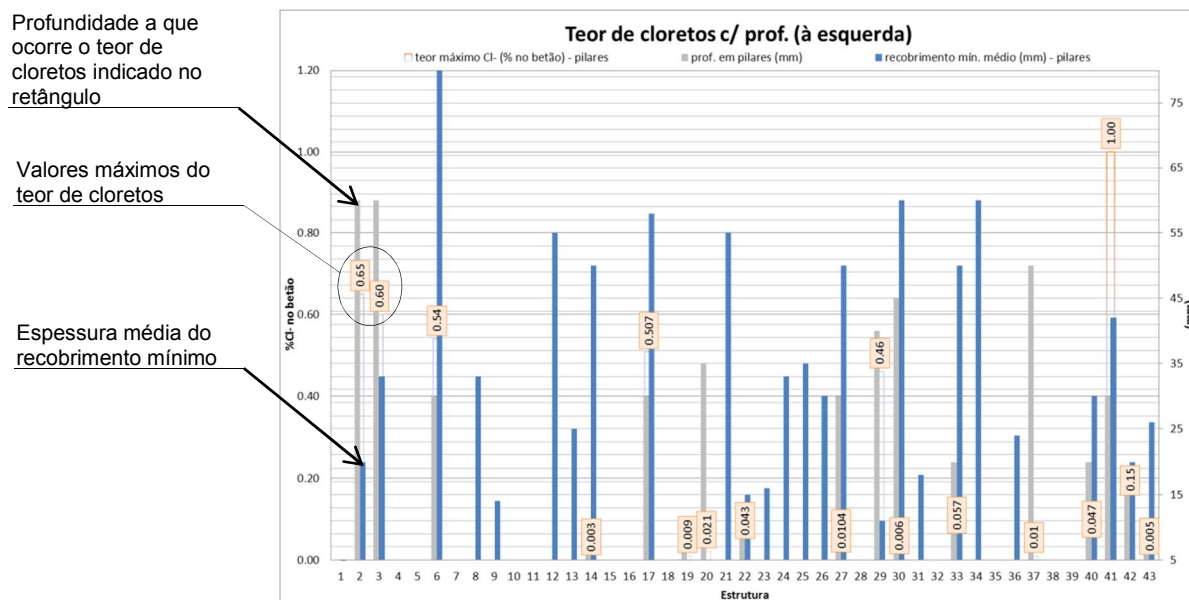


Figura 32: Esquema indicativo da leitura dos gráficos de teor de cloretos vs. profundidade vs. recobrimento.

Os principais casos onde um teor elevado de cloretos ocorre a uma espessura que já atinge ou ultrapassa o recobrimento das armaduras são:

- Relativamente aos pilares, nas Estruturas nº 2 e nº 3 (duas Pontes-Cais) e na Estrutura nº 29 (um Cais);
- Em relação às vigas, nas Estruturas nº 2 e nº 3, nas Estruturas nº 5 (uma Ponte), nº 28 e nº 29 (dois Cais);
- E quanto às lajes ou paredes, consoante o caso, nas Estruturas nº 2 e nº 3, nas Estruturas nº 28 e nº 29.

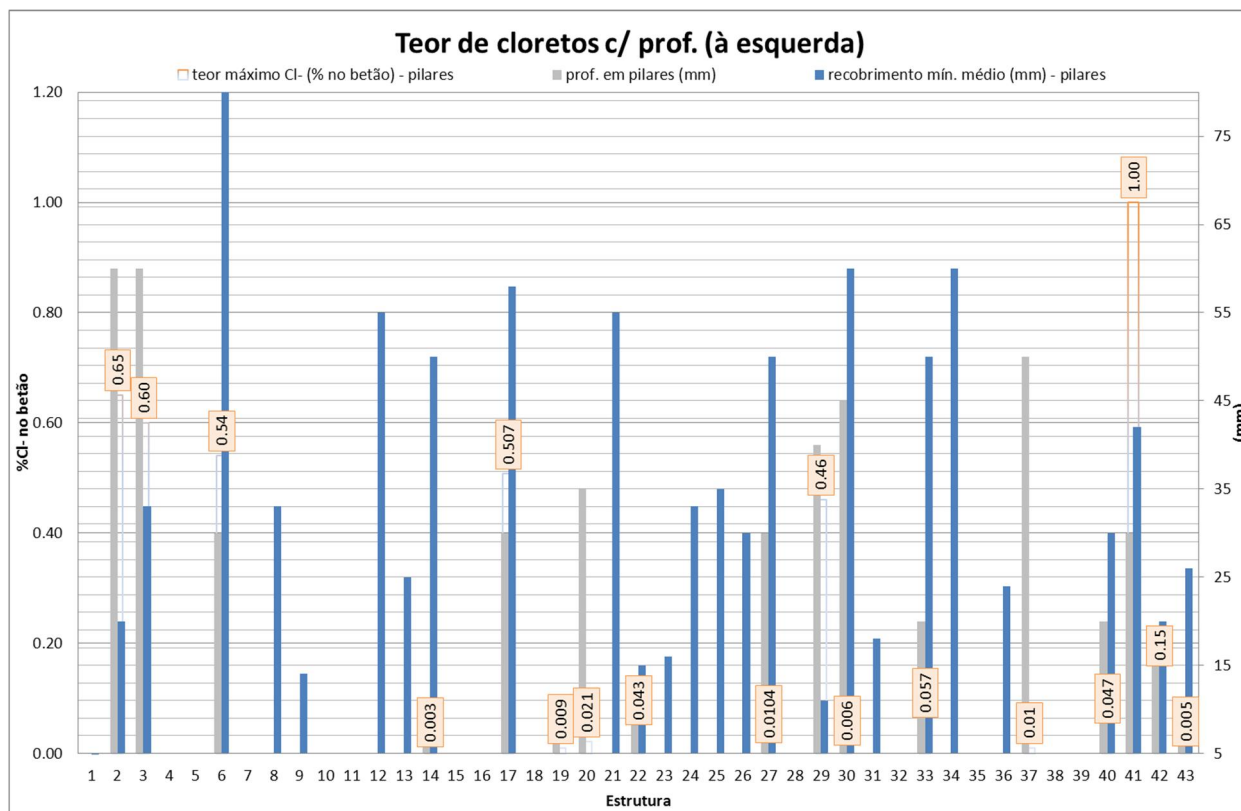


Figura 33: Gráfico do Teor de Cloretos no Betão em Pilares, com Profundidade e o Recobrimento - BD Geral.

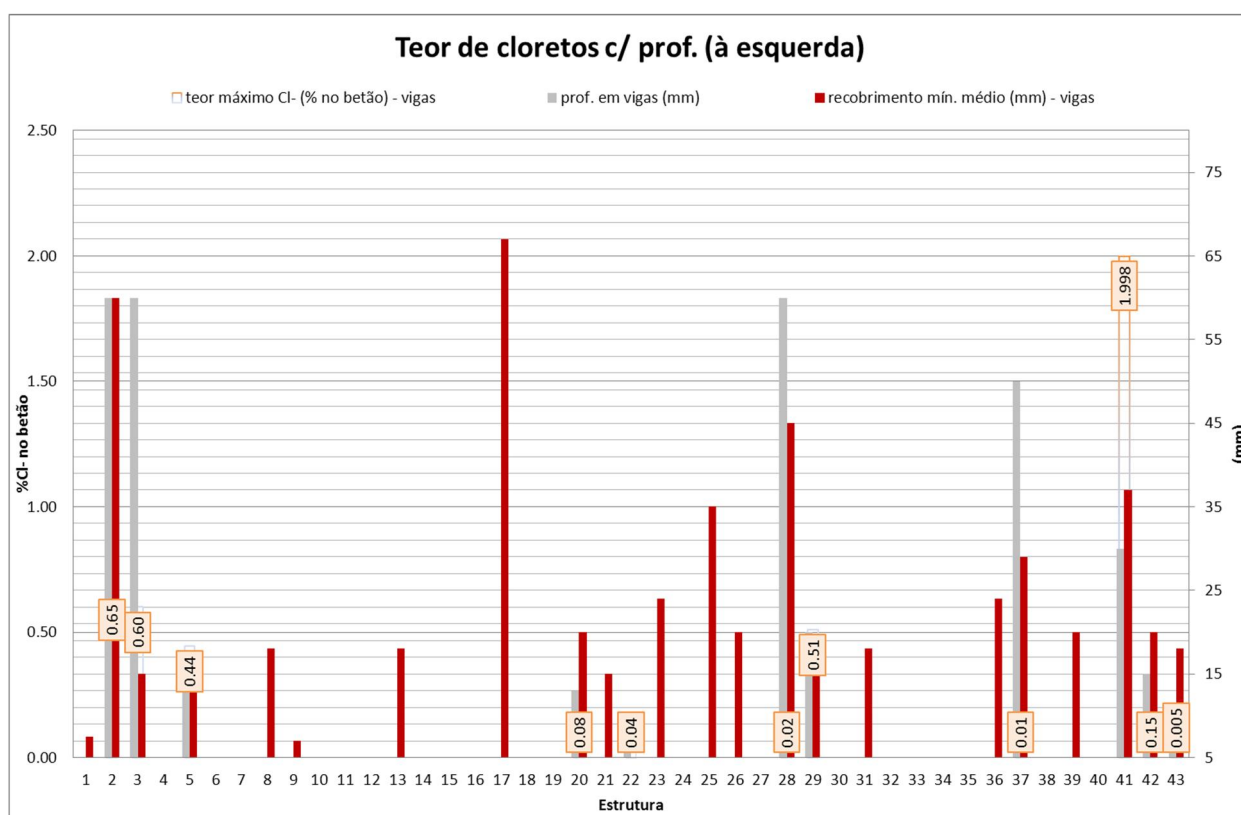


Figura 34: Gráfico do Teor de Cloretos no Betão em Vigas, com Profundidade e o Recobrimento - BD Geral.

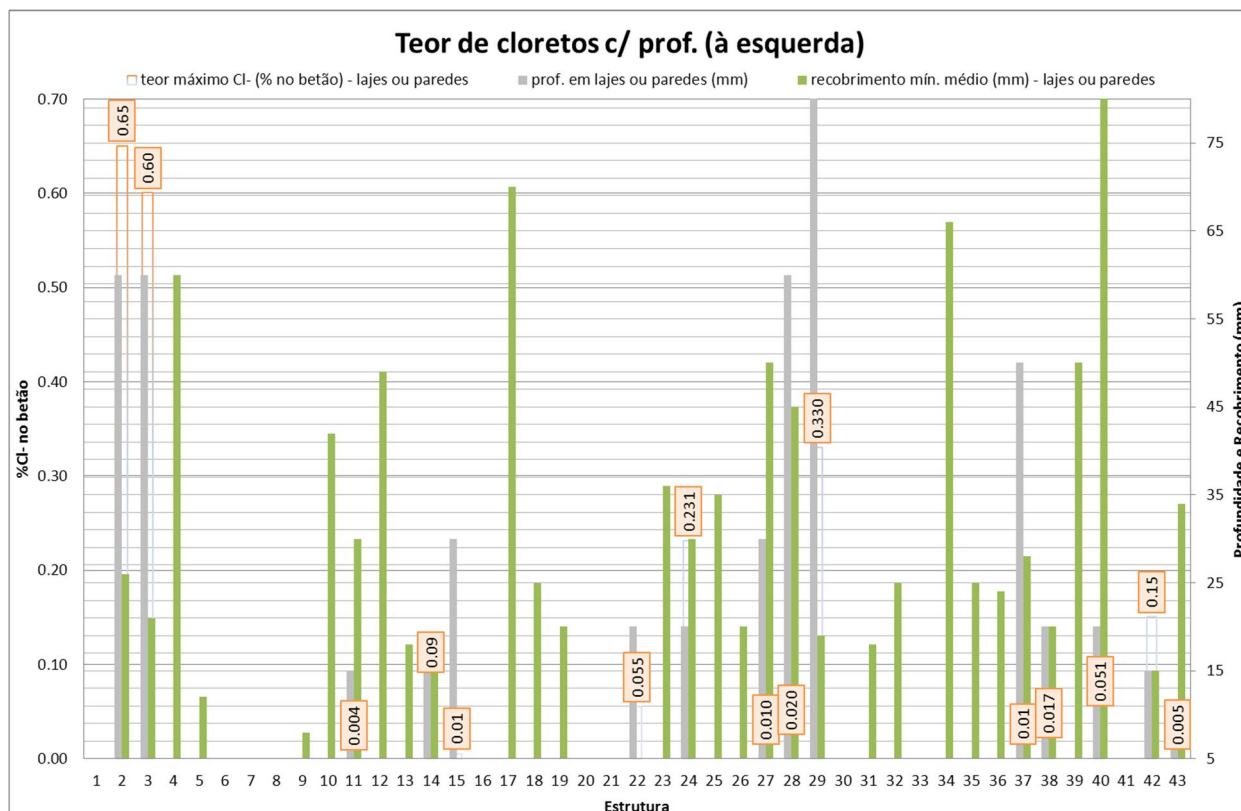


Figura 35: Gráfico do Teor de Cloretos no Betão em Lajes ou Paredes, com Prof. e o Recobrimento - BD Geral.

7.2. BASE DE DADOS PARCIAL PARA CAIS E PONTES-CAIS

A Base de Dados Parcial de Durabilidade e Anomalias de Cais e Pontes-Cais de Betão reúne nesta amostragem 8 Estruturas, todas enquadradas na classe de exposição ambiental XS3, de corrosão induzida por cloretos da água do mar, em ambiente de zona de marés, de rebentação e de salpicos.

Esta BD Parcial reúne Cais e Pontes-Cais localizadas predominantemente em Portugal, com 5 estudos registados, e ainda com 2 casos em Angola e 1 em Moçambique (ver Figura 36).

No que respeita ao ano de construção dos Cais e Pontes-Cais, aqueles em foi possível obter esta informação, foram inspecionadas estruturas datadas desde 1912 a 1978 (ver Figura 37).

Nesta amostragem, estão registados os dados e os resultados de campanhas de inspeção estrutural e ensaios realizados entre 2003 e 2014.

Das que têm construção datada, pode observar-se que são as Pontes-Cais nº 4 e 5 (Estruturas nº 16 e 17), em Moçambique, de 1912, inspecionadas em 2007, com cerca de 95 anos de existência na altura, aquelas em que a inspeção foi realizada num período mais avançado da vida útil.

Por outro lado, a Ponte-Cais nº 8 (Estrutura nº 41), no Funchal, é aquela em que a inspeção registada se realizou com menos tempo decorrido após a sua construção em 1978, sendo inspecionada em 2003, com cerca de 25 anos de funcionamento na altura.

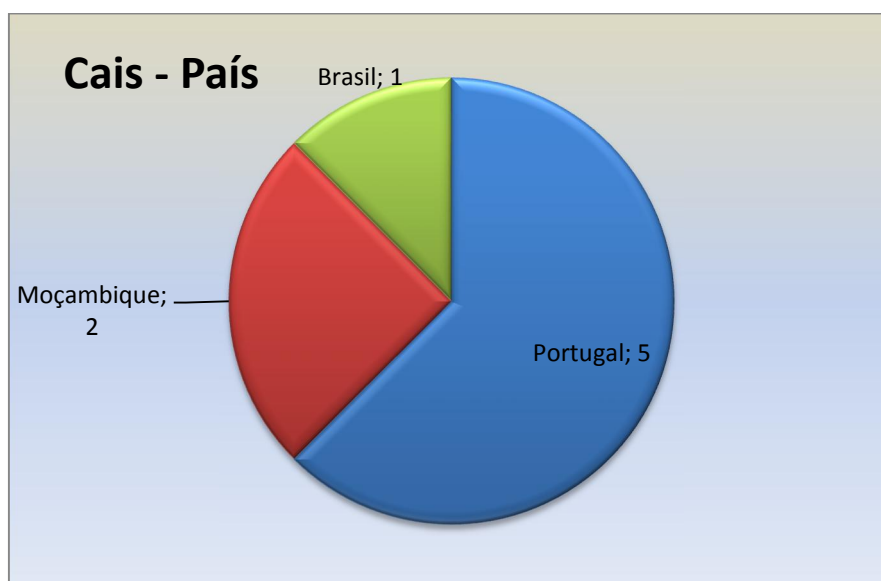


Figura 36: Gráfico dos Países - BD p/ Cais e Pontes-Cais.

