U.PORTO

FEUP FACULDADE DE ENGENHARIA
UNIVERSIDADE DO PORTO

CONDICIONANTES AO PROJETO DE ESTRUTURAS IMPOSTAS PELAS AÇÕES AMBIENTAIS

BRUNO EMANUEL DOS SANTOS VIEIRA FORTES

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de

MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS

Orientador: Professora Doutora Sandra da Conceição Barbosa Nunes

JUNHO DE 2012

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2011/2012

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

http://www.fe.up.pt

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2011/2012 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2011*.

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respectivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão electrónica fornecida pelo respectivo Autor.

À minha Família

Viva como se fosse morrer amanhã. Aprenda como se fosse viver para sempre.

Mohandas K. Gandhi

AGRADECIMENTOS

Expresso aqui a minha gratidão a todos aqueles que contribuíram duma forma direta ou indireta para a concretização deste trabalho.

O meu primeiro agradecimento é dirigido à orientadora deste trabalho Professora Sandra Nunes, pela paciência e compreensão demonstrada ao longo do mesmo, corrigindo e indicando a direção a seguir, sempre incentivando o rigor científico e propondo novas ideias e desafios que orientaram este trabalho no seu correto rumo.

À Professora Joana Sousa Coutinho pela disponibilidade no auxílio e pelo fornecimento de dados imprescindíveis ao estudo.

Ao Engenheiro Francisco Araújo pela disponibilidade, troca de experiências e conselhos.

À Engenheira Helena Figueiras pela disponibilidade no auxílio.

Aos professores que acompanharam toda a minha formação académica, com quem muito aprendi e que tenho de reconhecer-lhes competência por elevada qualidade técnica e humana.

Aos colegas e amigos agradeço o apoio e o ambiente criado, dando um forte estímulo à prossecução deste trabalho.

À minha família um agradecimento eterno e profundo pelas condições que me possibilitaram para a conclusão deste trabalho, o apoio constante que sempre demonstraram e o amor que me deram. Sem eles nada disto seria possível.

RESUMO

De acordo com a regulamentação atual, o técnico responsável pelo projeto de estabilidade das estruturas deve atender para além das ações mecânicas a ações ambientais. O ambiente que vai estar envolvente à estrutura condiciona alguns parâmetros fundamentais para o dimensionamento da estrutura, nomeadamente, a classe de resistência mínima e o recobrimento nominal mínimo, consoante a vida útil pretendida para a estrutura.

Em Portugal, a legislação em vigor estabelece duas metodologias de modo a garantir a adequada resistência às ações ambientais e consequente durabilidade das estruturas. São elas a metodologia baseada na definição de medidas prescritivas para a composição e classe de resistência do betão, exposta na Especificação LNEC E 464, e a metodologia baseada na estimativa de propriedades de desempenho que permitem satisfazer a vida útil de projeto de estruturas de betão armado e pré-esforçado, da Especificação LNEC E 465.

No presente trabalho desenvolveram-se folhas de cálculo automático destinadas a facilitar a definição das exigências ao nível do dimensionamento de estruturas de betão armado e pré-esforçado e ao nível da composição de betão; atendendo às classes de exposição ambiental; e aplicando o disposto na NP EN 206-1, no Eurocódigo 2, bem como nas Especificação do LNEC E464 e LNEC E465. A par da análise da regulamentação aplicável, onde estão definidos os modelos de cálculo utilizados no desenvolvimento das aplicações, fez-se uma revisão dos principais mecanismos de deterioração das estruturas de betão armado e pré-esforçado. As folhas de cálculo desenvolvidas, para além de terem sido validadas com diversos exemplos, incluindo os apresentados nas especificações do LNEC; foram aplicadas na verificação de uma composição de betão auto-compactável branco aplicada numa estrutura no Porto de Leixões, junto ao futuro Terminal de Cruzeiros.

PALAVRAS-CHAVE: exposição ambiental, durabilidade, abordagem prescritiva, abordagem baseada no desempenho, misturas de cimentos e adições.

ABSTRACT

According to the current regulations, the technician responsible for the design of the stability of structures must meet in addition to the mechanical actions to environmental actions. The environment that will be surrounding to the structure will condition some basic parameters for the design of the structure, namely, the minimum class of resistance and minimum nominal cover, depending on the desired lifetime for the structure.

In Portugal, the legislation provides two methods to ensure adequate resistance to environmental actions and consequent durability of structures. They are the methodology based on the definition of prescriptive measures for the composition and strength class of concrete, exposed in Specification LNEC E 464 and methodology based on estimations of performance properties capable of meeting the project life of reinforced and prestressed concrete structures, from the Specification LNEC E 465.

In the present study were developed automated worksheets destined to facilitate the definition of requirements at the level of design of reinforced and prestressed concrete structures and the level of composition of concrete, attending to the classes of environmental exposure, and applying the provisions of NP EN 206-1, the Eurocode 2 and the specification of LNEC E464 and LNEC E465. Alongside the analysis of regulations, which defines the calculation models used in developing the program, was made a review of the main mechanisms of deterioration of reinforced and prestressed concrete. The spreadsheets developed, as well as having been validated with several examples, including those disclosed in the LNEC specifications; were applied to the checking of a composition of white self-compacting concrete applied on a structure, near the Port of Leixões future Cruises Terminal.

KEYWORDS: environmental exposure, durability, prescriptive approach, performance-based approach, mixtures of cement and additions.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS i
RESUMO iii
ABSTRACT v

1. INTRODUÇÃO 1
1.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS 1
1.2. ORGANIZAÇÃO 3

2. ENQUADRAMENTO 5
2.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS 5
2.2. DURABILIDADE 6
2.3. VIDA ÚTIL 8
2.4. MECANISMOS QUE AFETAM A DURABILIDADE DAS ESTRUTURAS 10
2.4.1. REDE POROSA 11
2.4.2. MECANISMOS DE TRANSPORTE 12
2.4.3. EXPOSIÇÃO AMBIENTAL 14
2.5. A DETERIORAÇÃO DAS ESTRUTURAS DE BETÃO ARMADO E PRÉ-ESFORÇADO 17
2.5.1. MECANISMOS DE DETERIORAÇÃO DO BETÃO 19
2.5.1.1. Processos Químicos 19
2.5.1.2. Processos Físicos e Mecânicos 28
2.5.1.3. Processos Biológicos 30
2.5.2. A CORROSÃO DO AÇO PARA BETÃO ARMADO 30
2.5.2.1. A Passivação das armaduras 30
2.5.2.2. Definição da corrosão e seus efeitos 32
2.5.2.3. Formas de manifestação da corrosão 34
2.5.2.4. Medidas preventivas 34

3. REVISÂO NORMATIVA 35
3.1. NORMA NORTE-AMERICANA ACI 318M:2008 37
3.2. NORMA BRASILEIRA NBR 6118 (2003) 42
3.3. NORMA EUROPEIA EN 206-1:2000 NA SUA VERSÃO PORTUGUESA NP EN 206-1:2007 45

3.4. O FIB MODEL CODE 2010 54

3.5. CONSIDERAÇÕES FINAIS 56

4. A METODOLOGIA PRESCRITIVA DA ESPECIFICAÇÃO LNEC E 464 57

4.1. INTRODUÇÃO 57

4.2. A DEGRADAÇÃO DO BETÃO E AS CLASSES DE EXPOSIÇÃO AMBIENTAL 57

4.3. PRESCRIÇÕES QUANTO À COMPOSIÇÃO E CLASSE DE RESISTÊNCIA DO BETÃO PARA CONSIDERAR A DURABILIDADE 60

4.4. COMBINAÇÕES DE CLASSES DE EXPOSIÇÃO AMBIENTAL 63

4.5. APTIDÃO DOS CIMENTOS, ADIÇÕES E MISTURAS COMO CONSTITUINTES DO BETÃO 66

4.5.1. VERIFICAÇÃO DA COMPOSIÇÃO DE MISTURAS DE CIMENTOS E ADIÇÕES 66

4.5.1. FORMULAÇÃO DE MISTURAS DE CIMENTOS E ADIÇÕES 72

4.6. CONSIDERAÇÕES FINAIS 75

5. METODOLOGIA BASEADA NO DESEMPENHO SEGUNDO A ESPECIFICAÇÃO LNEC E465 77

5.1. INTRODUÇÃO 77

5.2. METODOLOGIA GERAL DO PROJETO DE DURABILIDADE 78

5.3. MODELAÇÃO DA DETERIORAÇÃO DO BETÃO ARMADO POR CORROSÃO DO AÇO 80

5.3.1. MODELAÇÃO DA HUMIDADE DO BETÃO NAS CLASSES DE EXPOSIÇÃO XC E XS 80

5.3.2. MODELOS PARA CÁLCULO DO PERÍODO DE INICIAÇÃO DA CORROSÃO 81

5.3.2.1. Modelos para cálculo do período de iniciação devido à carbonatação 81

5.3.2.2. Modelo para cálculo do período de iniciação devido aos cloretos 85

5.3.3. MODELO PARA ESTIMAR O PERÍODO DE PROPAGAÇÃO 88

5.4. CÁLCULO DAS PROPRIEDADES DE DESEMPENHO DO BETÃO RELACIONADAS COM A CORROSÃO DAS ARMADURAS 91

5.5. CRITÉRIOS DE CONFORMIDADE PARA AS PROPRIEDADES DO DESEMPENHO 91

5.6. CONSIDERAÇÕES FINAIS 92

6. DESENVOLVIMENTO DE APLICAÇÔES DE CÁLCULO AUTOMÁTICO PARA AS METODOLOGIAS APRESENTADAS 95

6.1. INTRODUÇÃO 95

6.2. OBJETIVOS 96

6.3. DEFINIÇÃO DE PRESCRIÇÕES E/OU TRABALHAR MISTURAS COM BASE NA ESPECIFICAÇÃO LNEC E 464 96

6.3.1. DEFINIÇÃO EXPEDITA DE PRESCRIÇÕES 96

6.3.2. CONSULTA DAS PRESCRIÇÕES POR TIPO DE CIMENTO 97

6.3.3. CONSULTA DAS PRESCRIÇÕES POR CLASSES NO CASO DAS COMBINAÇÕES 98

6.3.4. MISTURAS E ADIÇÕES 99

6.3.4.1. Verificação da composição de misturas 99

6.3.4.2. Formulação de misturas 101

6.4. METODOLOGIA BASEADA NO DESEMPENHO DA ESPECIFICAÇÃO LNEC E 465 102

6.4.1. ESTIMATIVA DE PROPRIEDADES DE DESEMPENHO QUE PERMITEM SATISFAZER A VIDA ÚTIL DE PROJETO PARA ESTRUTURAS DE BETÃO ARMADO E PRÉ-ESFORÇADO 102