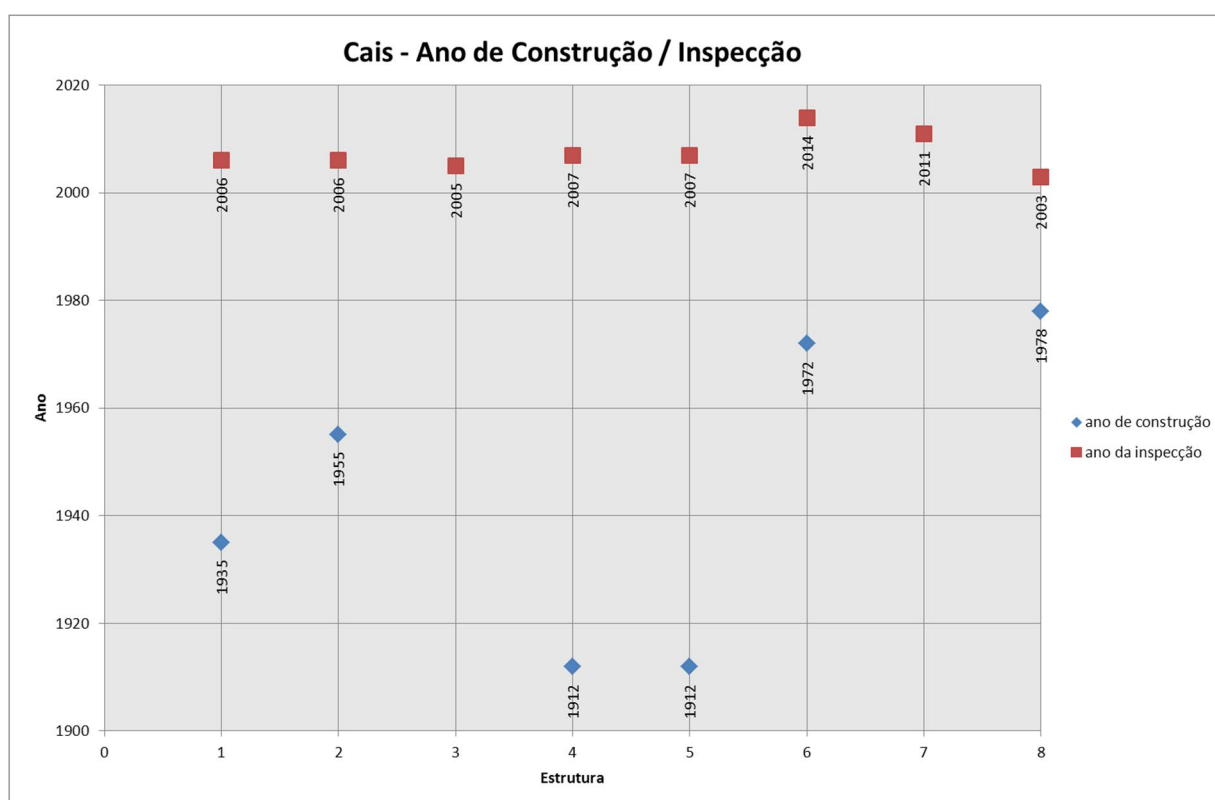


Figura 37: Gráfico do Ano de Construção / Inspeção - BD p/ Cais e Pontes-Cais.

7.2.1. CLASSE DE RESISTÊNCIA DO BETÃO

Na apreciação da globalidade dos registos da classe de resistência do betão, associados aos principais elementos estruturais inspecionados, pilares, vigas e lajes ou paredes, nesta BD Parcial, verifica-se a predominância das classes C30/37 e C40/50 (ver Figura 38).

A mesma apreciação, feita só para as amostras de betão de pilares, e depois também das vigas, dos Cais e Pontes-Cais, revela que a maior parte corresponde à classe C30/37, e ainda com um registo de cada umas das classes C40/50 e C16/20.

Nas lajes e paredes, o betão ensaiado apresenta apenas três exemplos, sendo estes das classes C25/30, C30/37 e C40/50.

O gráfico que apresenta a Idade da Estrutura vs. Resistência do Betão dos Cais e Pontes-Cais, permite visualizar a informação das resistências obtidas para o betão de cada estrutura, em pilares, vigas e lajes ou paredes, associada à indicação da idade da estrutura, quando conhecida (ver Figura 39).

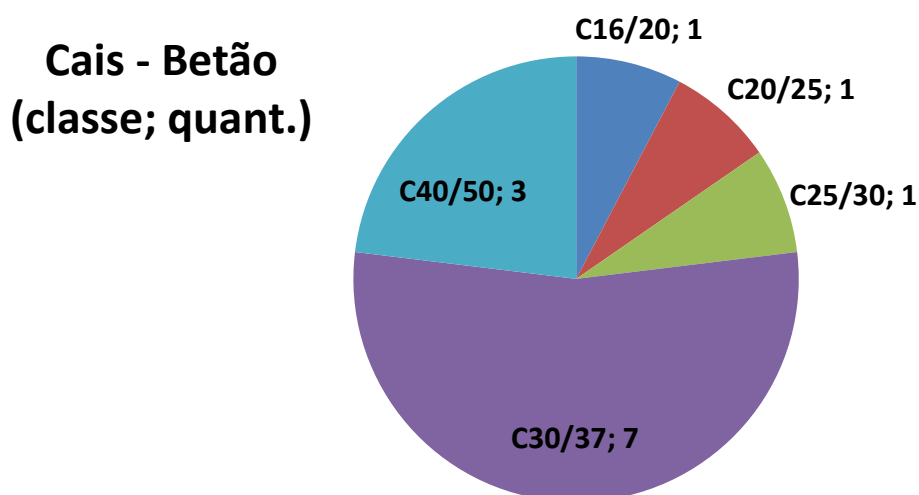


Figura 38: Gráfico Total das Classes de Resistência do Betão - BD p/ Cais e Pontes-Cais.

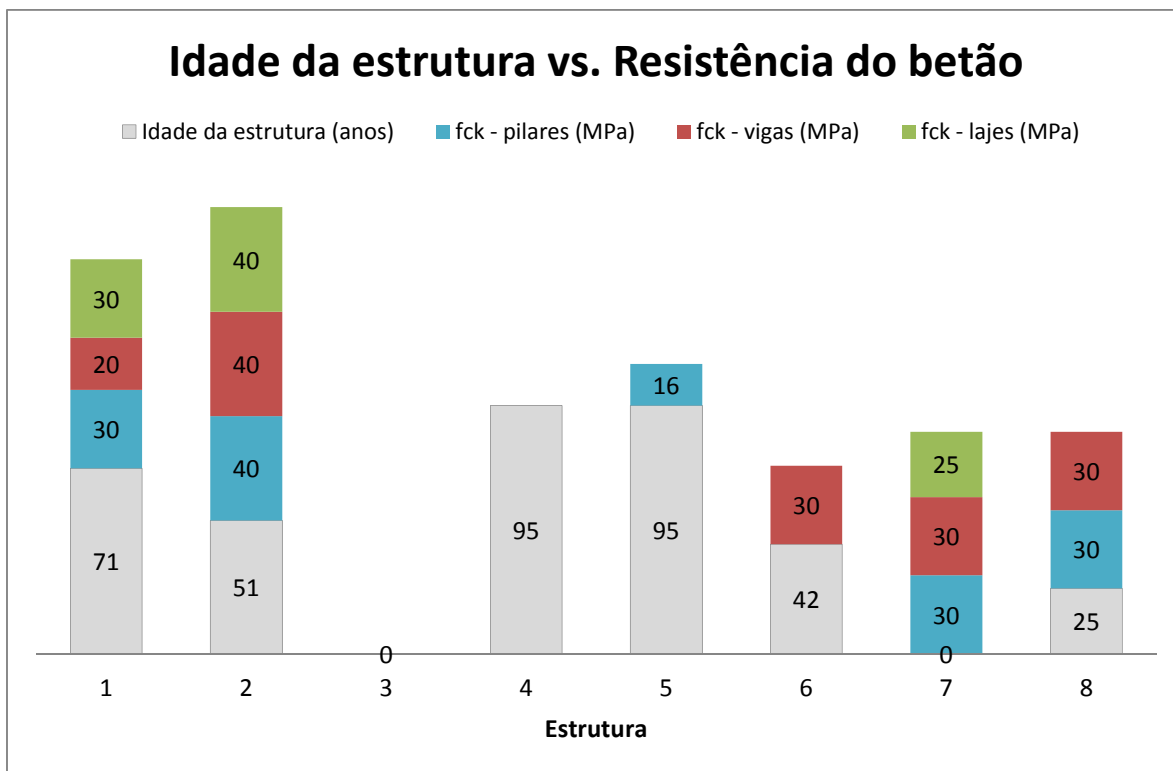


Figura 39: Gráfico da Idade da Estrutura vs. Resistência do Betão - BD p/ Cais e Pontes-Cais.

7.2.2. RESISTIVIDADE ELÉTRICA DO BETÃO

Dos 8 Cais e Pontes-Cais registados nesta Base de Dados Parcial, apenas três têm registo de resultados de ensaios de determinação da resistividade elétrica do betão (ver Figura 40), nomeadamente: a Ponte-Cais nº 5 (Estrutura nº 17), em Moçambique, e o Cais nº 3, (Estrutura nº 6), em Portugal, com os valores médios mais elevados de 31 e de 24.8 kΩcm, respetivamente, indicando um baixo índice de corrosão possível; e a Ponte-Cais nº 8 (Estrutura nº 41), no Funchal, com 16 kΩcm, indicador de um médio índice de corrosão possível.

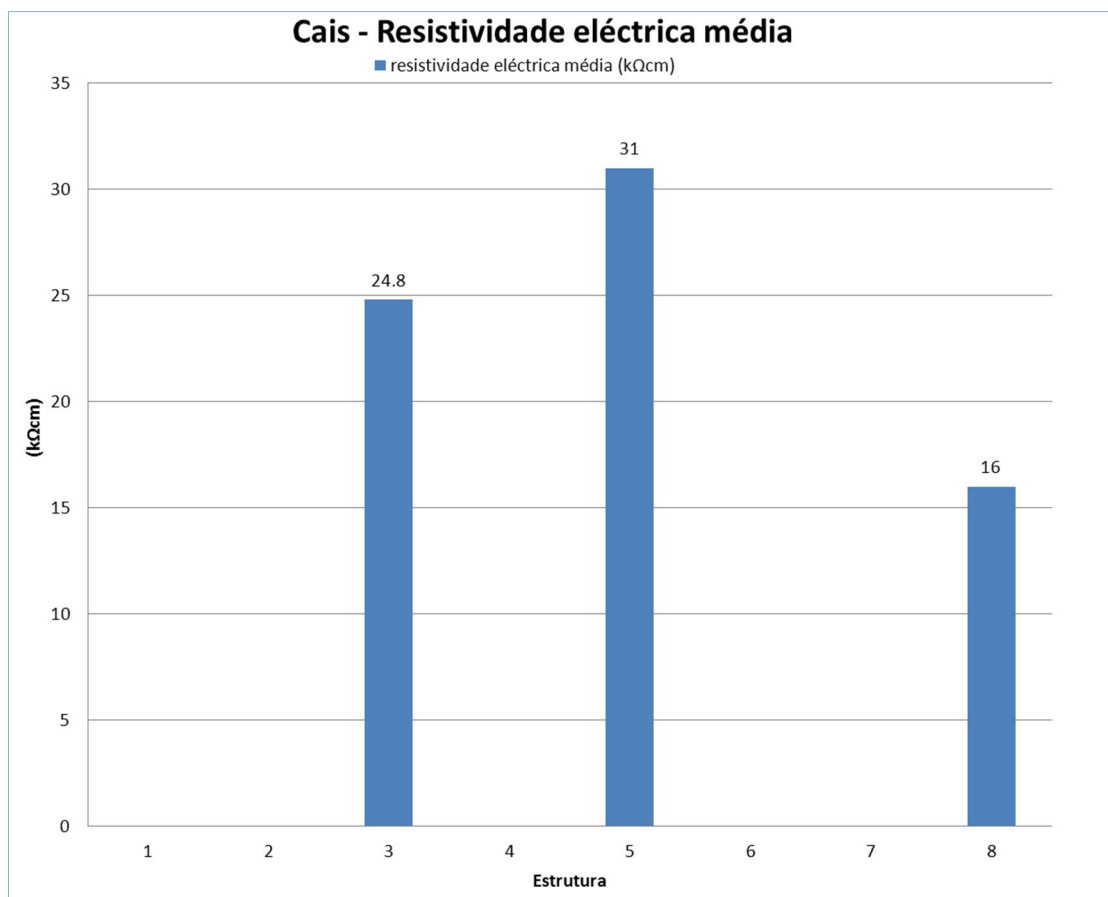


Figura 40: Gráfico da Resistividade Elétrica do Betão - BD p/ Cais e Pontes-Cais.

7.2.3. RECOBRIMENTOS E PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO NO BETÃO

Na BD Parcial para Cais e Pontes-Cais, apenas o Cais nº 6 (Estrutura nº 28), no Brasil, regista profundidades médias de carbonatação não nulas, da ordem dos 10 mm, em vigas e lajes.

Esta profundidade é inferior à espessura média dos recobrimentos mínimos medidos, de cerca de 45 mm, pelo que a frente de carbonatação não atinge o nível das armaduras no betão.

7.2.4. TEOR DE CLORETOS NO BETÃO E RECOBRIMENTOS

Relativamente à análise do conjunto dos valores máximos não nulos do teor de cloretos no betão, em “% no betão”, registados para cada um dos principais elementos estruturais (pilares, vigas, lajes ou paredes) das estruturas dos Cais e Pontes-Cais, verificam-se os valores máximos na Ponte-Cais nº 8.

A observação dos resultados obtidos nesta amostragem revela que, excetuando o Cais nº 6 (Estrutura nº 28), no Brasil, todos os restantes valores máximos de teor de cloretos no betão registados são considerados relativamente elevados.

Apreciando conjuntamente os valores máximos do teor de cloretos no betão, respetiva profundidade de ocorrência e a espessura média do recobrimento mínimo, para cada um dos principais elementos estruturais (pilares, vigas, lajes ou paredes) dos Cais e Pontes-Cais, pode referir-se o seguinte (ver Figuras 41, 42 e 43):

- Na análise dos pilares, nas Pontes-Cais nº 1 e nº 2 (Estruturas nº 2 e 3) e no Cais nº 7 (Estrutura nº 29), em Portugal, registam-se valores elevados de teor de cloretos que ocorrem a uma profundidade que ultrapassa o nível das armaduras;
- Quanto às vigas e lajes, o mesmo fenómeno ocorre nas mesmas estruturas referidas para os pilares.

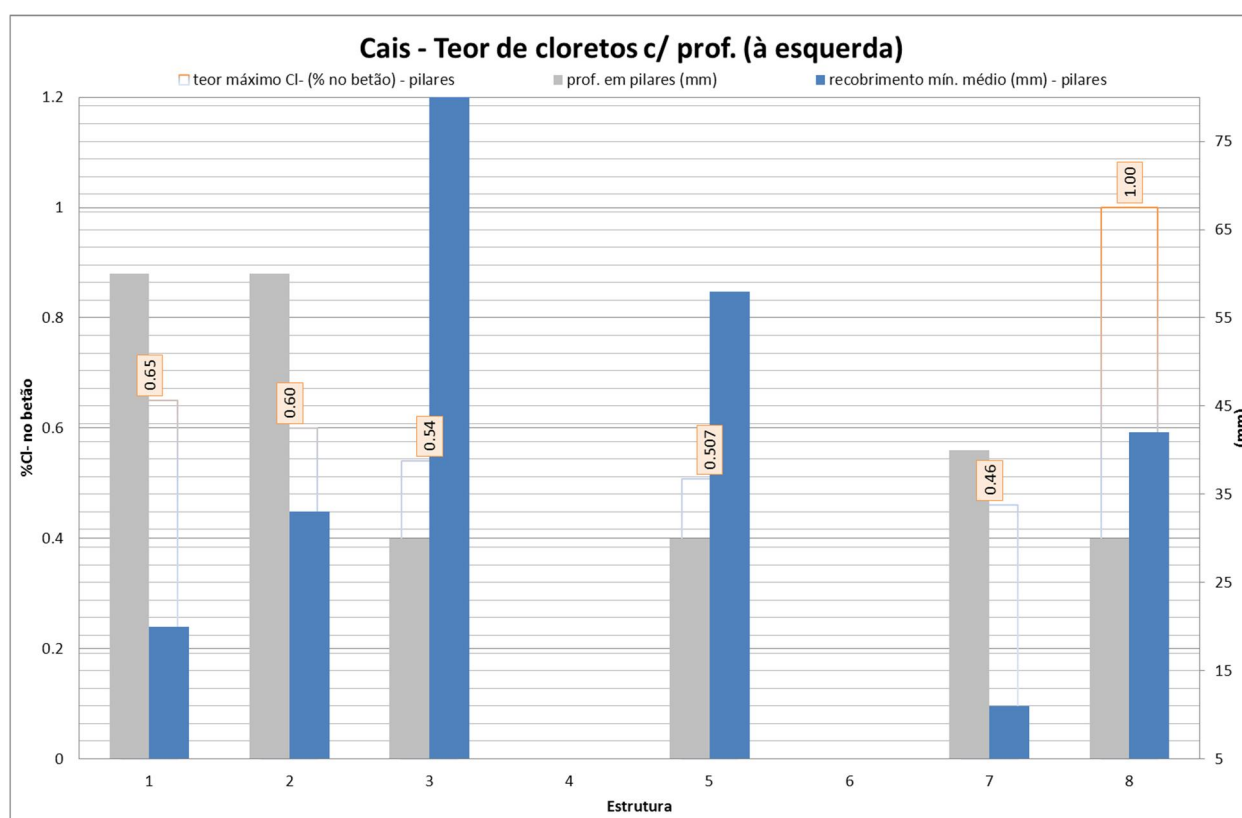


Figura 41: Gráfico do Teor de Cloretos no Betão em Pilares, com Profundidade e Recobrimento - BD p/ Cais e Pontes-Cais.

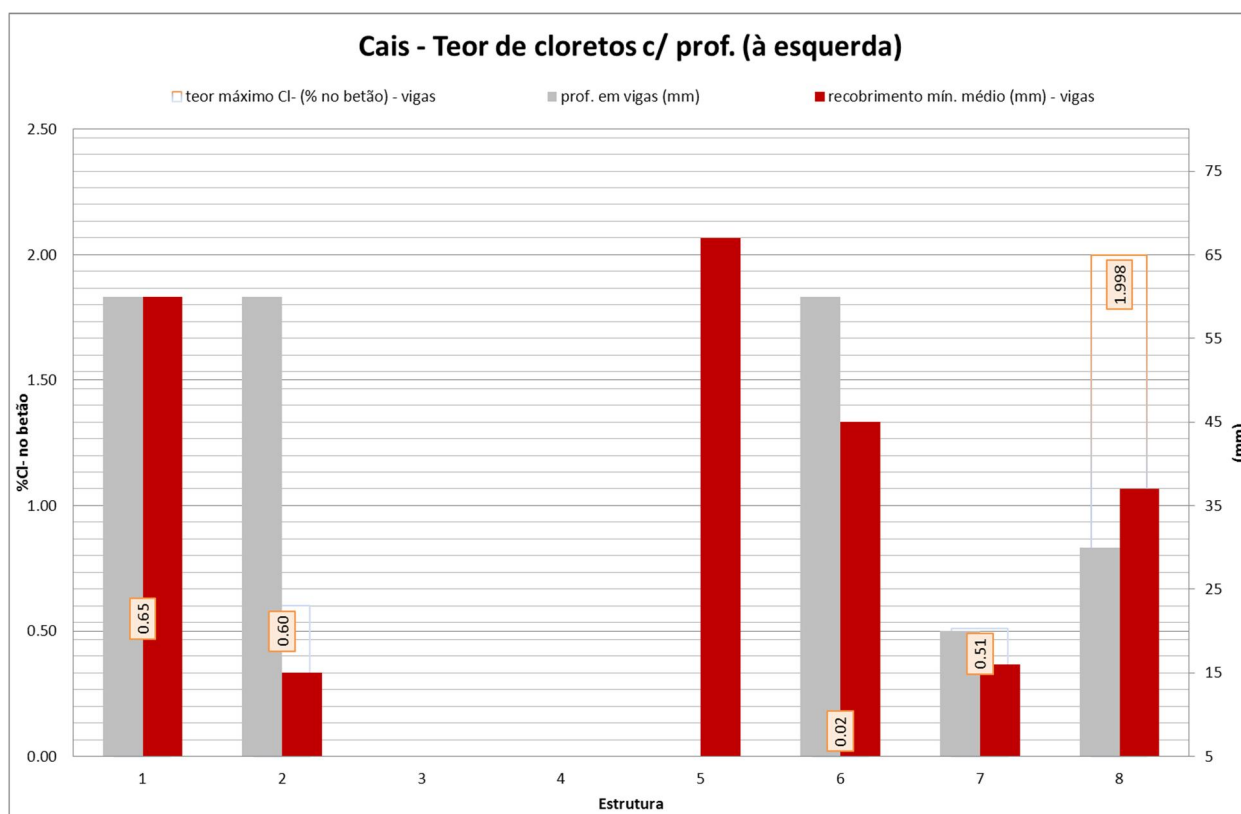


Figura 42: Gráfico do Teor de Cloretos no Betão em Vigas, com Prof. e Recobr. - BD p/ Cais e Pontes-Cais.

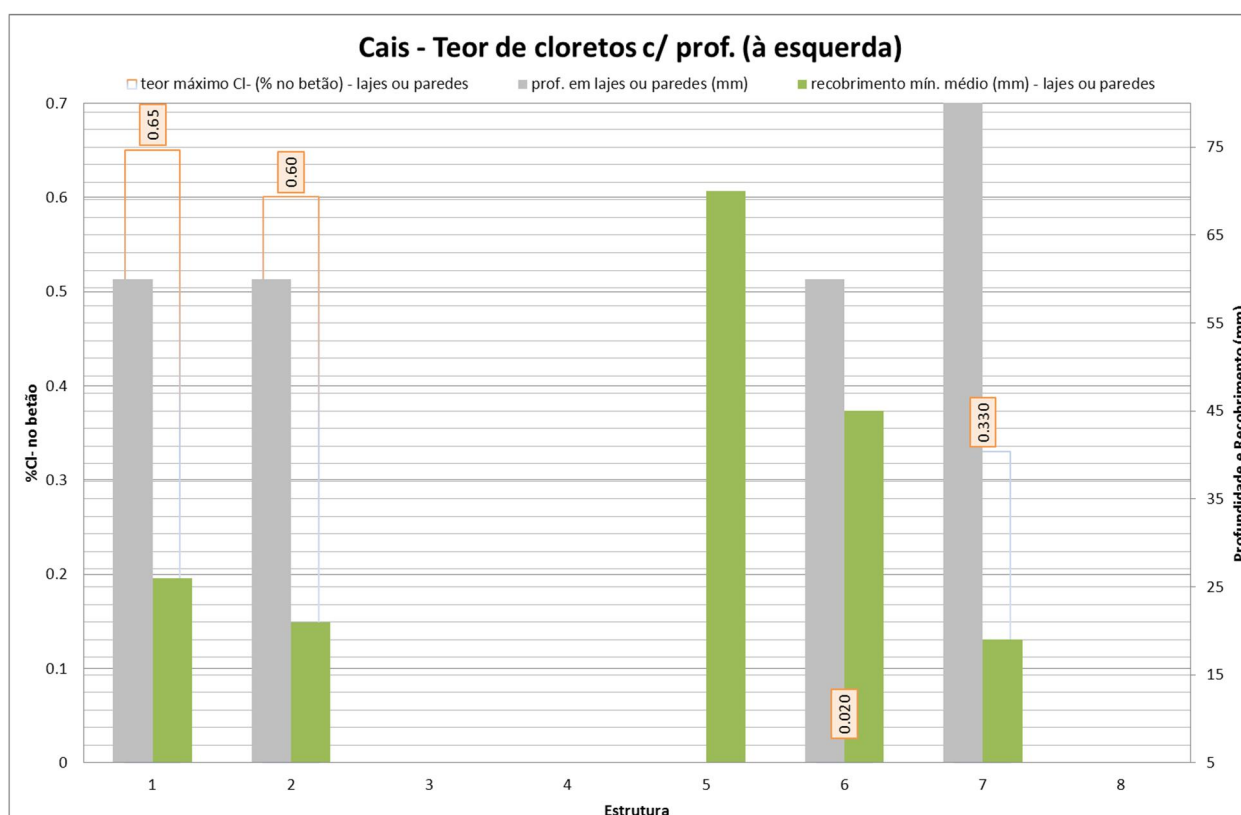


Figura 43: Gráfico do Teor de Cloretos no Betão em Lajes ou Paredes, com Prof. e Recobr. - BD p/ Cais e Pontes-Cais.

7.3. BASE DE DADOS PARCIAL PARA EDIFÍCIOS

A Base de Dados Parcial de Durabilidade e Anomalias de Edifícios de Betão reúne uma amostra de 14 Estruturas registadas.

Todos os Edifícios apresentados se enquadram na classe de exposição ambiental XC1, de corrosão induzida por carbonatação, em ambiente seco ou permanentemente húmido, com a exceção do Edifício nº 7 (Estrutura nº 24), em Angola, que se localiza em classe de exposição XS1, de corrosão induzida por cloretos da água do mar transportados por via aérea.

Os Edifícios referidos nesta BD Parcial estão localizados predominantemente em Portugal, com 11 exemplos registados, e com 3 casos em Angola.

Relativamente ao ano de construção dos Edifícios, apenas foi possível obter esta informação para metade da amostragem, sendo inspecionadas estruturas datadas desde 1930 a 2009 (ver Figura 44).

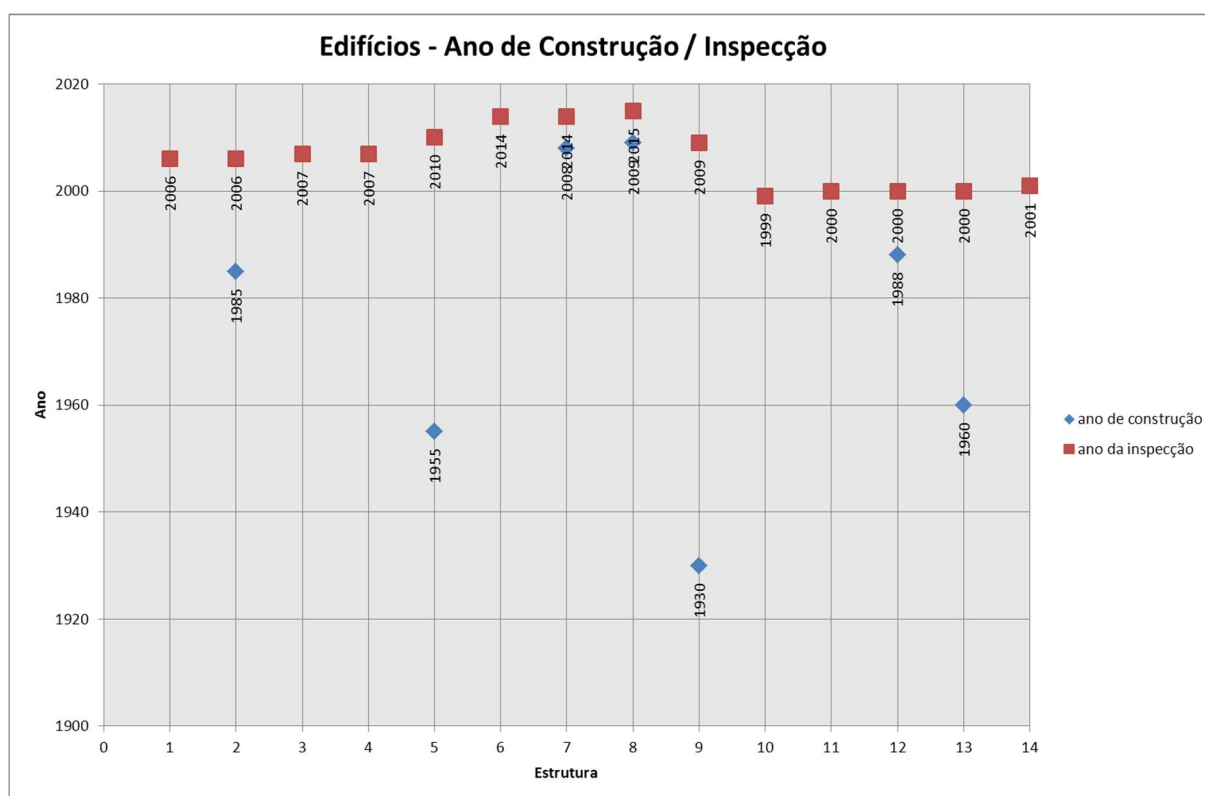


Figura 44: Gráfico do Ano de Construção / Inspeção - BD p/ Edifícios.

Encontram-se registados nesta BD Parcial os dados e os resultados de campanhas de inspeção estrutural e ensaios realizados entre 1999 e 2015.

Dos que têm construção datada, verifica-se que é o Edifício nº 9 (Estrutura nº 26), de 1930, inspecionado em 2009, com cerca de 79 anos de existência na altura, aquele em que a inspeção foi realizada num período mais avançado da vida útil.

Por seu lado, os Edifícios nº 7 e nº 8 (Estruturas nº 24 e nº 25), são aqueles em que a inspeção registada se realizou com menos tempo decorrido após a sua construção em 2008 e 2009, respetivamente, sendo inspecionados depois em 2014 e 2015, com cerca de 6 anos de utilização na altura.

7.3.1. CLASSE DE RESISTÊNCIA DO BETÃO

Na análise global dos registos da classe de resistência do betão, dos principais elementos estruturais inspecionados, pilares, vigas e lajes ou paredes, nesta BD Parcial para Edifícios, verifica-se a maior frequência das classes C20/25 e C25/30 (ver Figura 45).

Feita a mesma análise só para as amostras de betão de pilares, observa-se que uma grande parte corresponde à classe C25/30 (ver Figura 46).

Nas vigas, estão igualmente representadas as classes C12/15, C20/25 e C25/30 (ver Figura 47).

Nas lajes e paredes, o betão ensaiado com mais registos é da classe C20/25 (ver Figura 48).

O gráfico que apresenta a Idade da Estrutura vs. Resistência do Betão, permite visualizar a informação das resistências obtidas para o betão de cada edifício, em pilares, vigas e lajes ou paredes, associada à indicação da sua idade, quando conhecida (ver Figura 49).

Edifícios - Betão (classe; quant.)

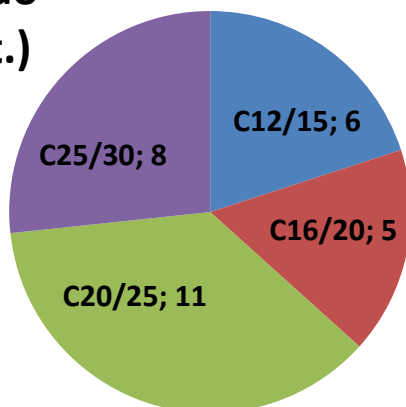


Figura 45: Gráfico Total das Classes de Resistência do Betão - BD p/ Edifícios.

**Edifícios - Betão em pilares
(classe; quant.)**

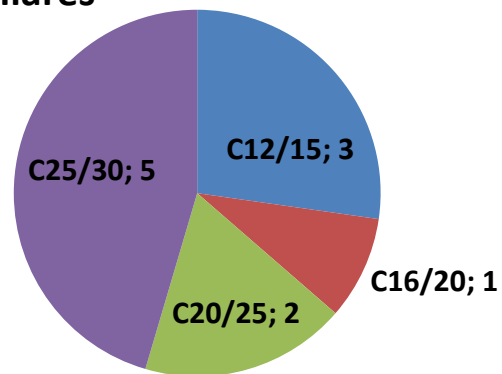


Figura 46: Gráfico das Classes de Resistência do Betão em Pilares - BD p/ Edifícios.

**Edifícios - Betão em vigas
(classe; quant.)**

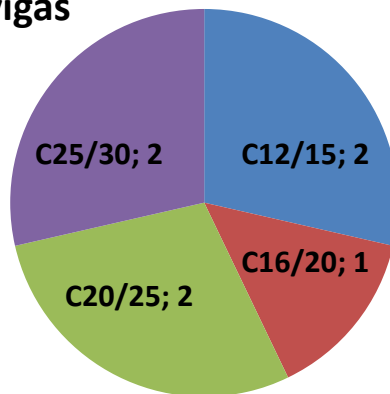


Figura 47: Gráfico das Classes de Resistência do Betão em Vigas - BD p/ Edifícios.

**Edifícios - Betão em lajes
ou paredes
(classe; quant.)**

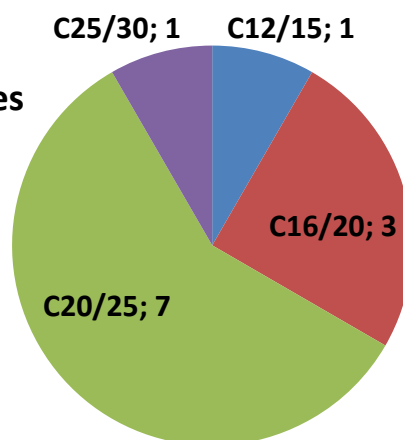


Figura 48: Gráfico das Classes de Resistência do Betão em Lajes ou Paredes - BD p/ Edifícios.