6.4.2. ESTIMATIVA DA VIDA ÚTIL DE PROJETO DE ESTRUTURAS DE BETÃO ARMADO E PRÉ-ESFORÇADO COM BASE EM PROPRIEDADES DE DESEMPENHO ENSAIADAS 106

7. CASO DE APLICAÇÃO AO BETÃO AUTO-COMPACTÁVEL DESTINADO AO NOVO TERMINAL DE CRUZEIROS DO PORTO DE LEIXÕES 109

7.1. INTRODUÇÃO 109

7.2. CLASSIFICAÇÃO AMBIENTAL DA OBRA 111

7.3. COMPOSIÇÃO E RESULTADOS DE ENSAIOS 112

7.4. APLICAÇÃO DAS MEDIDAS PRESCRITIVAS DA ESPECIFICAÇÃO LNEC E 464 116

7.5. APLICAÇÃO DAS MEDIDAS BASEADAS NO DESEMPENHO DA ESPECIFICAÇÃO LNEC E 465 119

7.5.1.ESTIMATIVA DAS PROPRIEDADES DO DESEMPENHO COM BASE NAS CARACTERÍSTICAS DA ESTRUTURA 121

7.5.2.ESTIMATIVA DA VIDA ÚTIL DE PROJETO COM BASE NAS PROPRIEDADES DE DESEMPENHO ENSAIADAS 126

7.6. CONSIDERAÇÕES FINAIS 127

8. CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS 129

8.1. CONCLUSÕES 129

8.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS 130

BIBLIOGRAFIA 133

ANEXOS 137

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Interação a durabilidade e o desempenho da estrutura ……..……..7
Figura 2.2 – Vida útil pelo modelo de Tutti..... 9
Figura 2.3 – Vida útil e vida residual. ..... .10
Figura 2.4 – Fatores que interferem na porosidade e no transporte de massas..... .12
Figura 2.5 – Diferença entre permeabilidade e porosidade. 13
Figura 2.6 – Exemplos de agentes agressivos. 14
Figura 2.7 e Figura 2.8 – Mecanismos de degradação em diferentes secções da estrutura. 16
Figura 2.9 – Ataque de sulfatos numa laje..... 20
Figura 2.10 – Ataque ácido. 22
Figura 2.11 – Frente de carbonatação. 24
Figura 2.14 – Proteção das armaduras no betão..... 31
Figura 2.15 – Corrosão das armaduras após a dissolução da pelicula passiva..... 31
Figura 2.16 – Modelo de uma célula de corrosão. 32
Figura 2.17 – Estragos provocados pela corrosão. 33
Figura 2.18 – Formas de corrosão. 34
Figura 3.1 – Relações entre a NP EN 206-1 e as normas para a concepção e para a execução, as normas dos materiais constituintes e as normas de ensaio 48
Figura 3.2 – Metodologia para a avaliação da reatividade dos agregados. 53
Figura 4.1 – Sistematização da metodologia prescritiva da Especificação LNEC E 464 65
Figura 4.2 – Sistematização da verificação da composição de misturas conforme a Especificação LNEC E 464..... 71
Figura 4.3 – Sistematização da formulação de misturas de acordo com a Especificação LNEC E 464. 74
Figura 5.1 – Sistematização da metodologia baseada no desempenho da Especificação LNEC E465 93
Figura 6.1 – Organigrama de resumo do funcionamento dos programas. 95
Figura 6.2 – Janela inicial da aplicação para a Especificação LNEC E 464. 97
Figura 6.3 – Janela de apresentação das prescrições por tipo de cimento 98
Figura 6.4 – Janela de apresentação das medidas prescritivas de cada classe da combinação 99
Figura 6.5 – Janela de início da verificação da composição de misturas..... 100
Figura 6.6 – Etapa A.6: Apresentação da dosagem final de ligante e respetivos componentes. 100
Figura 6.7 – Janela de início da formulação de misturas. 101
Figura 6.8 – Etapa Final: Definição da quantidade e composição final da mistura. 102
Figura 6.9 – Etapa inicial do procedimento, definição da classe de exposição ambiental. 103

Figura 6.10 – Definição dos parâmetros da estrutura. 104

Figura 6.11 – Etapa final do processo com apresentação dos resultados. 104

Figura 6.12 – Análise da influência da espessura de recobrimento na resistência à carbonatação .. 105

Figura 6.13 – Definição de propriedades do desempenho para a carbonatação. 106

Figura 6.14 – Definição de propriedades do desempenho para os cloretos..... 107

Figura 6.15 – Apresentação final dos resultados do processo de cálculo. 107

Figura 7.1 – Modelo Computadorizado do novo edifício do Terminal de Cruzeiros do Porto de Leixões 109

Figura 7.2 – Representação em planta e em alçado da "Ilha Ecológica" do Porto de Recreio, em Leixões..... 111

Figura 7.3 e 7.4 – Elemento em BAC branco da "Ilha Ecológica" do Porto de Recreio, em Leixões. 112

Figura 7.5 – Introdução dos dados sobre a composição do ligante no programa para verificação da mistura. 115

Figura 7.6 – Resultados da verificação da mistura pelo programa. 115

Figura 7.7 – Medidas prescritivas aplicáveis ao elemento em estudo. 116

Figura 7.8 – Medidas prescritivas aplicáveis ao elemento em estudo para todos os tipos de cimentos do Quadro 1 da NP EN 197-1. 117

Figura 7.9 – Medidas prescritivas aplicáveis ao elemento em estudo para todos os tipos de cimentos do Quadro 1 da NP EN 197-1. 119

Figura 7.10 – Definição dos parâmetros no programa relativo à Especificação LNEC E 465..... 120

Figura 7.11 – Resultados das propriedades do desempenho para a classe XS3 no programa utilizado. 121

Figura 7.12 – Variações do coeficiente de difusão potencial dos cloretos com o tipo de cimento. 122

Figura 7.13 – Variações do coeficiente de difusão potencial dos cloretos com a espessura do recobrimento. 122

Figura 7.14 – Variações do coeficiente de difusão potencial dos cloretos com a razão água/ligante. 123

Figura 7.15 – Resultados d as propriedades do desempenho para a classe XC4 no programa utilizado. 124

Figura 7.16 – Variações do coeficiente de permeabilidade ao ar com o tipo de cimento..... 124

Figura 7.17 – Variações do coeficiente de permeabilidade ao ar com a espessura do recobrimento. 125

Figura 7.18 – Variações do coeficiente de permeabilidade ao ar com a razão água/ligante. 125

Figura 7.19 – Vida útil estimada para a estrutura com base nas propriedades do desempenho ensaiadas. 126

ÍNDICE DE QUADROS (OU TABELAS)

Quadro 2.1 – Fatores de degradação, processos envolvidos e degradação resultante 18

Quadro 3.1 – Custos com a construção em diferentes países 35

Quadro 3.2 – Categorias e classes de exposição na ACI 318:2008 37

Quadro 3.3 – Requisitos ao betão por classe de exposição no ACI 318:2008 39

Quadro 3.4 – Teor de ar total para betão exposto a ciclos de gelo/degelo 40

Quadro 3.5 – Limites de cloretos para construções novas 41

Quadro 3.6 – Requisitos para o betão sujeito à classe de exposição F3. 41

Quadro 3.7 – Requisitos que estabelecem a adequação das combinações de materiais de cimentação.. 42

Quadro 3.8 - Classes de agressividade ambiental. 43

Quadro 3.9 - Correspondência entre classe de agressividade e qualidade do betão. 44

Quadro 3.10 – Correspondência classe de agressividade ambiental e recobrimento nominal. 44

Quadro 3.11 – Valores indicativos do tempo de vida útil do betão. 49

Quadro 3.12 – Classes de exposição definidas na NP EN 206-1. 50

Quadro 3.13 – Valores limites das substâncias químicas agressivas para o betão. 52

Quadro 4.1 – Classes de exposição, descrição sumária e exemplos informativos. 58

Quadro 4.2 – Limites da composição e da classe de resistência do betão para uma vida útil de 50 anos. 61

Quadro 4.3 – Composição do clínquer de cimentos resistentes aos sulfatos. 62

Quadro 4.4 – Combinação de classes de exposição. 63

Quadro 4.5 – Prescrições isoladas das classes numa combinação de classes de exposição. 64

Quadro 4.6 – Propriedades, métodos e provetes de ensaio para o conceito de desempenho equivalente de um betão. 75

Quadro 5.1 – Mínimos índices de fiabilidade β 79

Quadro 5.2 – Fatores de segurança da vida útil. 79

Quadro 5.3 – Modelação da humidade relativa e tempo de molhagem do betão nas classes de exposição 81