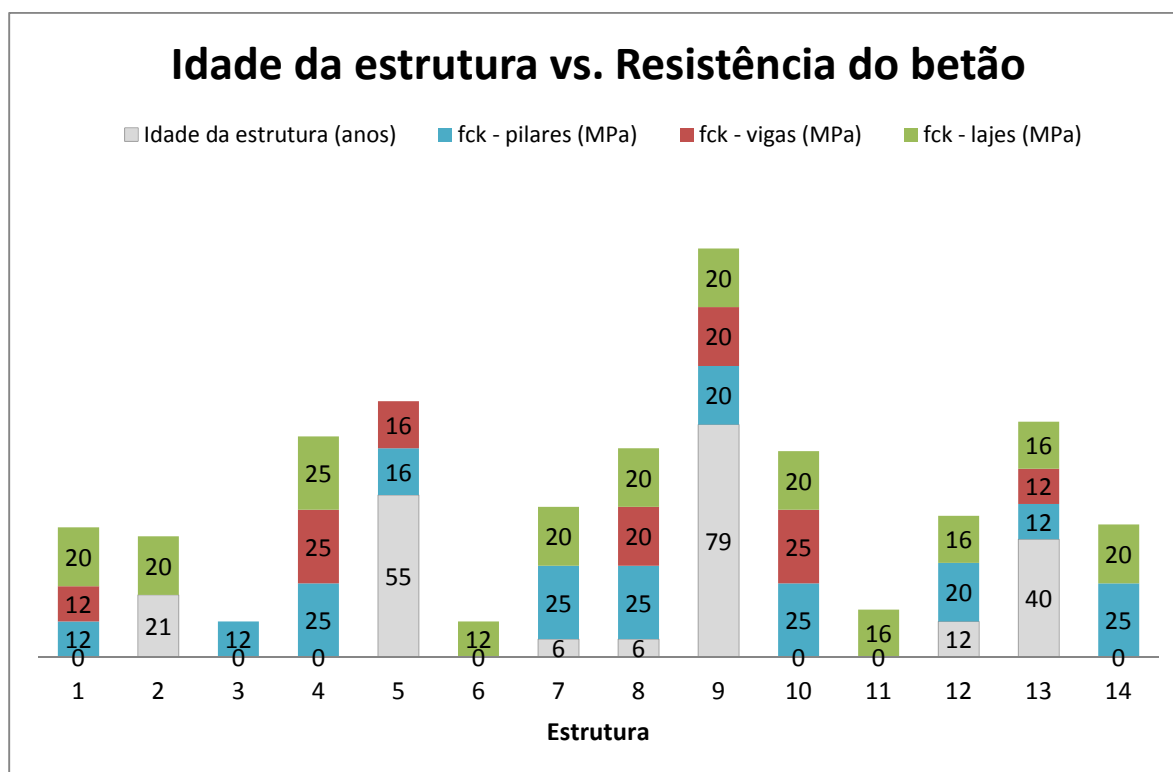


Figura 49: Gráfico da Idade da Estrutura vs. Resistência do Betão - BD p/ Edifícios.

7.3.2. RECOBRIMENTOS E PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO NO BETÃO

Relativamente ao conjunto total dos valores médios, não nulos, da profundidade de carbonatação no betão, em mm, registados para cada um dos principais elementos estruturais (pilares, vigas, lajes ou paredes) dos Edifícios, verificam-se as profundidades máximas de carbonatação no Edifício nº 9 (Estrutura nº 26), nº 5 (Estrutura nº 21) e nº 1 (Estrutura nº 9), todos em Portugal.

Nos pilares, nas vigas e nas lajes e paredes, a profundidade média de carbonatação excede a espessura média do recobrimento mínimo nos Edifícios nº 1 e nº 9, representando risco de desenvolvimento de corrosão do aço das armaduras (ver Figura 50).

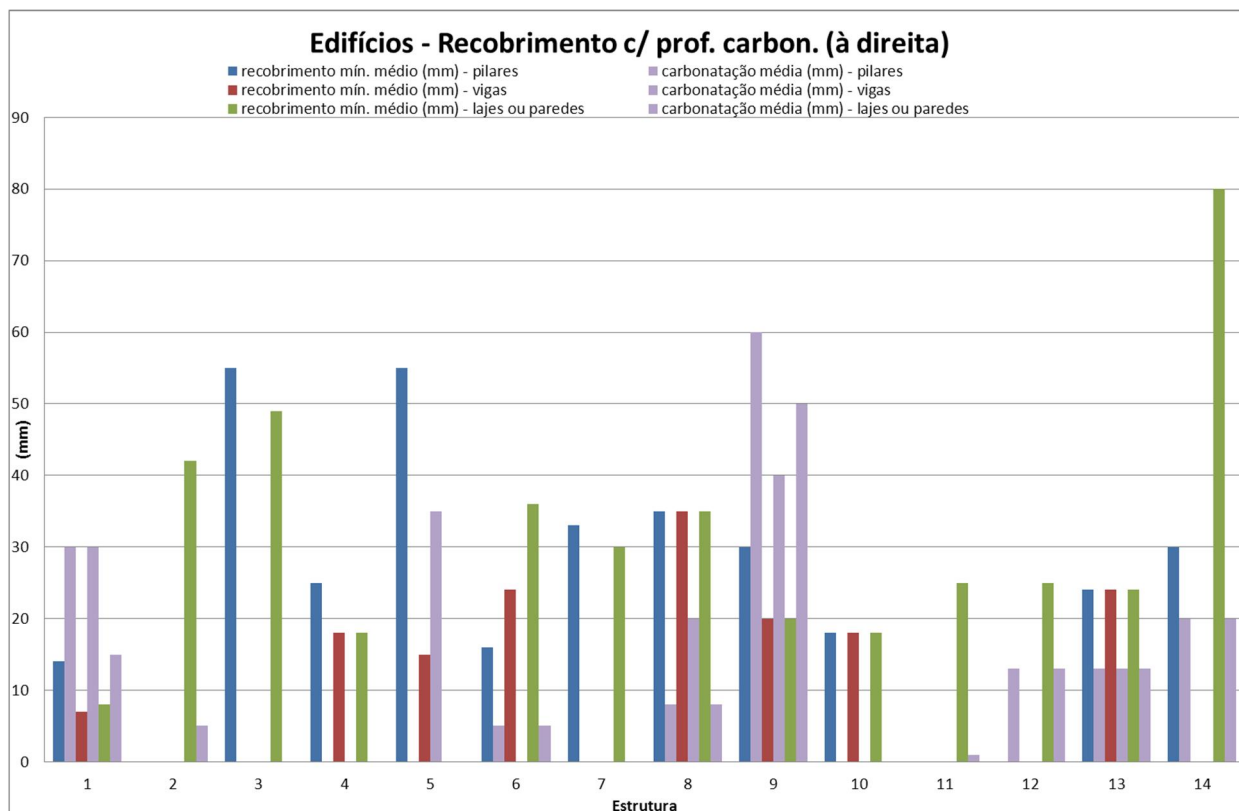


Figura 50: Gráfico da Profundidade de Carbonatação no Betão e Recobrimento - BD p/ Edifícios.

7.3.3. TEOR DE CLORETOS NO BETÃO E RECOBRIMENTOS

A apreciação do conjunto dos valores máximos, não nulos, do teor de cloretos no betão, em “% no betão”, registados para cada um dos principais elementos estruturais (pilares, vigas, lajes ou paredes), permite verificar que apenas foram registados valores no Edifício nº 7 (Estrutura nº 24), com 0.23% em lajes, em classe de exposição XS1, e no Edifício nº 14 (Estrutura nº 40), com cerca de 0.05% em pilares e lajes, numa Indústria.

Os referidos valores são relativamente elevados e, apreciando conjuntamente os valores máximos do teor de cloretos no betão, respetiva profundidade de ocorrência e a espessura média do recobrimento mínimo, conclui-se que os teores elevados ocorrem a profundidades inferiores à espessura de recobrimento.

7.4. BASE DE DADOS PARCIAL PARA PONTES

A Base de Dados Parcial de Durabilidade e Anomalias de Pontes de Betão contém uma amostragem de 8 Estruturas.

Estas encontram-se enquadradas, na sua maior parte, na classe de exposição ambiental XC4, de corrosão induzida por carbonatação, em ambiente ciclicamente húmido e seco, e também nas classes XS1 e XS3, de corrosão induzida por cloretos da água do mar, respetivamente, em ambiente

de exposição ao ar transportando sais marinhos e em ambiente de zona de marés, de rebentação e de salpicos (ver Figura 51).

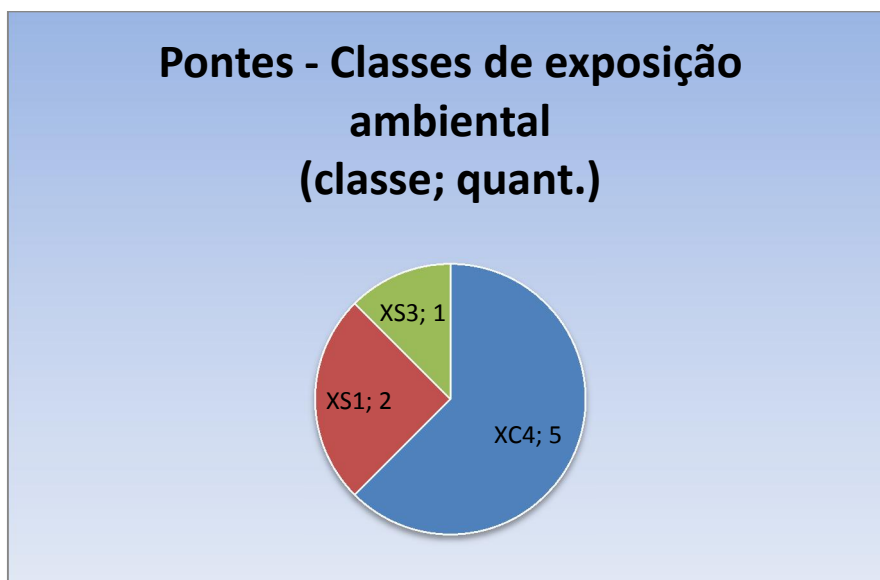


Figura 51: Gráfico das Classes de Exposição Ambiental - BD p/ Pontes.

Esta BD Parcial reúne Pontes localizadas predominantemente em Portugal, com 4 estruturas registadas, e ainda com 2 casos em Angola e 2 em Moçambique (ver Figura 52).

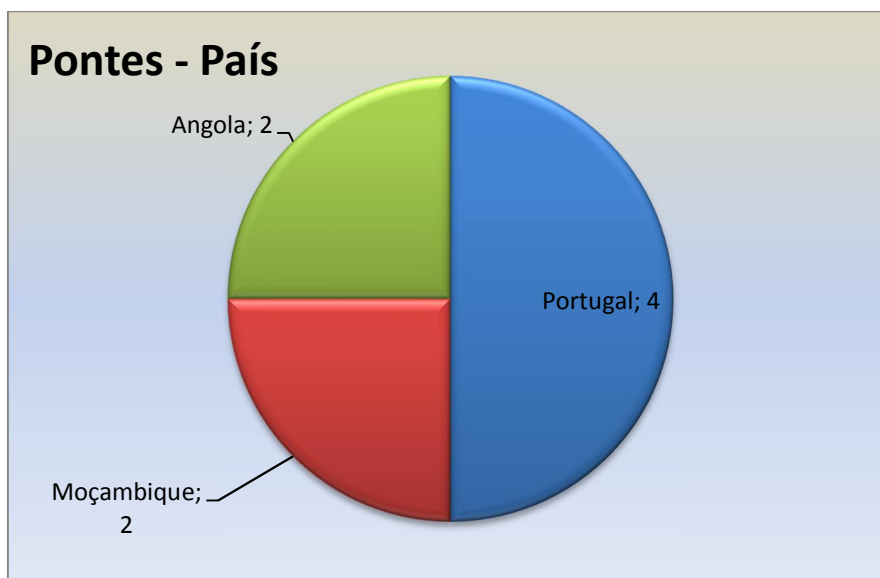


Figura 52: Gráfico dos Países - BD p/ Pontes.

No que respeita ao ano de construção das Pontes, são apenas duas aquelas em foi possível obter esta informação:

- A Ponte Nº 2 (Estrutura nº 11), foi construída em 1976 e inspecionada em 2006, em Portugal;
- A Ponte nº 6 (Estrutura nº 27), foi construída em 1972 e inspecionada em 2009, em Moçambique.

Nesta amostragem, estão registados os dados e os resultados de campanhas de inspeção estrutural e ensaios realizados entre 2001 e 2011.

7.4.1. CLASSE DE RESISTÊNCIA DO BETÃO

Na apreciação global dos registos da classe de resistência do betão, dos principais elementos estruturais inspecionados, pilares, vigas e lajes ou paredes, nesta BD Parcial, verifica-se a maior frequência das classes C25/30 e C30/37 (ver Figura 53).

Na mesma análise só para as amostras de betão de pilares, obteve-se apenas duas classes registadas: betões C25/30 e C20/25.

Nas vigas, estão representadas as classes C30/37 e ainda C12/15 e C25/30.

Nas lajes e paredes, obteve-se também apenas duas classes registadas: betões C55/67 e C35/45.

Pontes - Betão (classe; quant.)

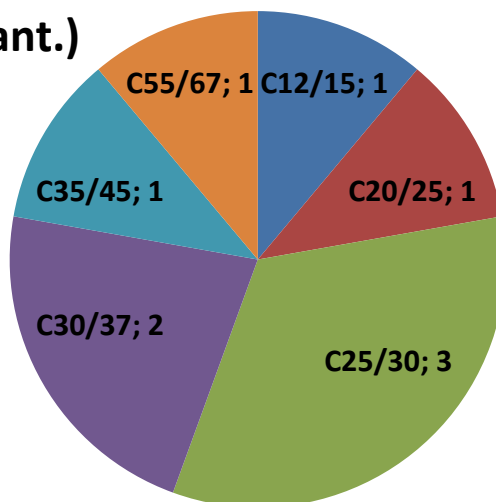


Figura 53: Gráfico Total das Classes de Resistência do Betão - BD p/ Pontes.

7.4.2. RESISTIVIDADE ELÉTRICA DO BETÃO

Das 8 Pontes registadas nesta Base de Dados Parcial, apenas uma tem registo de resultados de ensaios de determinação da resistividade elétrica do betão, nomeadamente: a Ponte nº 2 (Estrutura nº 11), em Portugal, com uma média de 11.1 kΩcm, indicador de um médio índice de corrosão possível.

7.4.3. RECOBRIMENTOS E PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO NO BETÃO

O conjunto total dos valores médios, não nulos, da profundidade de carbonatação no betão, em mm, registados para cada um dos principais elementos estruturais (pilares, vigas, lajes ou paredes), revela profundidades de carbonatação de 7.7 mm nas lajes da Ponte nº 3 (Estrutura nº 19), de 28 mm nas vigas da Ponte nº 4 (Estrutura nº 20) e de 22 mm nos pilares e laje da Ponte nº 6 (Estrutura nº 27).

Apenas no caso da Ponte nº 4, se verifica que a profundidade média de carbonatação detetada nas vigas é superior à espessura média do recobrimento mínimo das armaduras, indiciando risco de desenvolvimento de corrosão (ver Figura 54).

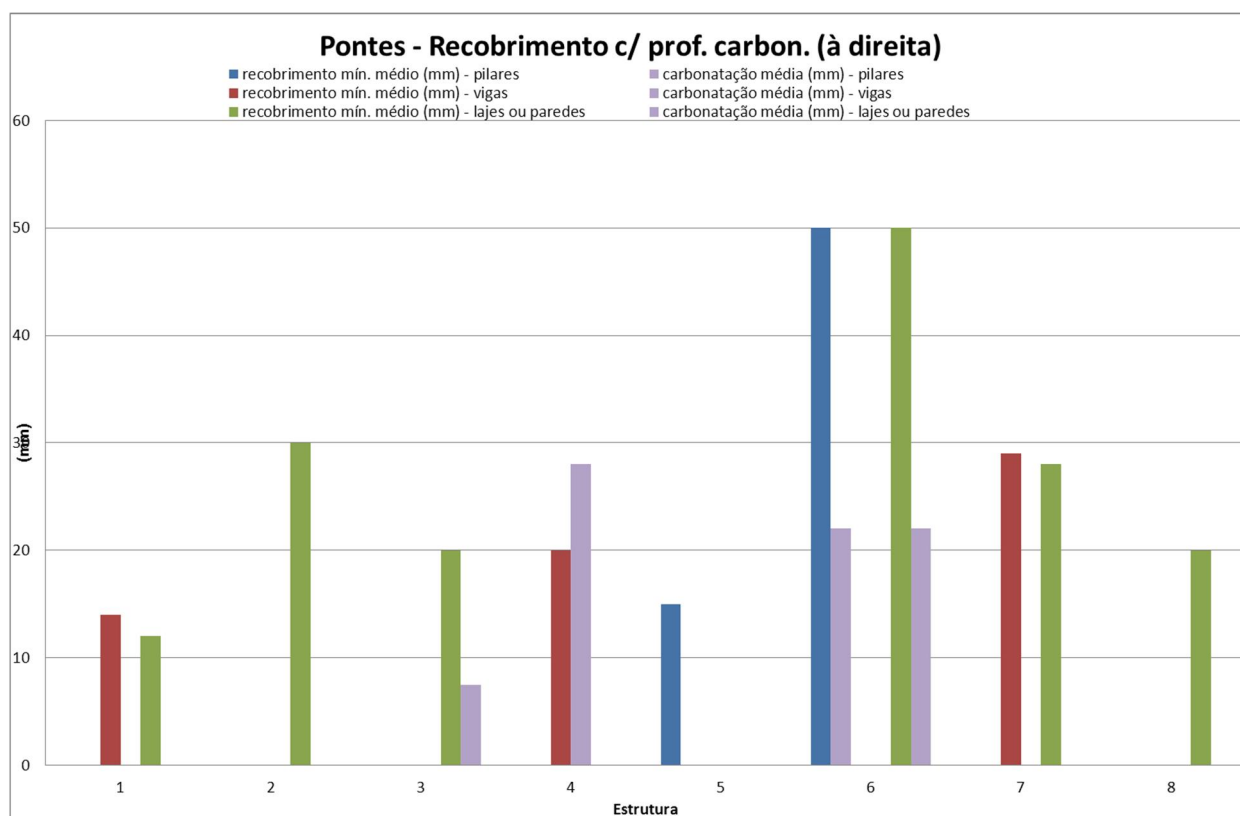


Figura 54: Gráfico da Profundidade de Carbonatação no Betão e Recobrimento - BD p/ Pontes.

7.4.4. TEOR DE CLORETOS NO BETÃO E RECOBRIMENTOS

Na análise do conjunto dos valores máximos, não nulos, do teor de cloretos no betão, em “% no betão”, registados para cada um dos principais elementos estruturais (pilares, vigas, lajes ou paredes) das Pontes, é possível observar que se destaca a Ponte nº 1 (Estrutura nº 5), em classe de exposição XS1, com valores bastante elevados de 0.44% de Cl⁻, a uma profundidade que excede o recobrimento das armaduras (ver Figura 55).

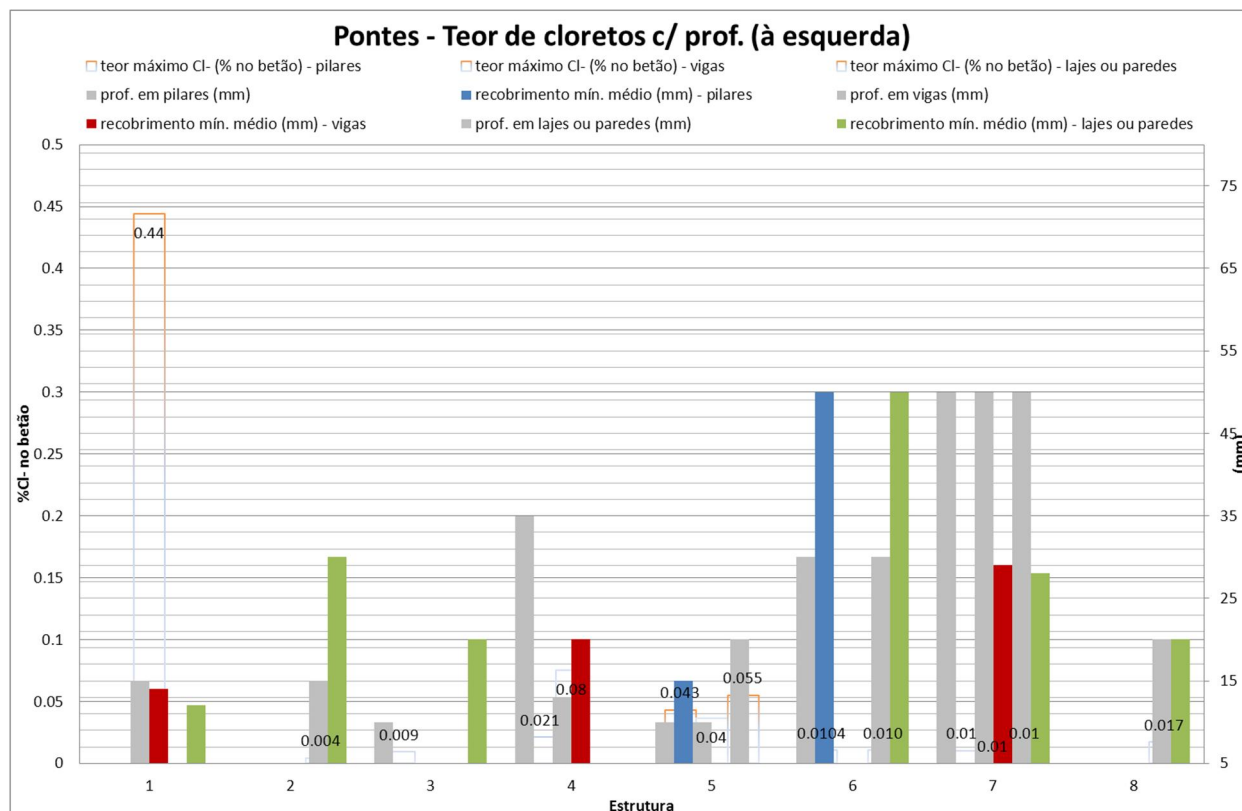


Figura 55: Gráfico do Teor de Cloretos no Betão, com Profundidade e o Recobrimento - BD p/ Pontes.

7.5. BASE DE DADOS PARCIAL PARA RESERVATÓRIOS

A Base de Dados Parcial de Durabilidade e Anomalias de Reservatórios de Betão apresenta um conjunto de 6 Estruturas.

Metade dos Reservatórios registados está enquadrada na classe de exposição ambiental XC4, de corrosão induzida por carbonatação, em ambiente ciclicamente húmido e seco (ver Figura 56).

Os restantes localizam-se em classe de exposição XC2, de corrosão induzida por carbonatação, em ambiente húmido, raramente seco, e em classe de exposição XS1, de corrosão induzida por cloretos da água do mar transportados por via aérea.

Os Reservatórios registados nesta BD Parcial estão localizados todos em Portugal.

Relativamente ao ano de construção, apenas foi possível obter esta informação para dois reservatórios:

- O Reservatório nº 1 (Estrutura nº 1), foi construído em 1964 e inspecionado em 2007;
- O Reservatório nº 4 (Estrutura nº 34), foi construído em 1931 e inspecionado em 1999.

Encontram-se registados os dados e os resultados de campanhas de inspeção estrutural e ensaios realizados entre 1999 e 2011.

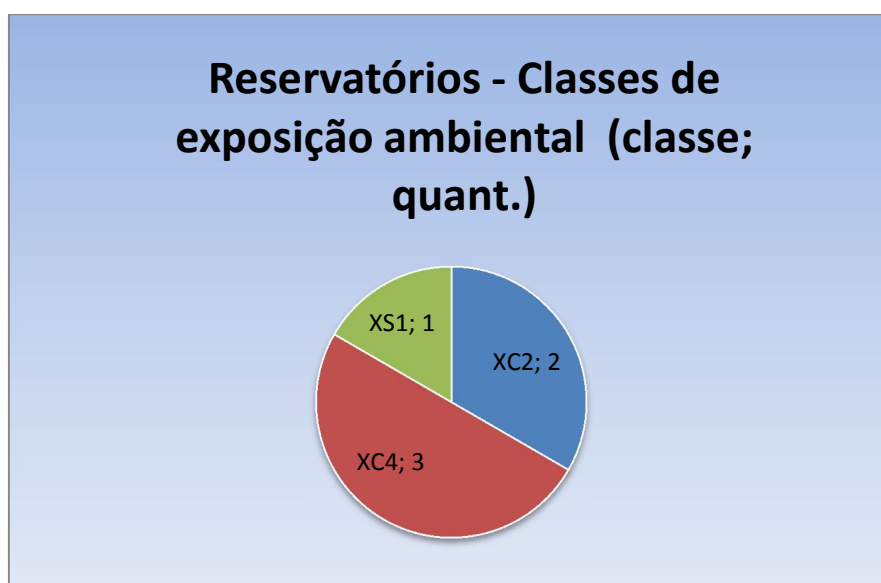


Figura 56: Gráfico das Classes de Exposição Ambiental - BD p/ Reservatórios.

7.5.1. CLASSE DE RESISTÊNCIA DO BETÃO

Analisando todos os registos da classe de resistência do betão, dos principais elementos estruturais inspecionados, pilares, vigas e lajes ou paredes, nesta BD Parcial, verifica-se uma distribuição diversa pelas classes, com registos desde a classe C16/20 à classe C50/60 (ver Figura 57).

Relativamente às amostras de betão de pilares, observa-se uma distribuição de resultados obtidos por 5 classes de resistência, também desde C16/20, com 2 registos, a C50/60, com 1 registo (ver Figura 58).

Os três registos relativos a vigas dos Reservatórios pertencem às classes C20/25, C35/45 e C45/55.

Nas lajes e paredes, apenas se obteve uma classe registada: betão C25/30.

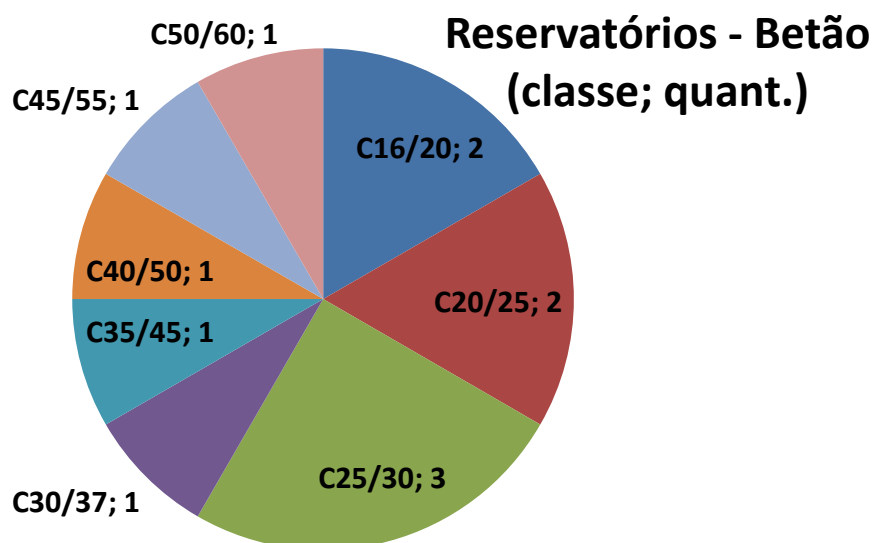


Figura 57: Gráfico Total das Classes de Resistência do Betão - BD p/ Reservatórios.

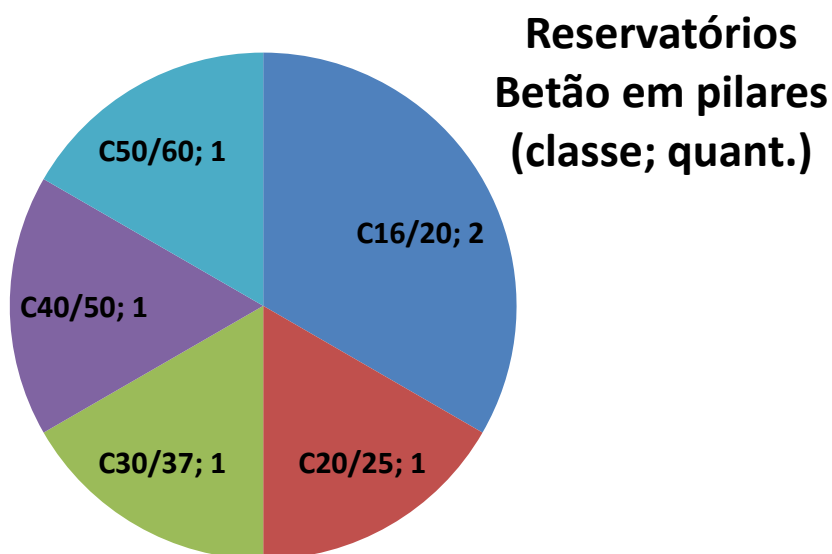


Figura 58: Gráfico das Classes de Resistência do Betão em Pilares - BD p/ Reservatórios.

7.5.2. RESISTIVIDADE ELÉTRICA DO BETÃO

Dos 6 Reservatórios, apenas três têm registo de resultados de ensaios de determinação da resistividade elétrica do betão (ver Figura 59), nomeadamente: o Reservatório nº 1 (Estrutura nº 1), com um valor médio de 11 kΩcm; o Reservatório nº 5 (Estrutura nº 42), com um valor mais baixo de 9 kΩcm; e o Reservatório nº 6 (Estrutura nº 43), com um valor elevado de 30 kΩcm.

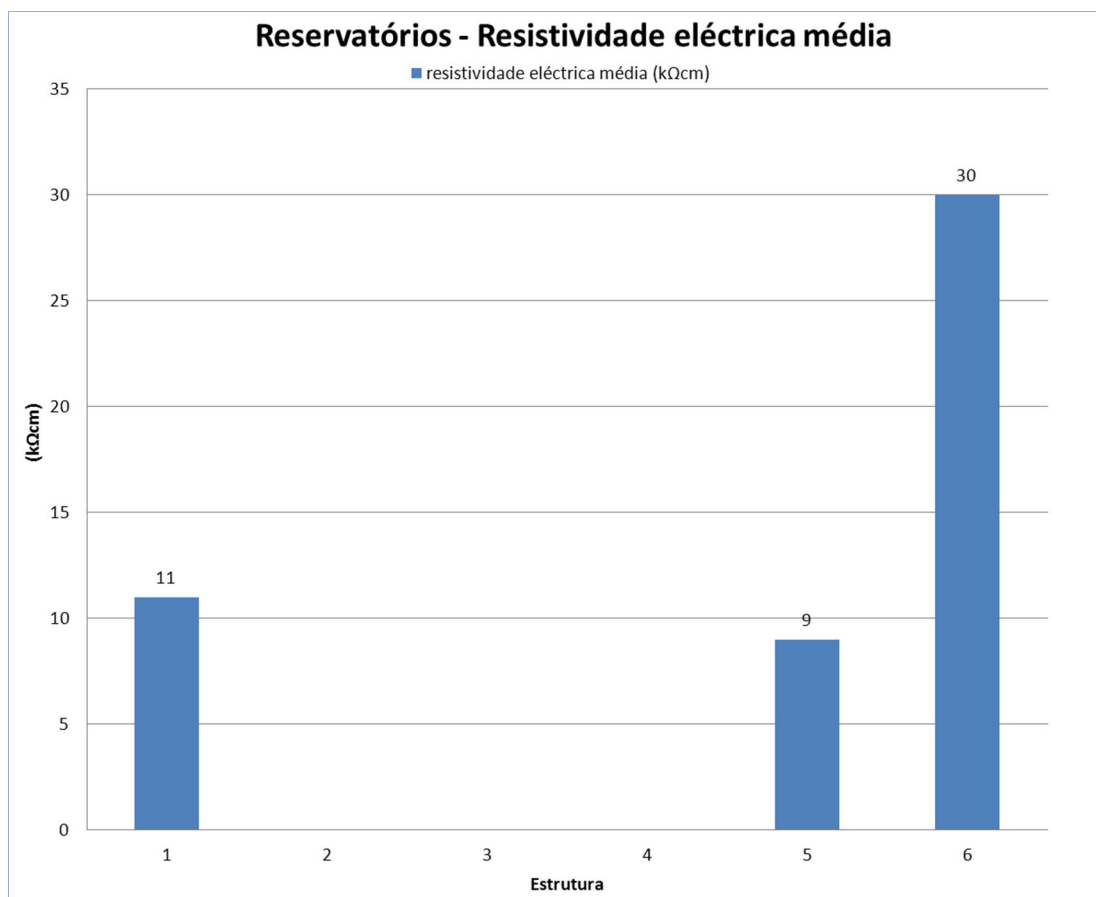


Figura 59: Gráfico da Resistividade Elétrica do Betão - BD p/ Reservatórios.

7.5.3. RECOBRIMENTOS E PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO NO BETÃO

Pela análise do conjunto total dos valores médios, não nulos, da profundidade de carbonatação no betão e dos recobrimentos mínimos, em mm, registados para cada um dos principais elementos estruturais (pilares, vigas, lajes ou paredes) dos Reservatórios, verifica-se o seguinte (ver Figura 60):

- No Reservatório nº 1 (Estrutura nº 1), a profundidade média de carbonatação detetada nos pilares é superior à espessura média do recobrimento mínimo das armaduras, indiciando risco de desenvolvimento de corrosão;
- No Reservatório nº 5 (Estrutura nº 42), nas lajes ou paredes, a frente de carbonatação também ultrapassa o nível das armaduras no betão;
- E também no Reservatório nº 6 (Estrutura nº 43), nos pilares e vigas, a carbonatação atinge igualmente uma profundidade média superior à das armaduras no betão.