Quadro 5.4 – Valores dos parâmetros k1 e n. 82

Quadro 5.5 – Valores dos parâmetros m, p e c para cálculo de K_{60}. 85

Quadro 5.6 – Concentração dos cloretos, C_R (% em massa do cimento). 86

Quadro 5.7 – Valores do parâmetro k_{temp}. 87

Quadro 5.8 – Valores dos parâmetros k_{vert} e k_{hor} para cálculo de CS. 87

Quadro 5.9 – Valores dos parâmetros $k_{D,C}$, $k_{D,RH}$, $k_{D,T}$ e n para cálculo de $D_a(t)$. 88

Quadro 5.10 – Níveis de corrosão. 90

Quadro 5.11 – Classes de exposição e níveis de corrosão das armaduras. 90
Quadro 7.1 – Materiais e dosagens da composição otimizada do betão. 113
Quadro 7.2 – Resultados de ensaios (laboratório e obra) para a composição otimizada. 114
Quadro 7.3 – Quadro comparativo entre valores prescritos e valores reais. 118

SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

R_{C65} – Resistência à carbonatação do betão (kg.ano/m^5)

K_{60} – Coeficiente de permeabilidade ao ar (x10^{-16} m^2)

D_0 – Coeficiente de difusão potencial dos cloretos (10^{-12} m/s)

FEUP – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

LABEST – Laboratório da Tecnologia do Betão e do Comportamento Estrutural

CC – Classe de consequência da estrutura

TdM – Tempo de molhagem

HR – Humidade relativa

BAC – Betão auto-compactável

1
INTRODUÇÃO

1.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

Nos últimos anos a durabilidade de estruturas de betão armado e pré-esforçado tem recebido atenção crescente por parte dos investigadores. As manifestações patológicas detetadas nas estruturas, decorrentes de falhas a nível do projeto ou do processo de execução, justificam as crescentes preocupações com a segurança estrutural e com os custos de manutenção, reforço e recuperação das estruturas existentes.

A durabilidade das estruturas de betão é diretamente dependente da facilidade com que os agentes agressivos conseguem penetrar e se deslocar no interior do betão, mais concretamente no betão de recobrimento que serve de proteção das armaduras. Os agentes agressivos podem infiltrar-se no betão de recobrimento sob diversas formas, sendo exemplos, a difusão e a absorção capilar, influenciados por diferentes condições existentes como sejam as características físicas e químicas do betão, a microestrutura da pasta de cimento hidratada, a concentração superficial dos agentes agressivos e as condições de exposição ambiental a que a estrutura estará sujeita.

Embora considerando que, adequadamente doseado, transportado, lançado e curado, o betão possua uma boa capacidade de resistir, na maioria dos casos, às ações ambientais, falhas prematuras nas estruturas de betão realmente ocorrem e proporcionam informações valiosas para o controle dos fatores responsáveis pela falta de durabilidade. Das inúmeras causas que podem motivar a deterioração das estruturas, destacam-se as relacionadas com a deficiente consideração dos condicionalismos ambientais na fase de projeto.

A correta análise da exposição ambiental a que a estrutura estará sujeita permite definir medidas preventivas no dimensionamento da estrutura, a nível da composição do betão ou da espessura de recobrimento, por exemplo, que permitam satisfazer a vida útil pretendida para a estrutura. Tendo em atenção esta prioridade, a consideração da exposição ambiental, a regulamentação em vigor estabelece metodologias que permitem ao responsável pelo projeto de estruturas conceber a sua obra para que esta apresente a durabilidade necessária, exibindo para além da resistência às ações mecânicas a resistência também às ações ambientais.

A entrada em vigor do Decreto-Lei n.º 301/2007 de 23 de Agosto declara que para a sua colocação em obra, o betão destinado a ser colocado no mercado nacional deve ser especificado e produzido de acordo com as disposições presentes na Norma NP EN 206-1 – "Betão. Parte 1: Especificação, desempenho, produção e conformidade". A Norma NP EN 206-1, por sua vez, define a figura do especificador do betão como responsável pela especificação do betão fresco e endurecido, isto é, o responsável pela compilação final de requisitos técnicos documentados dados ao produtor em termos

de desempenho ou de composição. Esta norma, entre outros requisitos, define as classes de exposição relacionadas com as ações ambientais no local de utilização do betão e introduz as Especificações LNEC E 464 e LNEC E 465 como regulamentação a ser seguida para assegurar a vida útil pretendida face a essas ações.

Estas especificações definem as duas metodologias de abordagem que podem ser adotadas para consideração das condicionantes ambientais, nomeadamente, uma metodologia prescritiva impondo valores limites para a composição e classe de resistência do betão, e uma metodologia baseada na estimativa das propriedades de desempenho que permitem satisfazer a vida útil pretendida.

Considerando isso, o presente trabalho tem por objetivo de desenvolver ferramentas destinadas a facilitar a aplicação das metodologias prescritivas e baseadas no desempenho ao nível do dimensionamento de estruturas de betão armado e pré-esforçado e ao nível da composição de betão, atendendo às classes de exposição ambiental definidas na NP EN 206-1, no Eurocódigo 2, bem como das Especificações LNEC E 464 e LNEC E 465.

1.2. ORGANIZAÇÃO

A presente dissertação encontra-se estruturada da seguinte forma:

- Capítulo 1 – introdução ao tema da dissertação, descrevendo os objetivos e a estrutura adotada.
- Capítulo 2 – apresentação geral da temática da durabilidade e vida útil das estruturas de betão armado, com definição de conceitos e termos empregues no trabalho, noções de durabilidade, mecanismos de deterioração/degradação do betão armado, compreensão da problemática da vida útil das estruturas e interação ambiente-estrutura. Descrição dos vários mecanismos que afetam a durabilidade e vida útil do betão armado para posterior análise da forma como são tratados na legislação em vigor.
- Capítulo 3 – revisão das principais normas internacionais, no que se refere à consideração dos efeitos das ações ambientais.
- Capítulo 4 – neste capítulo é efetuada uma discussão da metodologia prescritiva na abordagem da durabilidade das estruturas, segundo a Especificação LNEC E 464. É também feita a sistematização do procedimento de cálculo implementado no programa desenvolvido.
- Capítulo 5 – é feito uma análise à metodologia baseada na estimativa das propriedades do desempenho que permitem satisfazer a vida útil pretendida, acompanhada de uma sistematização do procedimento de cálculo implementado no programa desenvolvido.
- Capítulo 6 – desenvolvimento de folhas de cálculo automático destinadas a facilitar a definição das exigências ao nível do dimensionamento de estruturas de betão armado e pré-esforçado e ao nível da composição de betão de acordo com a atual regulamentação aplicável.
- Capítulo 7 – aplicação das folhas de cálculo desenvolvidas na verificação de uma composição de betão auto-compactável branco aplicada numa estrutura no Porto de Leixões, junto ao futuro Terminal de Cruzeiros.
- Capítulo 8 – apresentação de uma síntese das principais conclusões retiradas da realização deste trabalho, e de eventuais recomendações para o futuro.
- Anexo A1 – apresenta as Normas dos constituintes do betão e Especificações LNEC relacionadas com a durabilidade do betão e com os seus constituintes
- Anexo A2 – exibe a listagem das Normas e Especificações LNEC de ensaio do betão
- Anexo A3 – lista as Normas e Especificações LNEC relacionadas com betões ou com a execução de obras em betão
- Anexo A4 – corresponde ao guia de utilização das aplicações de cálculo desenvolvidas. Este guia fornece o procedimento de uso da aplicação e encontra-se organizado de modo a funcionar de forma independente deste relatório.

2
ENQUADRAMENTO: DURABILIDADE E VIDA ÚTIL DE ESTRUTURAS

2.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

A NP EN 206-1 de 2007 define o betão como "material formado pela mistura de cimento, agregados grossos e finos e água, com ou sem a incorporação de adjuvantes e adições, que desenvolve as suas propriedades por hidratação do cimento" [2]. O seu aparecimento e o seu uso como material de construção são um marco na história da construção e do próprio desenvolvimento mundial.

A facilidade de obtenção dos materiais que o constituem, associada a uma rápida produção e relativo baixo custo possibilitaram ao betão, e mais concretamente ao betão armado, tornar-se o mais frequente e principal material utilizado na construção em todo mundo criando a oportunidade de construir de uma forma mais rápida, audaciosa e económica.

O estudo contínuo das suas propriedades, constituintes e comportamento estrutural permitiu o desenvolvimento de novos materiais e métodos de cálculo embora nem sempre acompanhados dos devidos avanços na qualidade dos processos construtivos e de formação da mão-de-obra [22].

Em consequência da forma como era utilizado no início da sua aplicação como material construtivo, isto é, em peças com maiores dimensões, maiores dosagens de cimento, espessuras de recobrimento elevadas e colocação mais cuidada o betão definia-se como tendo baixa resistência e uma durabilidade maior, embora tal durabilidade não era explicitamente considerada mas era como que uma consequência do betão que se fabricava então, cujo critério de aceitação era baseado na resistência [21].

Durante muito tempo, o betão foi considerado um material extremamente durável, opinião esta baseada em obras muito antigas ainda em bom estado de conservação [23]. De facto a possibilidade das estruturas de betão apresentarem uma vida útil de 50 anos ou mais é bastante real, contudo a observação de obras recentes permite constatar que muitas destas estruturas estão a degradar-se a um ritmo acelerado levando a intervenções significativas numa idade ainda jovem da estrutura [24]. Tendo em conta que mais de 50% dos custos de construção, nos países desenvolvidos, devem-se a reparação e reabilitação de estruturas [25] a situação torna-se ainda mais alarmante.

Um dos principais problemas responsável pela redução da vida útil das estruturas do betão armado é a corrosão das armaduras, sendo responsável por mais de 95% dos casos de degradação destas [25]. A corrosão das armaduras, não obstante ser um processo lento e que permite em geral tomar medidas corretivas atempadamente, ocorre com bastante frequência por negligência ou subvalorização da gravidade do problema por parte dos intervenientes. Seus mecanismos e causas já foram

compreendidos. Várias soluções já estão disponíveis e a cada dia novos produtos surgem no mercado e outros tantos estão em estudo, seja para a prevenção ou para terapia da corrosão [24].

Atualmente o betão é reconhecido como o melhor meio de proteção do aço contra os agentes agressivos corrosivos, tanto que esta característica já lhe é exigida a par da resistência às ações estruturais. A regulamentação atual diz explicitamente que as estruturas devem ser projetadas para terem adequada resistência estrutural, utilização e durabilidade [5]. Este princípio básico presente nos Eurocódigos retrata os requisitos fundamentais exigidos ao betão como material estrutural, nomeadamente, resistência à ação das cargas a que estará sujeito e resistência à ação ambiental com o decorrer do tempo, isto é, adequada durabilidade. Esta adequada durabilidade das estruturas que garanta a vida útil pretendida está diretamente relacionada com o ambiente em que a estrutura se insere. São os condicionalismos ambientais existentes no local onde a estrutura será construída que irão afetar a sua durabilidade, resultado dos ataques ao betão e ao aço presentes na mesma.

Uma melhor perceção de como as condicionantes ambientais afetam o projeto das estruturas é possível, compreendendo como funciona o processo de degradação, quais os mecanismos suscetíveis de ocorrer em cada ambiente e em que condições estes se desencadeiam.

2.2. DURABILIDADE

A durabilidade é uma propriedade característica de qualquer material, quer seja construtivo ou não, associada geralmente ao seu tempo limite de utilização.

Nas estruturas de betão armado e pré-esforçado a durabilidade é amplamente aceite como a capacidade da estrutura manter a operacionalidade ao longo de um período de tempo específico, ou como uma característica da estrutura que traduz a sua capacidade de funcionar durante um certo tempo com a correspondente segurança e características requeridas, que forneçam as devidas condições de serviço [26].

A durabilidade geral de uma estrutura não é homogénea, pois esta resulta da conjugação de diferentes materiais que apresentam diferentes durabilidades individuais, sendo o exemplo mais claro disso o caso das pontes e viadutos. Nestas estruturas o tabuleiro principal, os encontros, fundações e pilares podem durar 100 ou mais anos mas, por exemplo, para os aparelhos de apoio esta durabilidade não se estende muito para além dos 20 ou 25 anos, exigindo a sua substituição frequente. Esta característica permite verificar que os requisitos de durabilidade e manutenção de estruturas de betão devem estar relacionados a um projeto de vida útil prevista, que incorpora um programa de manutenção devidamente planeada [30].

Além da durabilidade individual dos materiais outro fator que afeta diretamente a durabilidade geral da estrutura é a forma de execução da mesma. As boas práticas de execução e acabamento são essenciais para uma estrutura ser durável. Tal aplica-se diretamente ao betão que quando bem concebido, compactado e curado pode ser um material muito durável. No entanto, o betão pode também apresentar danos graves ao fim de apenas alguns anos de idade. Ao contrário de outros materiais de construção produzidos em fábrica, com apenas pequenas diferenças nas dosagens da mistura ou razão água/cimento podem produzir tanto um betão excecionalmente durável como um betão de baixa qualidade, poroso e permeável [30].

A complexidade que acompanha a definição da durabilidade do betão resulta precisamente de esta ter de ser considerada de forma correta a diferentes níveis, mais concretamente:

- projeto estrutural;

- materiais constituintes e composição;
- execução;
- cura.

Dando a devida importância à durabilidade nestes níveis é possível garantir o correto desempenho da estrutura, isto é, a capacidade de uma estrutura satisfazer os fins para que foi projetada, sob os pontos de vista de segurança, funcionalidade e aspeto geral. A interação entre a durabilidade e o desempenho da estrutura é devidamente ilustrada na Figura 2.1.

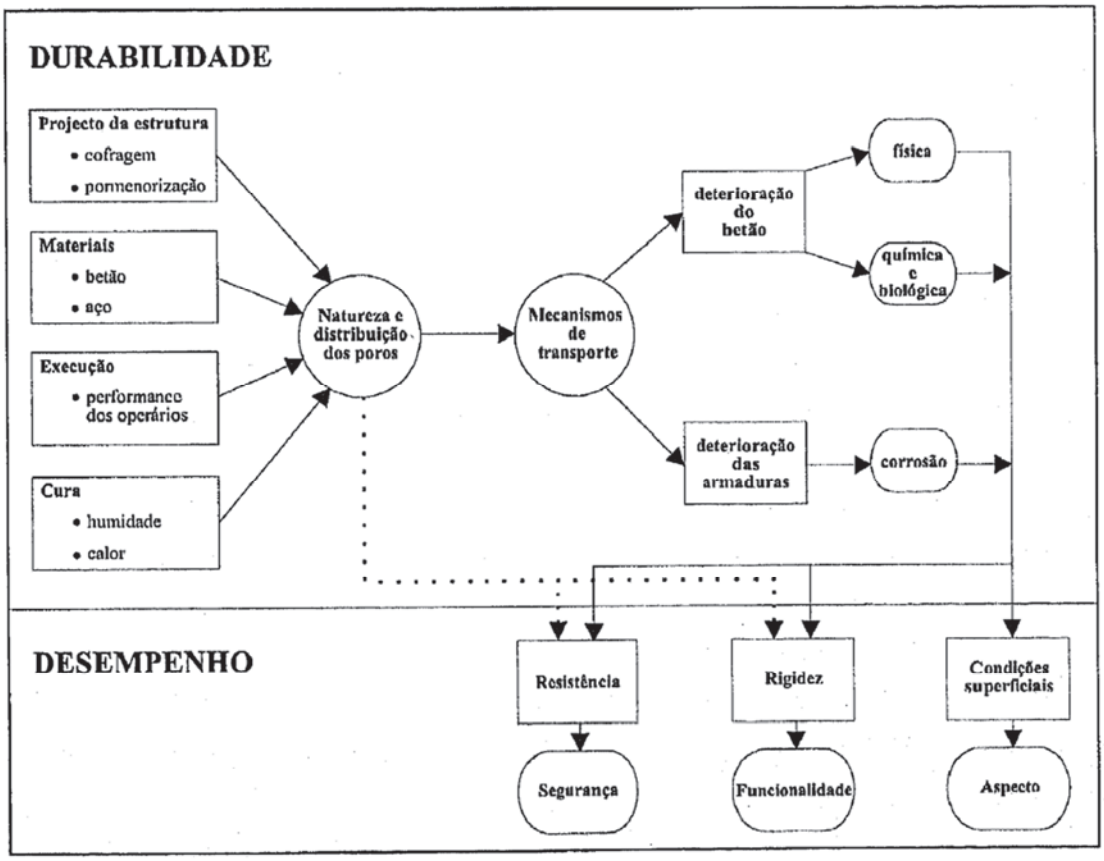


Figura 2.1 – Interação a durabilidade e o desempenho da estrutura [21].

As inter-relações entre os principais fatores que influenciam a durabilidade e as suas consequências em termos de desempenho podem-se resumir da seguinte maneira [21]:

- projeto estrutural (principalmente pormenorização e cofragem);
- materiais (principalmente betão e armaduras);
- execução (principalmente desempenho dos operários);
- cura (principalmente humidade e calor).

Estes quatro fatores influenciam fortemente a qualidade da estrutura do betão no sentido em que definem a natureza e distribuição dos poros e, portanto, a maior ou menor influência dos mecanismos de transporte de substâncias nessa rede porosa, levando a uma deterioração física, química e/ou

biológica mais ou menos rápida do betão assim como à corrosão das armaduras, isto é, a uma maior ou menor durabilidade da estrutura de betão [21].

É evidente que a durabilidade de uma estrutura de betão armado (ou pré-esforçado) dependerá quer da deterioração física, química e/ou biológica do betão (de recobrimento), quer da corrosão das armaduras, podendo, qualquer desses dois fatores, comprometer tanto a estrutura, em termos de resistência e rigidez (dos materiais, das secções transversais e dos vários elementos estruturais que compõem essa estrutura) como também as condições superficiais e, assim, definir o desempenho dessa estrutura. Uma estrutura de betão armado sendo suscetível de se degradar devido sobretudo à deterioração do betão de recobrimento ou à corrosão da armadura como consequência do meio ambiente em que se encontra, é habitual, hoje em dia a separação em termos de durabilidade, de betão resistente a meios agressivos que ataquem sobretudo o betão de recobrimento e betão resistente a meios agressivos que ataquem principalmente as armaduras [21].

A previsão da durabilidade das estruturas e consequentemente do seu desempenho necessita, portanto, da avaliação e classificação da agressividade do meio ambiente em que se insere e do conhecimento do betão e da própria estrutura.

2.3. VIDA ÚTIL

Uma propriedade das estruturas associada à sua durabilidade é a vida útil pretendida ou projetada para a mesma. De facto, a durabilidade da estrutura é estabelecida de modo a atingir uma dada vida útil pretendida. Além da durabilidade, a vida útil de uma estrutura condiciona a escolha de outras propriedades fundamentais no projeto da mesma, sendo apresentada nas mais importantes normas de projeto.

A NP EN 206-1:2007 estabelece a vida útil como o "período de tempo durante o qual o desempenho do betão na estrutura se mantem a um nível compatível com a satisfação dos requisitos de desempenho da estrutura, desde que haja uma adequada manutenção" [2]. Por sua vez, o Eurocódigo 0 apresenta uma definição do tempo vida útil como sendo o "período durante o qual se pretende que uma estrutura ou parte da mesma poderá ser utilizada para as funções a que se destina, com a manutenção prevista mas sem necessidade de grandes reparações" [5]. Tanto numa como outra fazem valer requisitos diferentes para estruturas de vida útil diferentes.