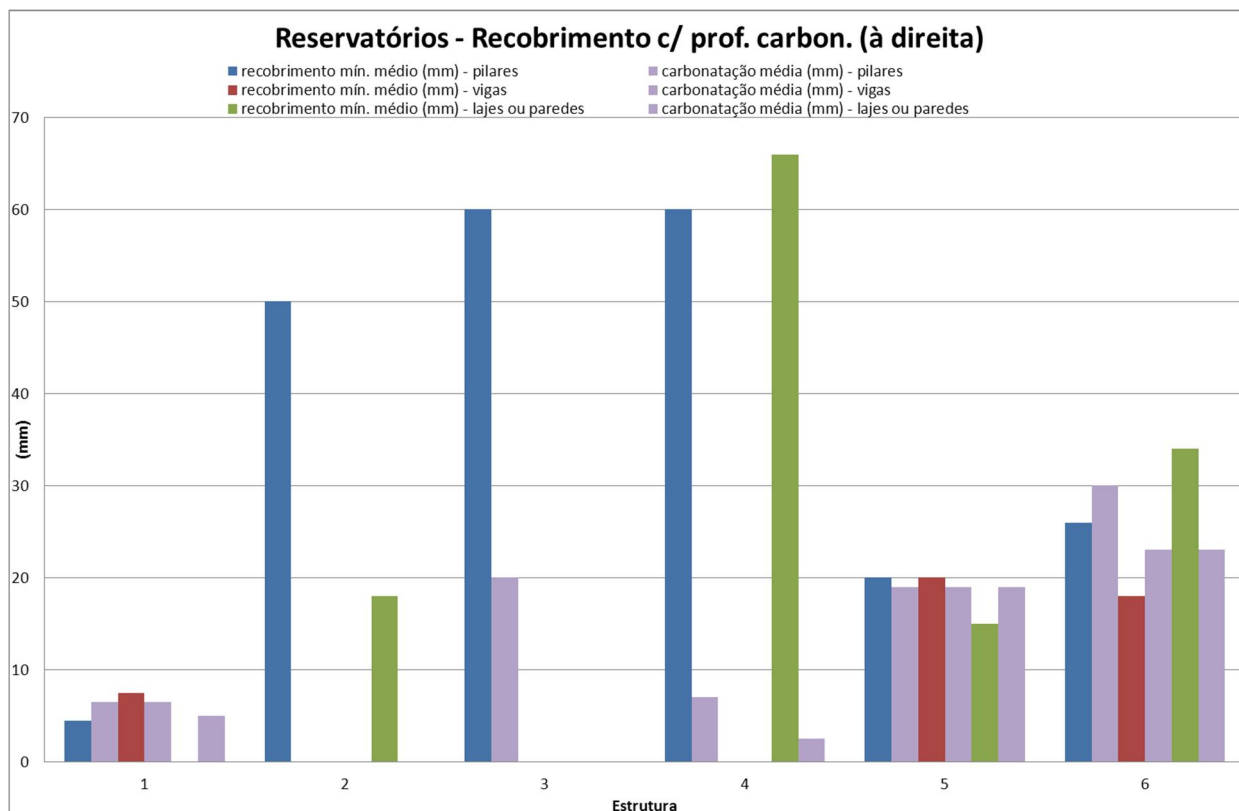


Figura 60: Gráfico da Profundidade de Carbonatação no Betão e Recobrimento - BD p/ Reservatórios.

7.5.4. TEOR DE CLORETOS NO BETÃO E RECOBRIMENTOS

A análise conjunta dos valores máximos do teor de cloretos no betão, respetiva profundidade de ocorrência e a espessura média do recobrimento mínimo, registados para cada um dos principais elementos estruturais (pilares, vigas, lajes ou paredes), permite avaliar o seguinte (ver Figura 61):

- Os Reservatórios onde ocorrem os valores mais elevados de cloretos são o Reservatório nº 2 (Estrutura nº 14), nas vigas, em classe XS1, e o Reservatório nº 5 (Estrutura nº 42), nos pilares, vigas e lajes ou paredes, em classe XC4, na Nazaré;
- Apenas no caso das lajes ou paredes do Reservatório nº 5, a profundidade em que ocorre o elevado teor de cloretos no betão atinge a espessura do recobrimento das armaduras.

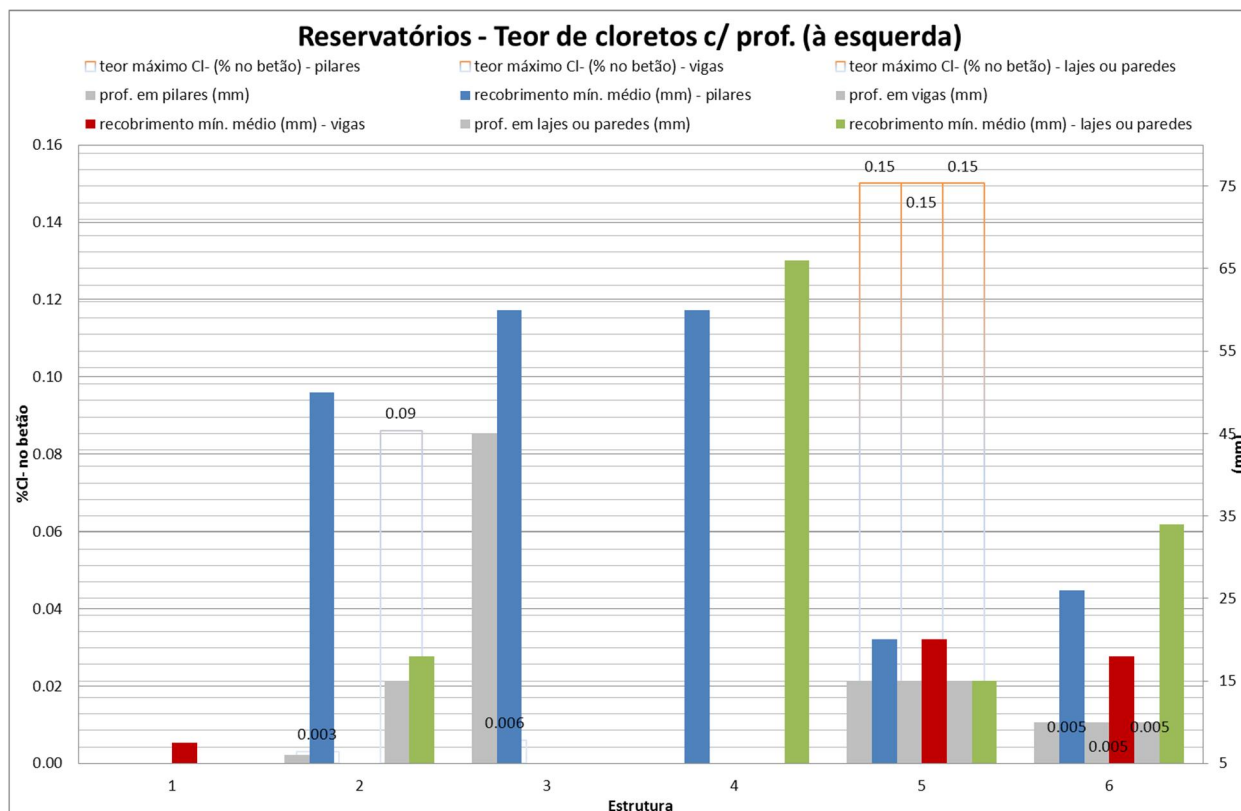


Figura 61: Gráfico do Teor de Cloretos no Betão, Profundidade e o Recobrimento - BD p/ Reservatórios.

7.6. BASE DE DADOS PARCIAL PARA A CLASSE DE EXPOSIÇÃO XC1

A Base de Dados Parcial de Durabilidade e Anomalias de Estruturas de Betão em Classe de Exposição Ambiental XC1, reúne 13 Estruturas, correspondendo o seu conteúdo à Base de Dados Parcial para Edifícios, excluindo o Edifício nº 7 (Estrutura nº 24), em Angola, na classe XS1.

Assim sendo, o tratamento da informação contida nesta BD Parcial, a sua análise e as principais observações, encontram-se no que já está apresentado no Capítulo 7.3..

7.7. BASE DE DADOS PARCIAL PARA A CLASSE DE EXPOSIÇÃO XC4

A Base de Dados Parcial de Durabilidade e Anomalias de Estruturas de Betão em Classe de Exposição Ambiental XC4, reúne 11 Estruturas, na sua maioria Pontes e Reservatórios (ver Figura 62).

São Estruturas localizadas predominantemente em Portugal, com 8 estudos registados, e ainda com 3 outros casos, em Angola, em Moçambique e na Ucrânia (ver Figura 63).

No que respeita ao ano de construção das estruturas, daquelas em foi possível obter esta informação, esta BD Parcial tem registos desde 1931 a 1976 (ver Figura 64).

Nesta amostragem, estão registados os dados e os resultados de campanhas de inspeção estrutural e ensaios realizados entre 1999 e 2011.

Das que têm construção datada, pode observar-se que é a Estrutura XC4 nº 7 (Estrutura nº 34), um Reservatório Elevado, em Portugal, de 1931, inspecionada em 1999, com cerca de 68 anos de existência na altura, aquela em que a inspeção foi realizada num período mais avançado da sua vida útil.

Por outro lado, a Estrutura XC4 nº 6 (Estrutura nº 33), uma Chaminé Industrial, em Portugal, é aquela em que a inspeção registada se realizou com menos tempo decorrido após a sua construção em 1974, sendo inspecionada em 2000, com cerca de 26 anos de funcionamento na altura.



Figura 62: Gráfico do Tipo de Estruturas - BD p/ XC4.

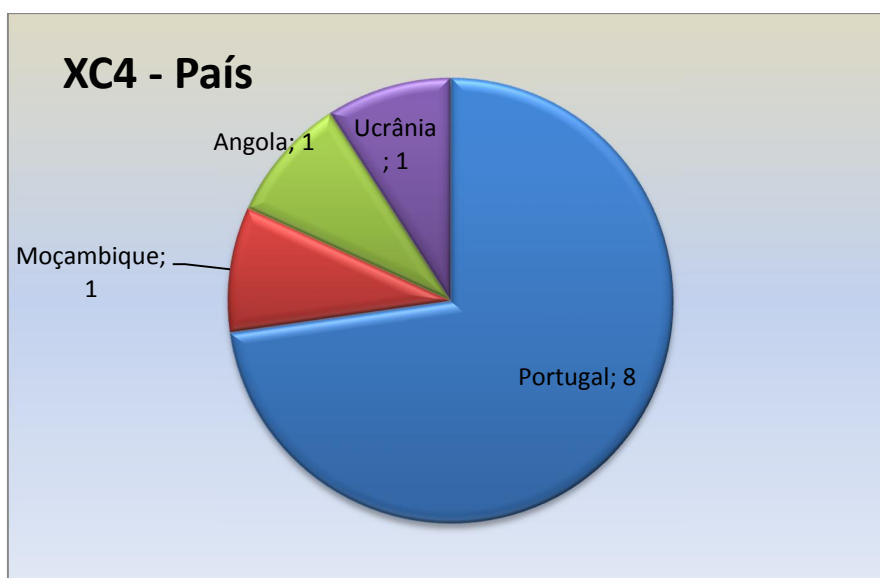


Figura 63: Gráfico dos Países - BD p/ XC4.

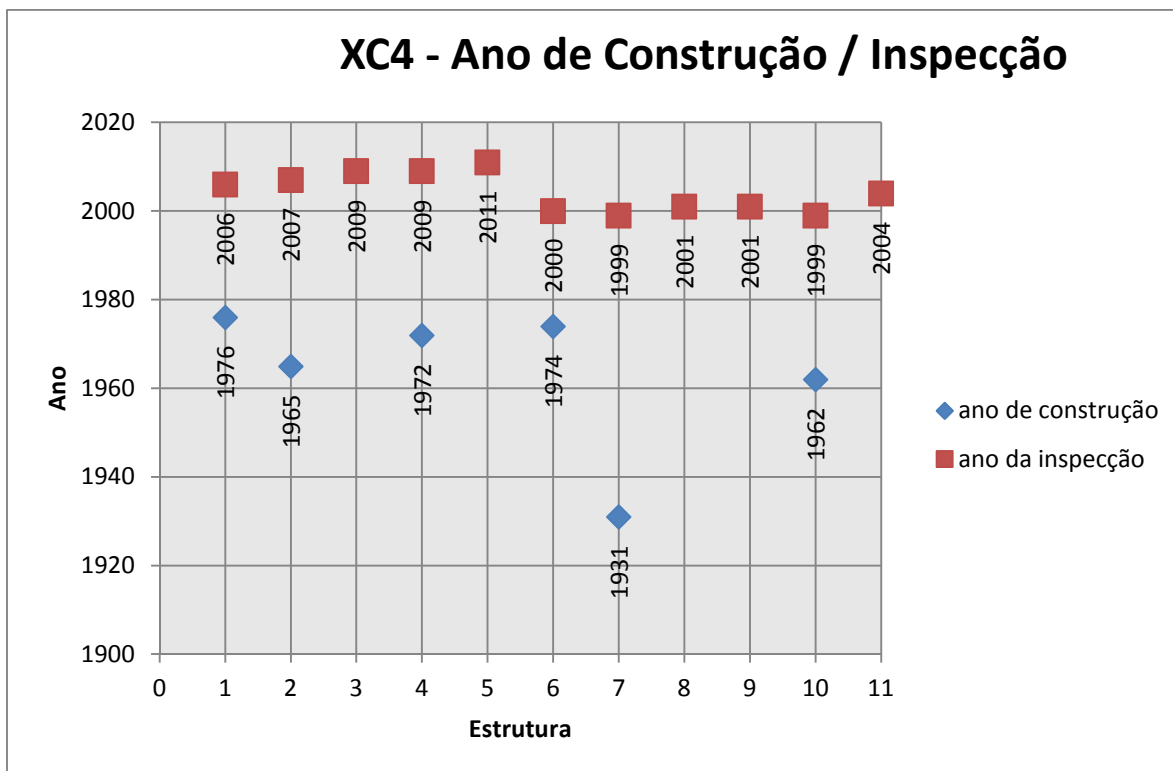


Figura 64: Gráfico do Ano de Construção / Inspeção - BD p/ XC4.

7.7.1. CLASSE DE RESISTÊNCIA DO BETÃO

Na apreciação da globalidade dos registos da classe de resistência do betão, associados aos principais elementos estruturais inspecionados, pilares, vigas e lajes ou paredes, nesta BD Parcial, verifica-se uma distribuição diversa pelas classes, com registos desde a classe C20/25 à classe C55/67 (ver Figura 65).

Relativamente às amostras de betão de pilares, observa-se uma distribuição de resultados obtidos por 5 classes de resistência, desde C20/25 a C40/50, com 1 registo cada (ver Figura 66).

A mesma apreciação, feita só para as amostras de betão das vigas, revela uma distribuição por 3 classes, C25/30, C30/37 e C45/55.

Nas lajes e paredes, o betão ensaiado apresenta exemplos diversos, desde a classe C20/25 a C55/67 (ver Figura 67).

O gráfico que apresenta a Idade da Estrutura vs. Resistência do Betão, permite visualizar a informação das resistências obtidas para o betão, em pilares, vigas e lajes ou paredes, associada à indicação da idade da estrutura, quando conhecida (ver Figura 68).

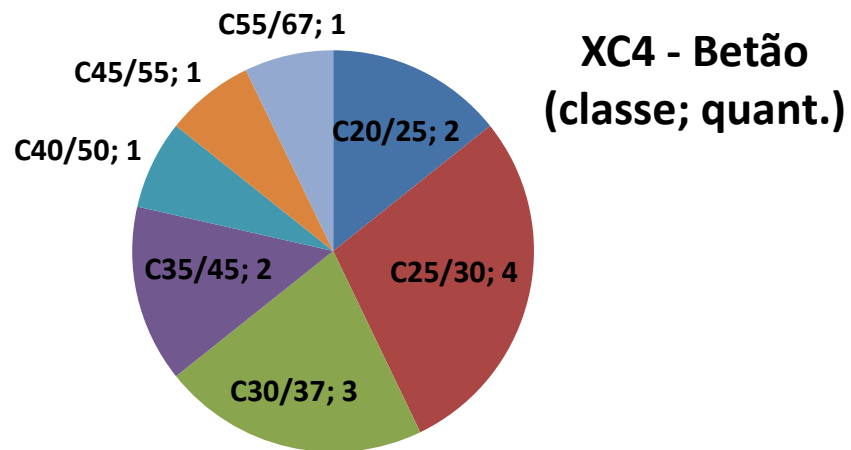


Figura 65: Gráfico Total das Classes de Resistência do Betão - BD p/ XC4.

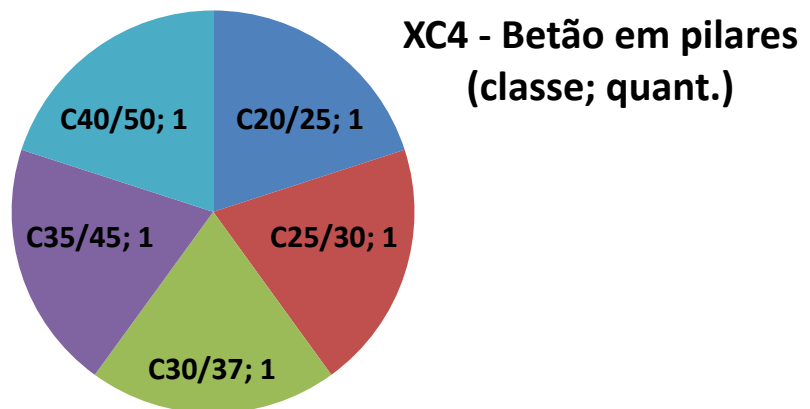


Figura 66: Gráfico das Classes de Resistência do Betão em Pilares - BD p/ XC4.