Assim sendo é prioritário para uma estrutura que a sua vida útil seja estabelecida e que todos os fatores sejam estabelecidos de modo a atingir esta vida útil. Posto isto, fazem-se duas distinções entre a vida útil pretendida ou expectável, baseada na vontade e expectativa do dono de obra, e a vida útil real/efetiva, dependente das condições de exposição da estrutura, qualidade dos materiais empregues, do projeto e dos materiais e do nível de manutenção empregue.

Em geral os valores comuns definidos nas normas e aplicáveis no projeto para a vida útil variam entre os 50 (para edifícios e outras estruturas comuns) e os 100 anos (para barragens, pontes e outras estruturas de engenharia civil). Contudo um curioso exemplo de uma exceção a tais situações genéricas é apresentado por Mehta e Langley [27], com o caso de um templo Hindu, construído em Kauai no Havai, onde uma vida útil mínima de 1000 anos foi requisitada no contrato.

Devido a esta condição da vida útil variar de estrutura para estrutura, e da necessidade de a cumprir qualquer que seja o seu valor, este é um aspeto fundamental a definir no projeto. Na prática, existem três tipos diferentes de vida útil, dependendo do tipo de desempenho considerado: a vida útil técnica é o tempo de serviço até quando o estado aceitável é atingido (falha). Vida útil funcional é o tempo

esperado em serviço até que a estrutura já não cumpra os requisitos funcionais. Vida útil económica é o tempo de serviço até que a substituição da estrutura é economicamente mais justificada do que mantê-la em serviço [26].

O problema da vida útil assume-se como essencialmente técnico abrangendo os aspetos do desempenho estrutural, manutenção (operacionalidade) e estética, assumindo que a estrutura mantém as características iniciais de projeto até atingir um certo limite máximo de grau de deterioração. Atingido este limite há que realizar intervenções de modo a restabelecer ou superar as condições de segurança, funcionalidade e estética iniciais.

Como já mencionado anteriormente, uma das grandes causas da deterioração de estruturas e consequente perda de vida útil é a corrosão das armaduras por despassivação. Este problema pode resultar da carbonatação ou penetração de cloretos no betão de recobrimento. A ocorrência da corrosão durante a vida útil da estrutura é usualmente considerada através do modelo de Tutti (Figura 2.2), admitindo a vida útil composta por dois períodos. Estas duas fases da deterioração são:

- Período de iniciação da corrosão que corresponde ao tempo necessário à destruição da pelicula passivante, que em geral ocorre por carbonatação do betão de recobrimento e/ou por penetração de cloretos até à armadura [21];
- Período de propagação em que a corrosão evolui até ser atingido um limite de deterioração inaceitável do ponto de vista de segurança, funcionalidade ou estético, em que portanto, termina a vida útil dessa estrutura a não ser que se proceda a reparação da mesma [21].

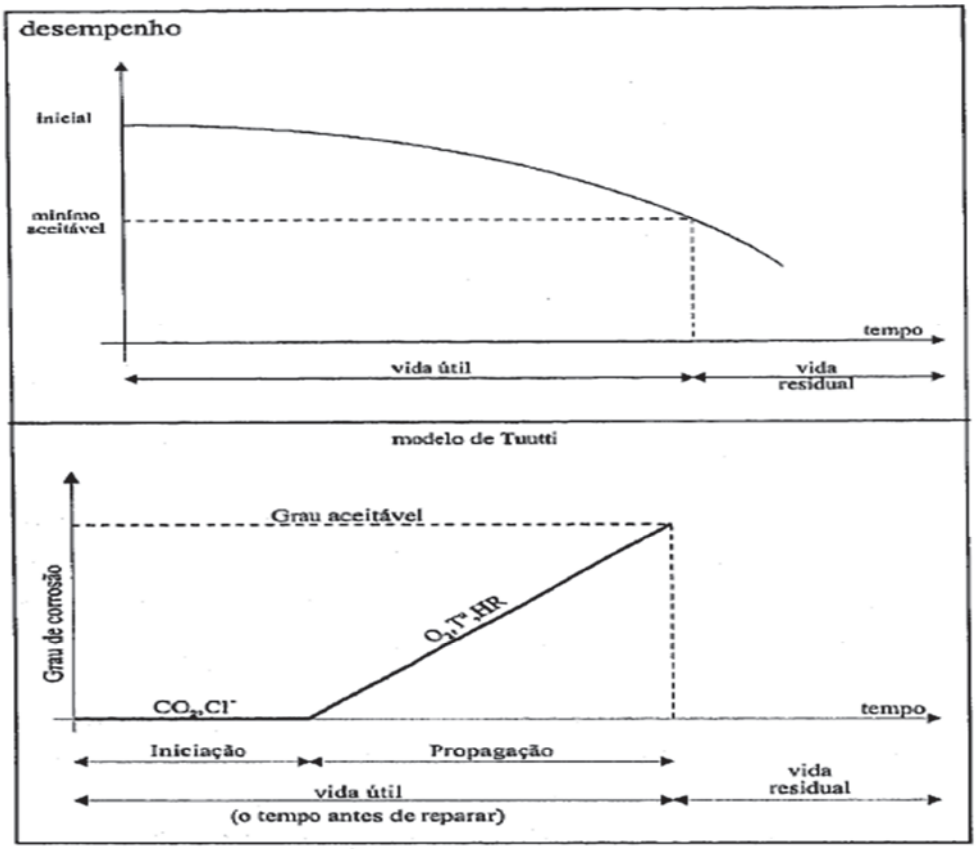


Figura 2.2 – Vida útil pelo modelo de Tutti [21].

Caso se verifique a viabilidade, após inspeção, de reparações na estrutura, esta poderá adquirir uma nova vida útil, prolongando assim o seu funcionamento (Figura 2.3).

Os mecanismos de deterioração da estrutura, que afetam a durabilidade desta, são abordados adiante nesta secção, sendo a previsão da vida útil de estruturas abordada de forma mais abrangente no Capítulo 5.

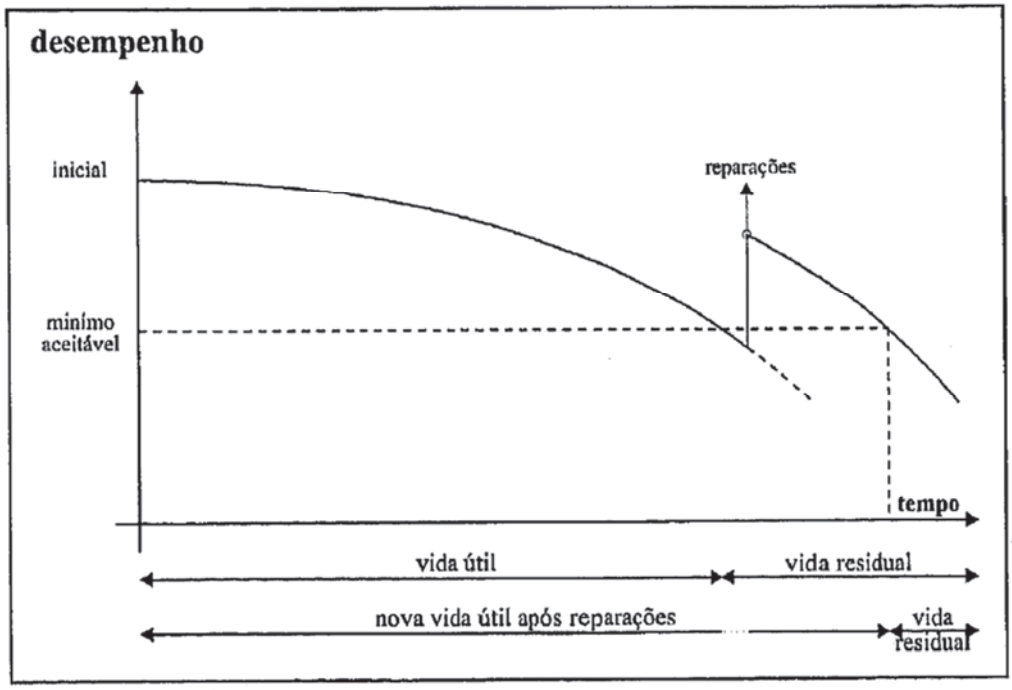


Figura 2.3 – Vida útil e vida residual [21].

2.4. MECANISMOS QUE AFETAM A DURABILIDADE DAS ESTRUTURAS

Uma metodologia prática de abordar o estudo da durabilidade nas estruturas consiste em caracterizar as condições de exposição em que esta se encontra e, posteriormente especificar os requisitos de durabilidade que satisfaçam tais condições.

A caracterização das condições de exposição engloba:

- a identificação das substâncias agressivas, o modo como estas se movimentam e acumulam relativamente à estrutura;
- a determinação de quais os mecanismos de transporte e quais os parâmetros que controlam esses mecanismos;
- a determinação de quais as reações envolvidas na deterioração e quais os parâmetros que controlam essas reações [29].

Estabelecida esta caracterização avança-se com a especificação dos requisitos de durabilidade, selecionando as medidas de proteção que previnem ou controlam os mecanismos de deterioração [29]. Deste modo torna-se imperativo conhecer quais os mecanismos que afetam a durabilidade das estruturas para a correta especificação dos requisitos de durabilidade a cumprir.

2.4.1. REDE POROSA

O desempenho do betão, como barreira de diminuição do transporte de agentes potencialmente causadores da corrosão das armaduras, está diretamente relacionado com a sua porosidade. A água está envolvida na generalidade dos processos de deterioração e em sólidos porosos como o betão, a permeabilidade do material à água está, habitualmente, ligada à sua degradação. Analisar a influência do volume total de vazios e das dimensões dos poros nas propriedades de transporte de água, de iões cloreto e de dióxido de carbono no betão é por isso justificável no estudo da durabilidade das estruturas constituídas por este material.

Os agentes agressivos são transportados para o interior do betão através da humidade fazendo com que a taxa de penetração de água no betão regule a taxa de transporte de agentes agressivos por meio da absorção e permeabilidade. Esta humidade na forma de vapor de água, além da água no estado líquido, contribui para a entrada dos agentes, sobretudo do gás carbónico, visto ser a difusão o principal processo através do qual o dióxido de carbono penetra no betão, transpondo os poros com ar e com água. Por outro lado, poros muito secos favorecem a difusão, porém dificultam a reação de carbonatação [32].

É evidente então a importância da humidade no desenvolvimento da taxa de carbonatação assim como da entrada de cloretos. A proteção da armadura passará por isso necessariamente por um controle da entrada dos agentes agressivos a par da humidade. A proteção das estruturas de betão pode ser realizada por diversos métodos e técnicas, como sejam os casos da proteção catódica, da utilização de revestimentos sob a estrutura ou por melhoria do desempenho do betão enquanto escudo resistente ao transporte de agentes agressivos, através da melhoria da sua rede porosa.

O betão é um material poroso devido à impossibilidade de preencher o seu volume inteiramente com sólidos, sendo esta porosidade medida não só pelo volume de vazios na massa endurecida, mas também pelo tipo, tamanho e distribuição desses poros. Trabalhando ao nível da diminuição do volume total de vazios ou da modificação do tamanho dos poros consegue-se uma mudança na rede porosa do betão, permitindo a melhoria discutida.

A explicação até então apresentada relaciona a rede porosa do betão diretamente com a sua composição, contudo esta não é a única condição que a define. As condições de cura e de exposição do betão também contribuem para a definição da sua rede porosa. Os betões expostos ao ar apresentam porosidade diferente nas regiões próximas à superfície quando comparada com as regiões mais internas, devido às diferenças no processo de hidratação e às reações químicas que podem ocorrer entre as substâncias presentes no meio ambiente e no betão, como é o caso da reação de carbonatação [32]. Esta reação é abordada mais profundamente nas secções seguintes.

O uso de adições minerais, como escórias de alto-forno e pozolanas, faculta a possibilidade de obtenção de betões com dimensões dos poros menores e consequente maior durabilidade.

Atualmente, sabe-se que a porosidade ao redor dos agregados é maior que nas regiões mais distantes destes elementos, fazendo com que a porosidade da pasta sem agregado seja diferente daquela com agregado [32].

Um outro fato a ser considerado é a interação que existe entre o teor de humidade ambiente e a porosidade (ver Figura 2.4), o primeiro influindo na hidratação do cimento e na ocorrência de reações químicas e em consequência na porosidade e esta afetando a quantidade de humidade retida no material. [32].

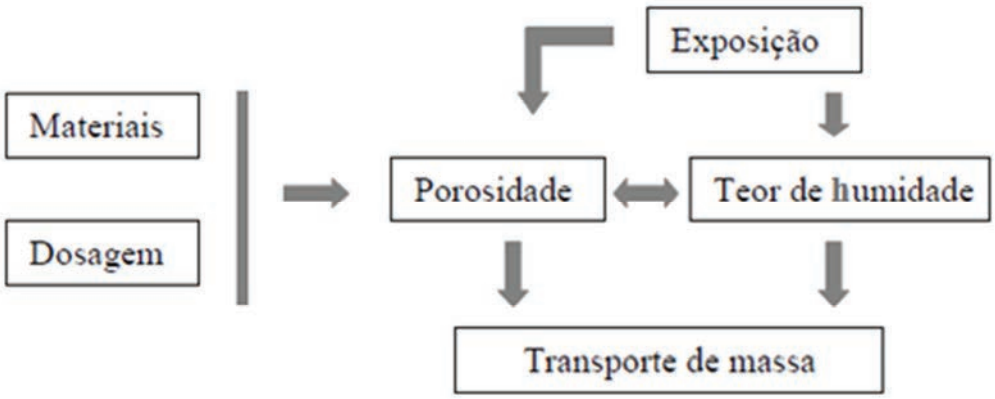


Figura 2.4 – Fatores que interferem na porosidade e no transporte de massas [32].

Portanto, observa-se que modificar a porosidade do betão pode ser uma solução económica, eficiente e simples para aumentar a durabilidade do betão armado ou pré-esforçado.

2.4.2. MECANISMOS DE TRANSPORTE

Em termos de durabilidade, existem dois fatores decisivos que afetam a maioria dos processos químicos e físicos que ocorrem nas estruturas de betão, nomeadamente, os mecanismos de transporte através da rede porosa e das fissuras do betão endurecido e a presença de água.

A durabilidade depende da facilidade com que os gases, líquidos e substâncias dissolvidas penetram e se movimentam na massa do betão endurecido, sendo distinguidos três mecanismos básicos de ocorrência desse transporte:

- difusão;
- sucção capilar;
- permeação ou permeabilidade (penetração por pressão hidráulica).

A difusão é um mecanismo que corresponde à penetração de iões líquidos ou gases causada por gradientes de concentração, só se verificando na ausência de gradientes de pressão hidráulica [21]. Este mecanismo aplica-se tanto a líquidos como a gases e a substâncias dissolvidas em meio líquido, sendo o principal mecanismo de transporte em ambientes húmidos. Neste tipo de ambiente, dependendo da humidade relativa do ar, os poros maiores da massa endurecida do betão encontram-se parcialmente preenchidos por ar [23].

A sucção capilar corresponde a entrada de água na rede porosa do betão devido a forças capilares que resultam da diferença de pressão entre a superfície livre da água no exterior do betão e a sua superfície nos poros capilares e depende do diâmetro capilar [21]. Este mecanismo ocorre quando o betão está sujeito a ciclos de molhagem e secagem, como no caso das chuvas, onde os poros podem atingir rapidamente o nível de saturação, provocada pelo excedente de água. Neste caso, o transporte de gases fica praticamente impedido. De salientar que a água é absorvida pelo betão numa velocidade muito maior do que é libertada por evaporação [23].

A permeação ou permeabilidade (também referida como penetração por pressão hidráulica), no sentido restrito, diz respeito ao caudal escoado através do sistema poroso, em condições de saturação, causado por um gradiente de pressão (gradiente hidráulico, no caso de betão submerso) [21]. No caso

de estruturas imersas, a penetração da água iniciada pela sucção capilar, é possivelmente acelerada pela pressão hidráulica. Uma grande quantidade de água poderá ser continuamente transportada, desde que haja uma superfície exposta ao ar, por onde a água possa evaporar. Esta água pode carregar agentes dissolvidos (tais como, cloretos, sulfatos etc.), os quais são deixados no betão nas regiões onde ocorre a evaporação, podendo ocasionar altos níveis de concentração. Tais agentes, inicialmente dissolvidos, cristalizam-se nas superfícies do betão, acarretando eflorescências. No betão, as forças expansivas devidas à cristalização de sais apenas causam pequenos problemas. Muito mais significativo é o efeito químico da concentração de substâncias agressivas [23].

A velocidade, extensão e os efeitos dos mecanismos de transporte são principalmente afetados pelas condições ambientais de exposição (temperatura, humidade, etc.), estrutura porosa e distribuição das fissuras do betão, sendo estas duas últimas as principais condicionantes à vulnerabilidade ao ataque por processos químicos e físicos.

Identificado no betão, o componente mais suscetível ao ataque como sendo a pasta de cimento, relaciona-se a intensidade do ataque diretamente à porosidade desta pasta. Se esta for densa, o ataque é restringido à superfície do betão, avançando de forma lenta no tempo para o seu interior, mas se for porosa, beneficia a penetração dos agentes agressivos, tornando o ataque mais agressivo (Figura 2.5).

A resistência ao ataque químico por parte do betão, depende de todos os fatores que afetam a sua porosidade e que também interferem na sua permeabilidade e capacidade de absorção, como sejam os casos da relação água/cimento, da quantidade, composição e finura do cimento, da quantidade, forma e dimensões dos agregados, do grau de hidratação do cimento, da aderência entre a pasta e o agregado, da presença e quantidade de adições e de aditivos, da qualidade da execução, entre outros fatores.

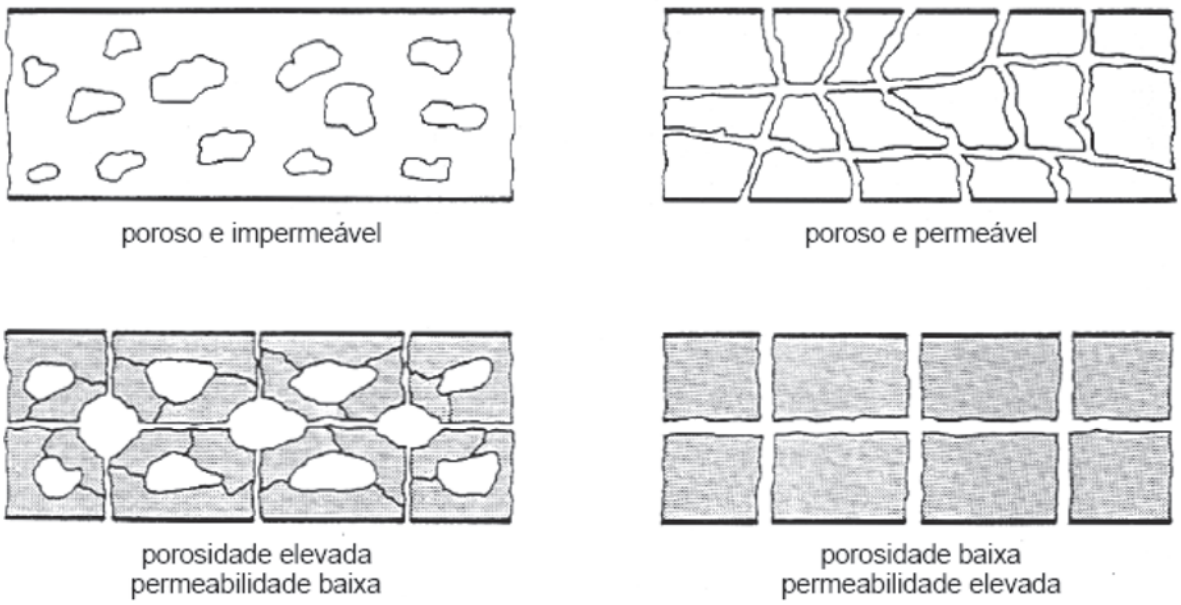


Figura 2.5 – Diferença entre permeabilidade e porosidade [21].