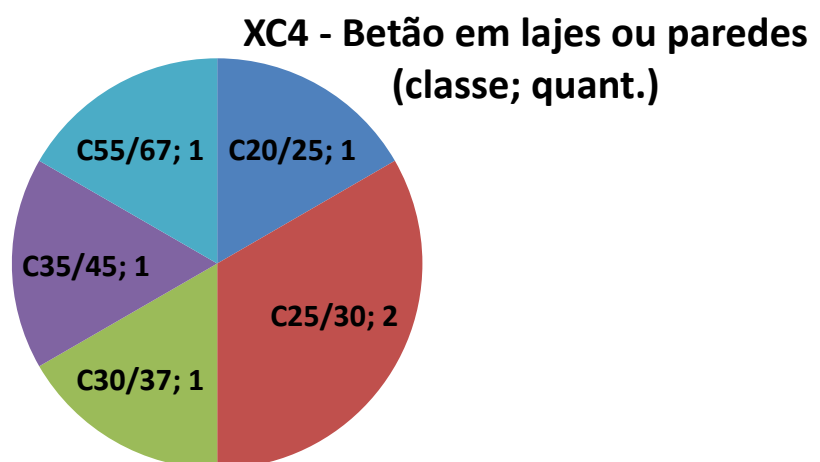


Figura 67: Gráfico das Classes de Resistência do Betão em Lajes ou Paredes - BD p/ XC4.

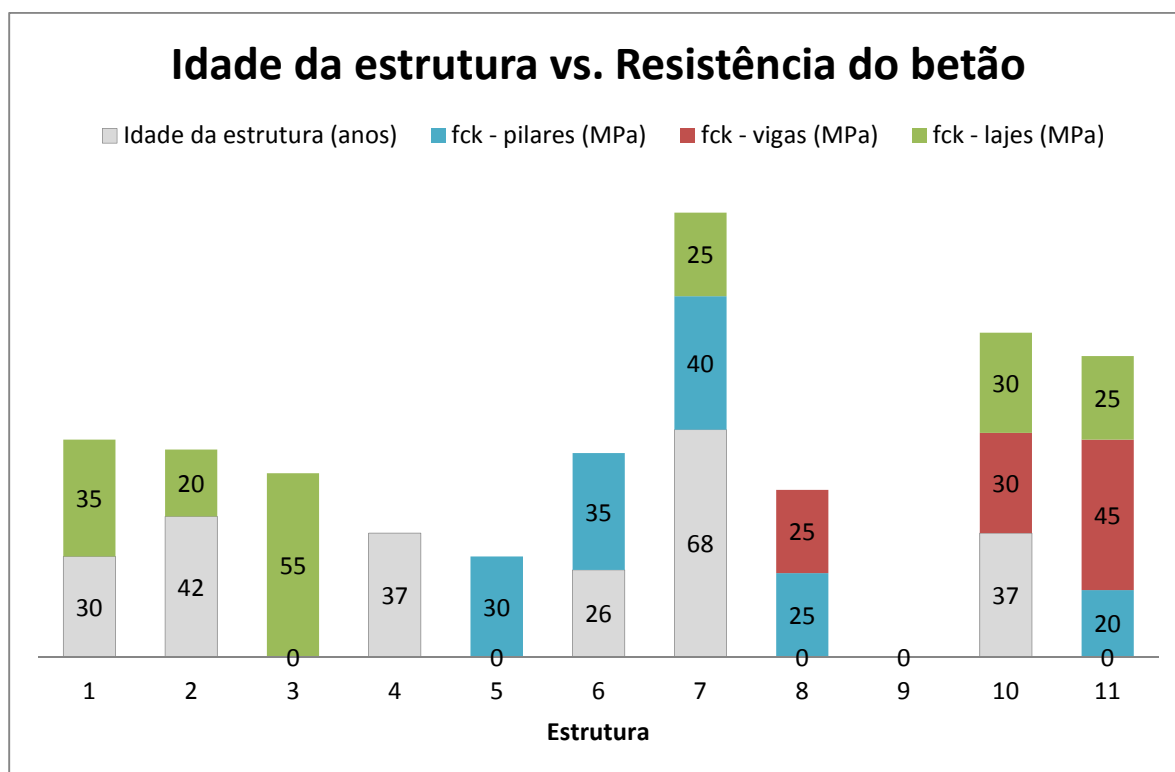


Figura 68: Gráfico da Idade da Estrutura vs. Resistência do Betão - BD p/ XC4.

7.7.2. RESISTIVIDADE ELÉTRICA DO BETÃO

Das Estruturas registadas nesta Base de Dados Parcial, apenas três têm registo de resultados de ensaios de determinação da resistividade elétrica do betão (ver Figura 69), nomeadamente: as Estruturas XC4 nº 1, 2 e 11 (Estruturas nº 11, 18 e 42, respetivamente), uma Ponte, um Silo para Cimento e um Reservatório Elevado, em Portugal e na Ucrânia, com os valores médios da ordem dos 11 e 9 kΩcm, indiciando um médio índice de corrosão possível.

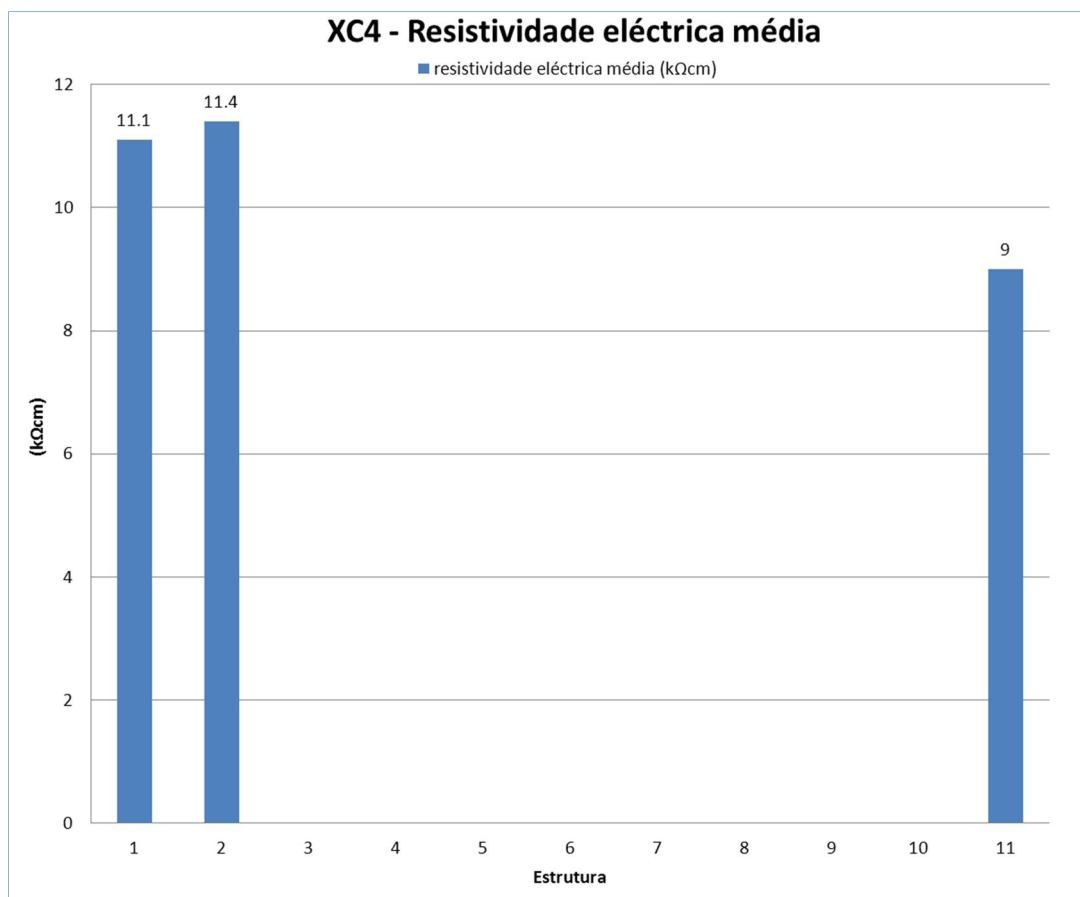


Figura 69: Gráfico da Resistividade Elétrica do Betão - BD p/ XC4.

7.7.3. RECOBRIMENTOS E PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO NO BETÃO

Foi realizada a análise do conjunto total dos valores médios, não nulos, da profundidade de carbonatação no betão e dos recobrimentos mínimos, em mm, registados para cada um dos principais elementos estruturais (pilares, vigas, lajes ou paredes) das Estruturas em classe XC4 (ver Figura 70).

Esta permite observar que, apenas nas Estruturas XC4 nº 2 e nº 11 (Estruturas nº 18 e 42), respetivamente, uma Ponte e um Reservatório Elevado, em Portugal, foi detetada uma profundidade média de carbonatação que atinge ou excede já a espessura média do recobrimento mínimo das armaduras.

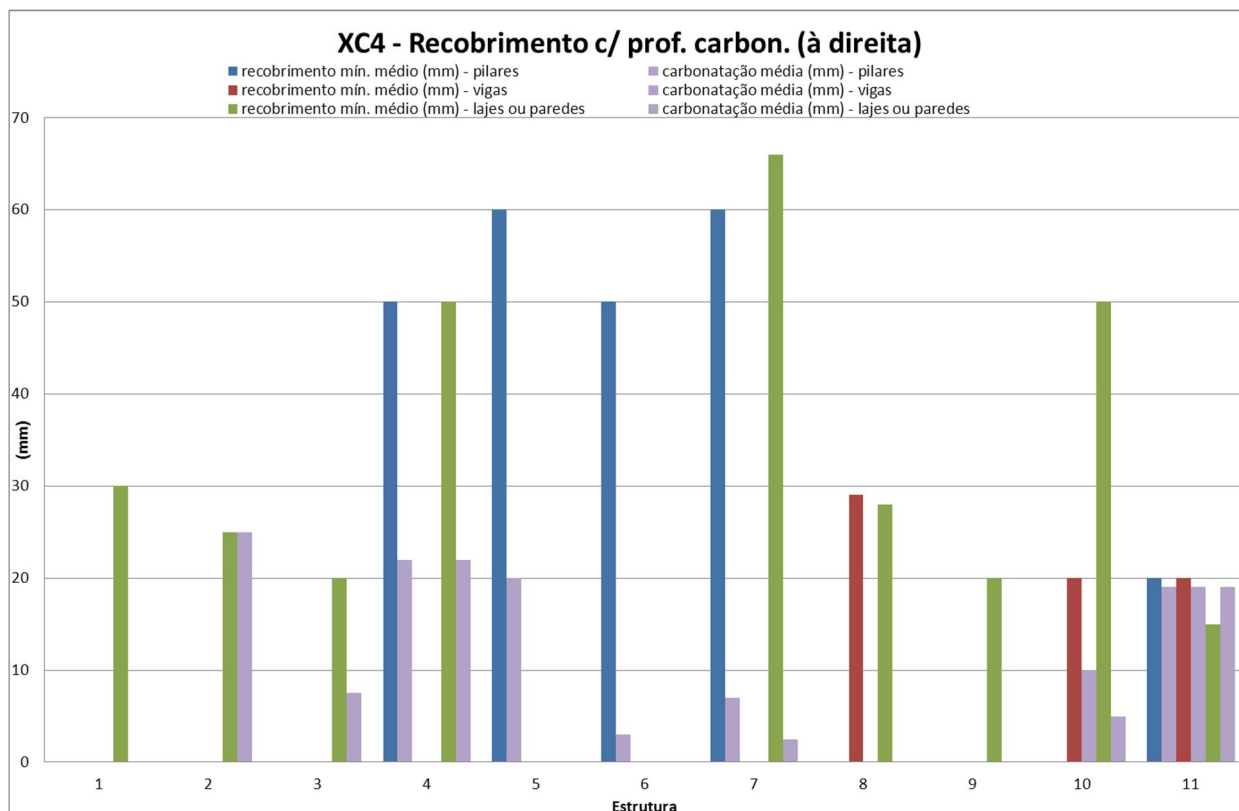


Figura 70: Gráfico da Profundidade de Carbonatação no Betão e Recobrimento - BD p/ XC4.

7.7.4. TEOR DE CLORETOS NO BETÃO E RECOBRIMENTOS

Foi efetuada a apreciação conjunta dos valores máximos do teor de cloretos no betão, respetiva profundidade de ocorrência e a espessura média do recobrimento mínimo, registados para cada um dos principais elementos estruturais (pilares, vigas, lajes ou paredes) dos casos de estudo apresentados nesta BD (ver Figura 71).

De referir que, apenas na Estrutura XC4 nº 11 (Estrutura nº 42), um Reservatório Elevado, na Nazaré, foram detetados valores máximos de teor de cloretos no betão da ordem dos 0.15%, a profundidades que atingem o nível das armaduras no betão.

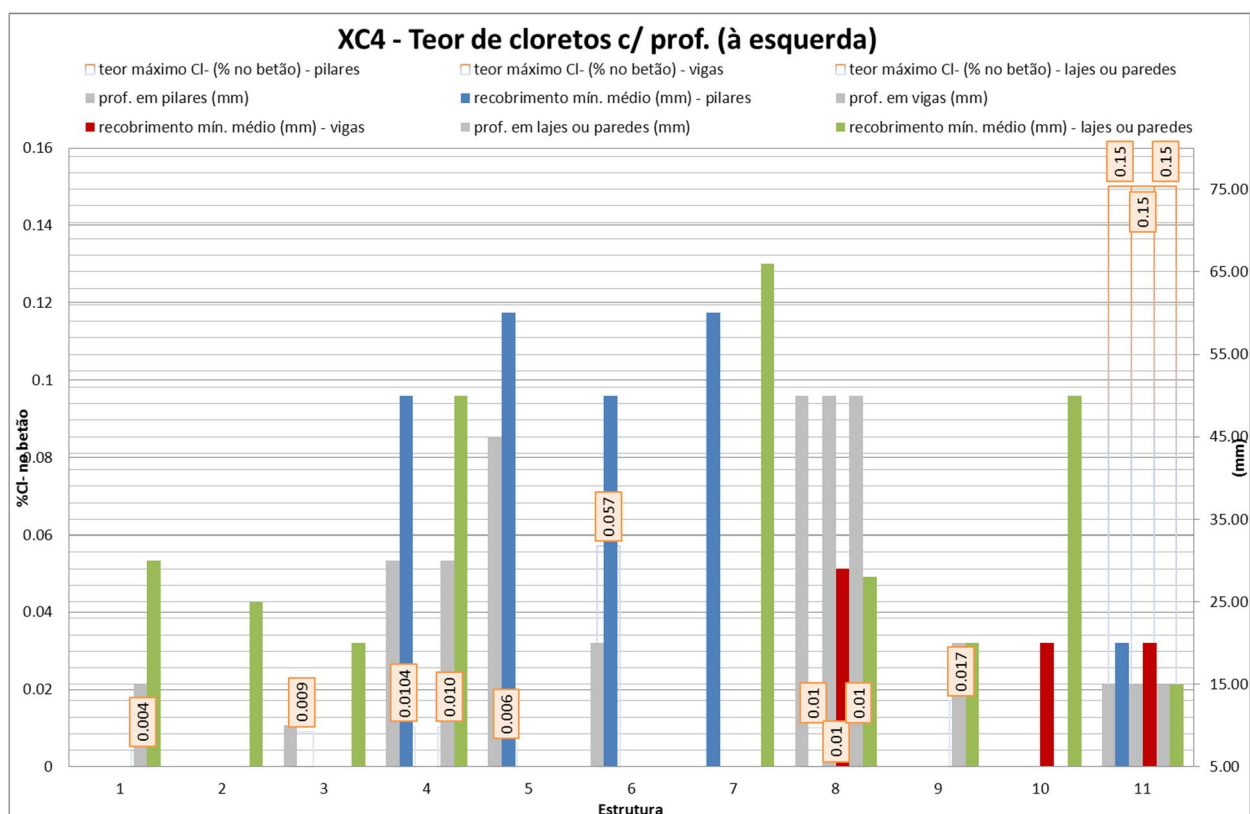


Figura 71: Gráfico do Teor de Cloretos no Betão, com Profundidade e o Recobrimento - BD p/ XC4.

7.8. BASE DE DADOS PARCIAL PARA A CLASSE DE EXPOSIÇÃO XS3

A Base de Dados Parcial de Durabilidade e Anomalias de Estruturas de Betão em Classe de Exposição Ambiental XS3, contém 9 Estruturas, correspondendo o seu conteúdo à Base de Dados Parcial para Cais e Pontes-Cais, com o acréscimo da Estrutura nº 20, uma Ponte em Moçambique.