Volta-se a referir a importância que uma execução cuidada tem para a durabilidade do betão, principalmente com relação às atividades de mistura, transporte, lançamento e cura, evitando-se segregações, exsudação excessiva e formação de fissuras. A par desta execução cuidada, a adoção de

uma baixa relação água/cimento e de um certo teor mínimo de cimento na dosagem são as medidas mais eficazes para garantir um baixo índice de permeabilidade através de uma alta densidade para o betão. A utilização de cimentos pozolânicos e de alto-forno assim como de aditivos plastificantes ou incorporadores de ar são formas de reduzir a permeabilidade do betão.

Além da porosidade do betão, a existência de fissuras também facilita a entrada de agentes agressivos na estrutura. Estas ocorrem sempre que a tensão de tração no betão for maior do que a sua resistência à tração, que é reconhecidamente bastante baixa. A ocorrência de fissuração pode ser provocada por diversas circunstâncias, podendo surgir antes da aplicação do carregamento e antes do endurecimento da massa de betão. Elas podem ser causadas por movimentos gerados dentro do próprio betão (assentamento plástico diferencial, retração plástica superficial, retração por secagem, movimentações de origem térmica), por expansão de materiais embebidos no betão (corrosão das armaduras, reações álcalis-agregado) ou ainda por condições externas impostas (carregamentos excessivos, vibrações não previstas no projeto, armaduras insuficientes ou mal posicionadas, assentamento diferencial do solo de fundação), entre outras causas [23].

Conclui-se assim que o betão, para que seja um material durável, deve possuir elevada compacidade e fissuração devidamente controlada.

2.4.3. EXPOSIÇÃO AMBIENTAL

O ambiente onde a estrutura se insere exerce uma enorme influência na sua durabilidade. É o local de construção da estrutura e as interações entre esta e os agentes presentes neste meio ambiente que determinam a deterioração do betão e a corrosão das armaduras, afetando a durabilidade da estrutura.

Conforme o ambiente onde a estrutura está inserida, podem existir diferentes fatores ambientais que afetam a sua durabilidade, como a humidade relativa, a temperatura, o vento, a agressividade da água, a poluição do ar, etc. (Figura 2.6). Alguns destes fatores, nomeadamente a temperatura, a humidade relativa e o vento atuam tanto no betão fresco como no betão endurecido, podendo originar retração do betão, aparecendo tensões que causam a fissuração do betão, beneficiando a entrada de agentes agressivos como já referido na secção anterior.

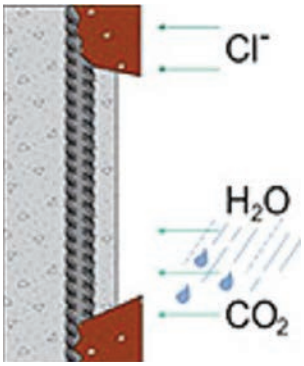


Figura 2.6 – Exemplos de agentes agressivos [28].

A capacidade destes fatores poderem combinar-se, além de atuarem isoladamente, aumenta de forma significativa o ataque à estrutura, aumentando a sua degradação. Um exemplo disso é o caso das subidas de temperatura que intensificam as reações na estrutura e a correspondente velocidade de

degradação da mesma. O betão comum de cimento Portland não é capaz de absorver as deformações provocadas pelas variações térmicas. Assim, variações de grande amplitude térmica provocam retração no betão, dando origem aos tais esforços de tração que originam fissuração. O vento e a radiação solar influenciam na temperatura interior do betão [34]. Outro exemplo é a relação entre a presença de dióxido de carbono que conduz à carbonatação do betão de recobrimento e a humidade relativa. A humidade relativa tem efeitos diferentes nas armaduras conforme o efeito do dióxido de carbono no betão de recobrimento, isto é, se este ainda não está carbonatado ou se, pelo contrário a carbonatação já despassivou as armaduras encontrando-se estas em processo de corrosão (na realidade, a velocidade de carbonatação é máxima em ambientes com humidades relativas de 50-70% [29]).

Sendo algumas das características do ambiente relativamente fáceis de determinar por processos comuns (temperatura, humidade relativa do ar, etc.), é possível considerar-se, erroneamente, que a determinação da exposição ambiental de uma estrutura é algo banal e menosprezar o seu efeito. Contudo, para caracterização da agressividade do ambiente a que está exposto um determinada estrutura é necessário ter em consideração não só a humidade e temperatura, como também os contaminantes que interferirão no ataque ao betão e às armaduras, como os cloretos, o dióxido de carbono, sulfatos, etc. [21].

É preciso ter em conta ainda que além da definição do macro ambiente geral onde a estrutura se insere é preciso identificar os microambientes diferentes para cada secção/membro da estrutura, podendo estes variar consideravelmente.

Exemplificando, no local de exposição (macro ambiente) podem identificar-se as condições:

- de agressividade do meio ambiente, destacando-se:
  - existência de água do mar;
  - existência de agentes de remoção de gelo;
  - possibilidade de ataque químico.
- temperatura / humidade
  - os ciclos de gelo/desgelo;
  - os ciclos de molhagem/secagem,
  - clima tropical (aproximadamente, cada subida de 10ºC duplica a taxa de corrosão).

Identificado o macro ambiente, para cada secção/membro da estrutura define-se o seu microambiente próprio, por exemplo:

- ambiente marinho (Figura 2.7 e Figura 2.8):
  - submerso;
  - zona de maré;
  - zona de rebentação das ondas;
  - zona atmosférica.
- orientação geográfica:
  - N-S-E-O, orientada à terra ou ao mar.
- orientação da superfície
  - empoçamento (retenção de água);
  - condensação;
  - protegido da molhagem;
  - zonas de cantos e curvas.

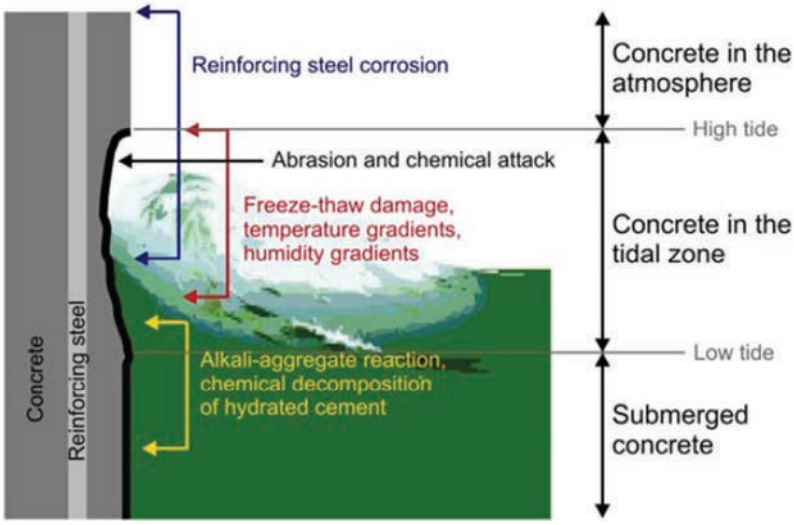


Figura 2.7 e Figura 2.8 – Mecanismos de degradação em diferentes secções da estrutura [28] [35].

A sistematização das condições ambientais, de forma a facilitar a aplicação de requisitos de durabilidade, é prática constante nos diversos regulamentos, destacando-se a norma portuguesa NP EN 206-1, que define grupos de exposição ambiental conforme o agente agressivo e determina classes de exposição ambiental associadas às estruturas. Esta norma e as suas classes de exposição são assunto a ser apresentado de forma explícita nos capítulos seguintes deste trabalho.

Os processos ambientais podem fazer com que cloretos, oxigénio, humidade ou dióxido de carbono penetrem no betão de recobrimento e eventualmente levar à ocorrência da corrosão das armaduras. À medida que o aço corrói ele aumenta de volume provocando fissuras, manchas de fissuras e fragmentação do betão de recobrimento. O problema é generalizado a todas as formas de estruturas de betão, em todos os países.

Já foi visto que o betão é um material poroso, e como tal absorve água do meio ambiente e armazena-a no interior da estrutura. Sendo esta capacidade de retenção de água maior que a capacidade de a perder, o betão, em geral, tem maior humidade que o meio onde se insere, podendo obter água tanto no caso de chuva como da própria humidade relativa do ar. A humidade ambiental interfere em todos os processos de deterioração do betão e corrosão das armaduras na medida em que faz variar a humidade dentro do próprio betão [21].

Relativamente às substâncias agressivas que podem estar presentes n humidade são sobretudo o dióxido de carbono, que provoca a carbonatação do betão, o oxigénio que é necessário na corrosão das armaduras, os cloretos que promovem a corrosão das armaduras, os ácidos que atacam o cimento, os

sulfatos que podem reagir expansivamente com o cimento e os álcalis que podem reagir com os inertes também de um modo expansivo [21]. Alguns desses processos básicos de deterioração são apresentados, com detalhe, mais à frente

As estruturas de betão estão inseridas em diversos ambientes e em contacto com diferentes agentes agressivos. É fundamental que a identificação das condições de exposição ambiental e definição das correspondentes ações ambientais seja desenvolvida na fase de projeto da estrutura, atendendo à severidade do meio. É preciso levar em consideração que nada dura para sempre, deteriorando-se cada material ao seu ritmo próprio, sendo esta deterioração dependente das condições de exposição ambiental identificadas.