No que respeita ao tratamento da informação relativa às 8 Estruturas Cais e Pontes-Cais contidas nesta BD Parcial, a sua análise e as principais observações, encontram-se no que já está apresentado no Capítulo 7.2..

Acrescentando o que se refere à Estrutura XS3 nº 9 (Estrutura nº 20), uma Ponte em Moçambique (Ilha), observa-se que esta foi inspecionada em 2010, sem informação acerca da data de construção.

Nesta Ponte foi possível detetar betão da classe C25/30 nos pilares e C12/15 nas vigas.

Nas vigas, é de referir que a profundidade média de carbonatação detetada é superior à espessura média do recobrimento mínimo.

Foi detetado um teor máximo de cloretos no betão, de 0.08%, nas vigas da Ponte, mas a uma profundidade que é inferior à espessura do recobrimento.

8. CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Como principais conclusões do desenvolvimento deste trabalho, além dos resultados obtidos nas Bases de Dados, Geral e Parciais, e da sua observação e apreciação, já apresentados no Capítulo 7, pode ainda referir-se o seguinte:

- Verifica-se que o tipo de dados e informação técnica, acerca das estruturas abordadas, a introduzir na DB-DURATI, é semelhante ao considerado na estrutura da Base de Dados apresentada nesta dissertação, havendo evidentemente alguns aspetos não abordados ou não aplicáveis nas inspeções das obras da Teixeira Duarte, pelo que não são incluídos da mesma forma no “input”;
- Salvo as particularidades de cada caso, os resultados obtidos no geral, pelo tratamento e análise da informação contida na Base de Dados, estão, na maior parte dos casos, em concordância com a patologia espectável, dada a utilização, o tipo de betão e principalmente a classe de exposição ambiental das estruturas estudadas;
- A criação de Bases de Dados Parciais, dedicadas apenas a um tipo de estrutura ou classe de exposição ambiental, revelou-se muito útil no processo de análise de dados e resultados, permitindo fazer também um tratamento da informação mais vocacionado e diretamente orientado para o interesse técnico específico de quem consulta a Base de Dados;
- A introdução de registos fotográficos revela-se também muito importante, permitindo complementar a informação de forma interessante e ainda elucidar acerca das principais anomalias do betão e betão armado.

A Base de Dados apresentada permite realizar vários tipos de análises que, por limitações de tempo e espaço, não foi possível desenvolver no presente trabalho. Referem-se, por exemplo, diversos cruzamentos de informação, tais como:

- Idade da estrutura – Profundidade de carbonatação ou profundidade de penetração de cloretos;
- Classe de resistência do betão – Profundidade de carbonatação ou profundidade de penetração de cloretos.

Os dados que permitem este tipo de análise ficam disponíveis para a comunidade técnica e científica, embora, por questões formais de apresentação do documento, não fosse possível apresentá-los plenamente nesta dissertação

O trabalho produzido no âmbito do desenvolvimento desta dissertação poderá futuramente ser acrescentado através da introdução na BD de mais estruturas e casos de estudo, a cujos relatórios de inspeção estrutural não foi possível aceder em tempo útil.

Por outro lado, a Base de Dados será com certeza atualizada oportunamente, sempre que se executem novas campanhas de inspeção estrutural e ensaios em novas intervenções da empresa.

Como também já foi referido, esta Base de Dados poderá posteriormente transferir os seus registos para a DB-DURATI, facilitando a transferência de conhecimentos e referências de base, podendo estes ser úteis a diferentes entidades, para futuros estudos de intervenções em obras, para trabalhos de investigação e para aferição de modelos de previsão de vida útil, suportando tomadas de decisão relativas à manutenção de estruturas, ou outros.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Livros e Artigos

ANTUNES, E. (2010) - "Efeitos Estruturais das Reacções Químicas Expansivas no Betão" - Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, IST;

BRANCO, F., PAULO, P. e GARRIDO, M. (2013) – “Vida Útil na Construção Civil”, Boletim Técnico 04, ALCONPAT Internacional;

CEB – Bulletin 183 - “Durable Concrete Structures”, Comité Euro-International du Béton, 1992;

CEB - Bulletin 192 – “Diagnosis and Assessment of Concrete Structures”, Comité Euro-International du Béton, 1989;

CEB – Bulletin 243 - “Strategies for Testing and Assessment of Concrete Structures”, Comité Euro-International du Béton, 1998;

COST 521 - “Corrosion of Steel in Reinforced Concrete Structures”, Workshop, Utrecht, The Netherlands, 1998;

COSTA, A. (1997) - “Durabilidade de Estruturas de Betão Armado em Ambiente Marítimo”, Tese de Doutoramento, Universidade Técnica de Lisboa, IST;

COSTA, A. (1999) - "Mecanismos de Deterioração em Estruturas de Betão Armado", IST;

COSTA, A. (2000) - “Degradação de Estruturas de Betão Armado e Pré-Esforçado por Corrosão de Armaduras”, REPAR 2000;

COSTA, A. (2015) - Aulas de Durabilidade de Estruturas de Betão - Reabilitação e Reforço de Estruturas - Mestrado em Engenharia Civil, IST;

COSTA, A. (2015) - Aulas de Reparação de Estruturas de Betão - Reabilitação e Reforço de Estruturas - Mestrado em Engenharia Civil, IST;

COUTINHO, A. DE SOUSA (1988) - "Fabrico e Propriedades do Betão" - Vol.I" - LNEC;

DUARTE, F. (2003) - "Projecto de Reabilitação com Protecção Catódica Aplicada ao Betão Armado", Candidatura ao Prémio Inovação Jovem Engenheiro 2003 da Ordem dos Engenheiros;

DURAR – "Manual de Inspeccion, Evaluacion y Diagnostico de Corrosion en Estructuras de Hormigon Armado", CYTED - Programa Iberoamericano de Ciencia e tecnología para el Desarrollo, 1998;

FIB – Bulletin 53 - "Structural Concrete – Textbook on Behaviour, Design and Performance, Vol. 3", Fédération Internationale du Béton, 2009;

LOURENÇO, M. Z., "Aplicação de Protecção Catódica (CP) a Estruturas de Betão Armado", REPAR 2000;

SALTA, M. "Prevenção e Controlo da Corrosão em Estruturas de Betão Armado Utilizando Técnicas Electroquímicas", REPAR 2000;

SILVA, A. MANUEL DOS SANTOS (2005) - "Degradação do Betão por Reacções Álcis-Sílica - Utilização de cinzas volantes e meta-caulino para a sua prevenção" - Dissertação de Doutoramento em Engenharia Civil, Escola de Engenharia da Universidade do Minho;

SILVA, J. (2007) - "Métodos Electroquímicos para Prevenção da Deterioração e Reparação de Estruturas de Betão Armado" - Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, IST;

SIMAS, M. (2007) - "Sistemas de Protecção do Betão Face à Carbonatação" - Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, IST;

TUUTTI, K. (1982) - "Corrosion of Steel in Concrete", Swedish Cement and Concrete Research Institute, Stockholm;

Documentos Normativos

ASTM C642 (2006) – "Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete", American Society for Testing and Materials, Philadelphia;

ASTM C876-86 (1986) - "Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete", American Society for Testing and Materials, Philadelphia;

ASTM E632-81 (1981) - "Standard Practice for Developing Accelerated Tests to a Prediction of the Service Life of Building Components and Materials", American Society for Testing and Materials, Philadelphia;

BS 1881: Part 202 (1986) - "Testing Concrete. Recommendations for Surface Hardness Testing by Rebound Hammer", British Standards Institution;

BS 1881:124 (1988) - "Testing Concrete. Methods for Analysis of Hardened Concrete", British Standards Institution;

CSTR n.º 11 - Concrete Society Technical Report n.º 11 - "Concrete Core Testing for Strength";

E 391 - 1993 - Especificação LNEC - Betões - Determinação da Resistência à Carbonatação;

E 461 - 2007 - Especificação LNEC - Betões - Metodologias Para Prevenir Reacções Expansivas Internas;

E 464 - 2007 - Especificação LNEC - Betões - Metodologia Prescritiva Para Uma Vida Útil de Projecto de 50 e de 100 Anos Face às Acções Ambientais;

E 465 - 2007 - Especificação LNEC - Betões - Metodologia Para Estimar as Propriedades de Desempenho do Betão que Permitem Satisfazer a Vida Útil de Projecto de Estruturas de Betão Armado e Pré-esforçado sob as Exposições Ambientais XC e XS;

EC2 - EUROCÓDIGO 2 - NP EN 1992 (2010) - Projecto de Estruturas de Betão;

NP EN 206-1 (2007) - Betão - Parte 1: Especificação, Desempenho, Produção e Conformidade;

NP EN 1504 (2006) - Produtos e Sistemas para a Protecção e Reparação de Estruturas de Betão - Definições, Requisitos, Controlo da Qualidade e Avaliação da Conformidade.

NP 2064 (1983) - Cimentos. Definição, Classes de Resistência e Características;

NP EN 10002-1 (2006) - Materiais Metálicos: Ensaio de Tracção: Parte 1: Método de Ensaio à Temperatura Ambiente;

NP EN 12390-3 (2011) - Ensaio de Betão Endurecido. Parte 3: Resistência à Compressão de Provete de Ensaio;

NP EN 12504-1 (2003) - Ensaio do Betão nas Estruturas. Parte 1;

EN 12504-2 (2001) - "Testing Concrete in Structures - Part 2: Non-Destructive Testing - Determination of Rebound Number";

NP EN 13791 (2008) - Avaliação da Resistência do Betão nas Estruturas e em Produtos Pré-Fabricados;

Páginas Web

DURATINET Website: <http://duratinet.org/>;

**Base de dados de durabilidade e anomalias de estruturas
de betão: registos em diversas exposições ambientais**

VOLUME II - ANEXOS

Filomena Maria de Carvalho Duarte

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia Civil

Orientador: Prof. Dr. António José da Silva Costa

Júri

Presidente: Prof. Dr. José Joaquim Costa Branco de Oliveira Pedro

Orientador: Prof. Dr. António José da Silva Costa

Vogal: Prof. Dr. Augusto Martins Gomes

Novembro de 2016

ANEXO 1

BASE DE DADOS GERAL

[illegible]

ANEXO 2

BASES DE DADOS PARCIAIS:

- BD para Cais e Pontes-Cais;
- BD para Edifícios;
- BD para Pontes;
- BD para Reservatórios.
- BD para a classe de exposição XC1;
- BD para a classe de exposição XC4;
- BD para a classe de exposição XS3.

[illegible]

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118	119	120	121	122	123	124	125	126	127	128	129	130	131	132	133	134	135	136	137	138	139	140	141	142	143	144	145	146	147	148	149	150	151	152	153	154	155	156	157	158	159	160	161	162	163	164	165	166	167	168	169	170	171	172	173	174	175	176	177	178	179	180	181	182	183	184	185	186	187	188	189	190	191	192	193	194	195	196	197	198	199	200	201	202	203	204	205	206	207	208	209	210	211	212	213	214	215	216	217	218	219	220	221	222	223	224	225	226	227	228	229	230	231	232	233	234	235	236	237	238	239	240	241	242	243	244	245	246	247	248	249	250	251	252	253	254	255	256	257	258	259	260	261	262	263	264	265	266	267	268	269	270	271	272	273	274	275	276	277	278	279	280	281	282	283	284	285	286	287	288	289	290	291	292	293	294	295	296	297	298	299	300	301	302	303	304	305	306	307	308	309	310	311	312	313	314	315	316	317	318	319	320	321	322	323	324	325	326	327	328	329	330	331	332	333	334	335	336	337	338	339	340	341	342	343	344	345	346	347	348	349	350	351	352	353	354	355	356	357	358	359	360	361	362	363	364	365	366	367	368	369	370	371	372	373	374	375	376	377	378	379	380	381	382	383	384	385	386	387	388	389	390	391	392	393	394	395	396	397	398	399	400	401	402	403	404	405	406	407	408	409	410	411	412	413	414	415	416	417	418	419	420	421	422	423	424	425	426	427	428	429	430	431	432	433	434	435	436	437	438	439	440	441	442	443	444	445	446	447	448	449	450	451	452	453	454	455	456	457	458	459	460	461	462	463	464	465	466	467	468	469	470	471	472	473	474	475	476	477	478	479	480	481	482	483	484	485	486	487	488	489	490	491	492	493	494	495	496	497	498	499	500	501	502	503	504	505	506	507	508	509	510	511	512	513	514	515	516	517	518	519	520	521	522	523	524	525	526	527	528	529	530	531	532	533	534	535	536	537	538	539	540	541	542	543	544	545	546	547	548	549	550	551	552	553	554	555	556	557	558	559	560	561	562	563	564	565	566	567	568	569	570	571	572	573	574	575	576	577	578	579	580	581	582	583	584	585	586	587	588	589	590	591	592	593	594	595	596	597	598	599	600	601	602	603	604	605	606	607	608	609	610	611	612	613	614	615	616	617	618	619	620	621	622	623	624	625	626	627	628	629	630	631	632	633	634	635	636	637	638	639	640	641	642	643	644	645	646	647	648	649	650	651	652	653	654	655	656	657	658	659	660	661	662	663	664	665	666	667	668	669	670	671	672	673	674	675	676	677	678	679	680	681	682	683	684	685	686	687	688	689	690	691	692	693	694	695	696	697	698	699	700	701	702	703	704	705	706	707	708	709	710	711	712	713	714	715	716	717	718	719	720	721	722	723	724	725	726	727	728	729	730	731	732	733	734	735	736	737	738	739	740	741	742	743	744	745	746	747	748	749	750	751	752	753	754	755	756	757	758	759	760	761	762	763	764	765	766	767	768	769	770	771	772	773	774	775	776	777	778	779	780	781	782	783	784	785	786	787	788	789	790	791	792	793	794	795	796	797	798	799	800	801	802	803	804	805	806	807	808	809	810	811	812	813	814	815	816	817	818	819	820	821	822	823	824	825	826	827	828	829	830	831	832	833	834	835	836	837	838	839	840	841	842	843	844	845	846	847	848	849	850	851	852	853	854	855	856	857	858	859	860	861	862	863	864	865	866	867	868	869	870	871	872	873	874	875	876	877	878	879	880	881	882	883	884	885	886	887	888	889	890	891	892	893	894	895	896	897	898	899	900	901	902	903	904	905	906	907	908	909	910	911	912	913	914	915	916	917	918	919	920	921	922	923	924	925	926	927	928	929	930	931	932	933	934	935	936	937	938	939	940	941	942	943	944	945	946	947	948	949	950	951	952	953	954	955	956	957	958	959	960	961	962	963	964	965	966	967	968	969	970	971	972	973	974	975	976	977	978	979	980	981	982	983	984	985	986	987	988	989	990	991	992	993	994	995	996	997	998	999	1000
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118	119	120	121	122	123	124	125	126	127	128	129	130	131	132	133	134	135	136	137	138	139	140	141	142	143	144	145	146	147	148	149	150	151	152	153	154	155	156	157	158	159	160	161	162	163	164	165	166	167	168	169	170	171	172	173	174	175	176	177	178	179	180	181	182	183	184	185	186	187	188	189	190	191	192	193	194	195	196	197	198	199	200	201	202	203	204	205	206	207	208	209	210	211	212	213	214	215	216	217	218	219	220	221	222	223	224	225	226	227	228	229	230	231	232	233	234	235	236	237	238	239	240	241	242	243	244	245	246	247	248	249	250	251	252	253	254	255	256	257	258	259	260	261	262	263	264	265	266	267	268	269	270	271	272	273	274	275	276	277	278	279	280	281	282	283	284	285	286	287	288	289	290	291	292	293	294	295	296	297	298	299	300	301	302	303	304	305	306	307	308	309	310	311	312	313	314	315	316	317	318	319	320	321	322	323	324	325	326	327	328	329	330	331	332	333	334	335	336	337	338	339	340	341	342	343	344	345	346	347	348	349	350	351	352	353	354	355	356	357	358	359	360	361	362	363	364	365	366	367	368	369	370	371	372	373	374	375	376	377	378	379	380	381	382	383	384	385	386	387	388	389	390	391	392	393	394	395	396	397	398	399	400	401	402	403	404	405	406	407	408	409	410	411	412	413	414	415	416	417	418	419	420	421	422	423	424	425	426	427	428	429	430	431	432	433	434	435	436	437	438	439	440	441	442	443	444	445	446	447	448	449	450	451	452	453	454	455	456	457	458	459	460	461	462	463	464	465	466	467	468	469	470	471	472	473	474	475	476	477	478	479	480	481	482	483	484	485	486	487	488	489	490	491	492	493	494	495	496	497	498	499	500	501	502	503	504	505	506	507	508	509	510	511	512	513	514	515	516	517	518	519	520	521	522	523	524	525	526	527	528	529	530	531	532	533	534	535	536	537	538	539	540	541	542	543	544	545	546	547	548	549	550	551	552	553	554	555	556	557	558	559	560	561	562	563	564	565	566	567	568	569	570	571	572	573	574																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										