2.5. A DETERIORAÇÃO DAS ESTRUTURAS DE BETÃO ARMADO E PRÉ-ESFORÇADO

Todas as pessoas envolvidas no processo construtivo deveriam ter um mínimo de conhecimento sobre os mais importantes processos de deterioração e dos parâmetros que os governam, como pré-requisito básico para tomada de decisões corretas na busca pela durabilidade das estruturas [23]. Esta é a principal razão para esta secção conter os fundamentos básicos teóricos relativos aos principais mecanismos de deterioração das estruturas de betão, indicando as condições em que o seu aparecimento se processa. Não se pretende aprofundar no campo da ciência e tecnologia dos materiais, mas sim fazer uma análise básica das noções gerais em modelos simplificados, com o objetivo de fornecer informações básicas e essenciais no âmbito deste trabalho.

A degradação de uma estrutura de betão armado ou pré-esforçado verifica-se pela preponderância de um dos dois fatores: deterioração do betão ou corrosão das armaduras [21]. Assim sendo a análise efetuada pormenoriza estes dois fatores, através dos processos que os poderão desencadear. Apesar dessa distinção entre os processos para os materiais betão e armaduras, a estrutura deve ser considerada como um todo, verificando-se a interligação entre os processos, ou seja, a deterioração do betão afeta as armaduras assim como a corrosão da armadura afeta o betão envolvente. O Quadro 2.1 apresenta uma listagem dos fatores de degradação, dos respetivos processos e da degradação resultante, isto é, dos seus efeitos sobre o desempenho do material, componente ou sistema [36].

A abordagem a estes processos, neste trabalho, sistematiza-se nos seguintes itens:

- Mecanismos de deterioração do betão
  - processos químicos;
  - processos físicos e mecânicos;
  - processos biológicos.
- A corrosão do aço para betão armado:
  - a passivação das armaduras;
  - definição da corrosão e seus efeitos;
  - formas de manifestação da corrosão;
  - medidas preventivas.

Quadro 2.1 – Fatores de degradação, processos envolvidos e degradação resultante [36].

Fatores de degradação	Processo	Degradação
Mecânicos		
Carregamento estático	Deformação	Deflexão, fendilhação, rotura
Carregamento cíclico	Fadiga, deformação	Deflexão, fendilhação, rotura
Carregamento por impacto	Fadiga	Vibração, fendilhação, rotura, deflexão
Biológicos		
Microrganismos	Produção de ácido	Lixiviação
Bactérias	Produção de ácido	Lixiviação
Químicos		
Água pura	Lixiviação	Desagregação do betão
Ácido	Lixiviação	Desagregação do betão
Ácido e gases ácidos	Neutralização	Despassivação do aço
Dióxido de carbono	Carbonatação	Despassivação do aço
Cloretos	Penetração, destruição da camada de passivação	Despassivação do aço
Despassivação do aço + H_2O +O_2	Corrosão	Expansão do aço, perda de diâmetro e de aderência
Tensão + cloretos	Corrosão do aço	Rotura da armadura de pré-esforço
Sulfatos	Pressão dos cristais	Desagregação do betão
Agregado (sílica) + álcalis	Reação da sílica	Expansão, desagregação
Agregado (carbonato) + álcalis	Reação do carbonato	Expansão, desagregação
Físicos		
Variação da temperatura	Expansão/contração	Deformação restringida
Variação da humidade	Retração e expansão	Deformação restringida
Baixa temperatura + água	Formação de gelo	Desagregação do betão
Sal descongelante + água	Transferência de calor	Destacamento do betão
Gelo (mar)	Abrasão	Destacamento, fendilhação
Trânsito	Abrasão	Desgaste e rotura
Água corrente	Erosão	Danos superficiais
Água turbulenta	Cavitação	Cavidades
Eletromagnéticos		
Eletricidade	Corrosão	Expansão do aço, perda de diâmetro e de aderência
Magnetismo	Corrosão	Expansão do aço, perda de diâmetro e de aderência

2.5.1. MECANISMOS DE DETERIORAÇÃO DO BETÃO

2.5.1.1. Processos Químicos

O betão endurecido é frequentemente considerado uma rocha artificial devido à semelhança entre as suas propriedades e as das rochas naturais. Contudo, graças à suscetibilidade da pasta de cimento, o betão apresenta menor resistência ao ataque químico que as rochas naturais. Sendo resultante da mistura de agregados e cimento (ligante hidráulico), teoricamente a deterioração de qualquer um destes materiais pode levar à deterioração do próprio betão.

Algumas substâncias encontradas na envolvente ambiental podem-se infiltrar na massa do betão endurecido e, sob condições propícias de humidade e temperatura, desencadear reações químicas com efeitos nocivos. Os mecanismos mais comuns de deterioração química, abordados neste trabalho são:

- ataque por sulfatos;
- ataque por água do mar;
- ataque por ácidos;
- ataque por águas puras;
- ataque por dióxido de carbono agressivo ou carbonatação;
- ataque por cloretos;
- reações com agregados.

Ataque por sulfatos

Os sulfatos de magnésio, cálcio, sódio, potássio e amónio podem reagir com a pasta de cimento endurecida e conduzir à total desagregação do betão. Sublinha-se que esta reação só se desencadeia quando estes elementos se encontram em solução, pois no estado sólido não atacam o betão. Os sulfatos podem ser considerados muito agressivos, podendo estar presentes em solos, dissolvidos na água do lençol freático, na água do mar ou em aterros de resíduos industriais.

O ataque provém das reações dos sulfatos com o hidróxido de cálcio livre ($Ca(OH)_2$) e com os aluminatos de cálcio hidratados (C_3A), resultantes da hidratação do cimento. Denota-se que o ião sulfato apenas ataca os aluminatos do cimento Portland endurecido ou cimento com clínquer Portland. Os produtos dessas reações, respetivamente, o gesso ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) e o sulfoaluminato de cálcio, conhecido por etringite, cristalizam-se com a água num processo acompanhado por expansão de volume. Esta expansão, que pode aumentar o volume inicial até duas vezes e meia, é seguida de fissuração progressiva de configuração irregular, facilitando o acesso de novas soluções de sulfato. Mediante este ataque o betão adquire uma aparência esbranquiçada característica, conforme ilustrado na Figura 2.9. podendo ocorrer, também, desprendimento de lascas.

Figura 2.9 – Ataque de sulfatos numa laje [36].

Os principais parâmetros que influenciam esta reação expansiva, são:

- condições de exposição, isto é, a severidade do ataque e portanto a quantidade de substâncias agressivas;
- acessibilidade da substância agressiva e, portanto, a permeabilidade do betão que influencia a velocidade de transporte;
- suscetibilidade do betão que depende do tipo de cimento usado, ou seja, da quantidade de substância reativa que ele contém;
- quantidade de água em presença [21].

A velocidade com que se dá o ataque por sulfatos depende de diversos fatores, dentre eles concentração de sulfatos na solução, permeabilidade do betão, tipo de cimento e quantidade de água disponível para o processamento das reações [23].

Além dos fatores citados, a velocidade do ataque depende também da velocidade com que o sulfato é reposto. Sob condições estáticas, o ataque será muito menos severo do que em situações em que a água contaminada se encontra em movimento. A situação será ainda mais grave se o betão estiver exposto de um só lado à pressão da água [23].

Algumas medidas preventivas de modo a diminuir a vulnerabilidade do betão ao ataque por sulfatos são: empregar cimentos resistentes a sulfatos, minimizar a permeabilidade do betão ou a utilização de revestimentos superficiais, sendo estes frequentemente usados em ambientes muito contaminados.

Ataque por água do mar

A água do mar tem presente na sua constituição, além do oxigénio e dióxido de carbono, diversos sais, podendo estes apresentar concentrações variáveis. De entre estes os mais importantes são: cloreto de sódio, cloreto de magnésio, cloreto de potássio, sulfato de magnésio, sulfato de cálcio e sulfato de potássio. As quantidades individuais desses sais variam com o local, sendo que, por exemplo, nos climas quentes as concentrações são maiores que nos climas frios.

Embora a água do mar contenha sulfatos, podendo resultar num ataque agressivo conforme já visto, a presença dos cloretos altera a extensão e a natureza das reações químicas, amenizando seus efeitos. O que ocorre é que há uma tendência a formarem-se inicialmente cloroaluminatos, conhecidos por Sal de Fridell, de modo que o comportamento expansivo associado à formação dos sulfoaluminatos

(formação de etringite) fica inibido. Além disso, o gesso e o sulfoaluminato são mais solúveis em soluções de betão do que em água e são, portanto, lixiviados pela água do mar. Desta forma, a expansão produzida é menor para um cimento com mesmo teor de C_3A. Por esse motivo, a água do mar, que deveria ser classificada como altamente agressiva devido ao seu alto teor de sulfatos, é considerada apenas como moderadamente agressiva [23].

Além do ataque químico e da cristalização de sais nos poros, em ambiente marítimo podem ocorrer outras ações destrutivas decorrentes dos ciclos de gelo/degelo, da ação física das ondas (cargas de impacto provocando a abrasão da superfície por desgaste), ataque biológico e, principalmente, corrosão de metais embebidos no betão.

O ataque do ambiente marítimo sobre as estruturas de betão armado pode ser dividido em três zonas distintas em função do posicionamento do elemento de betão armado em relação ao nível das ondas do mar. A zona superior, acima da maré alta, não está diretamente exposta à água do mar. Contudo, está exposta ao ar atmosférico, ação de geadas e de sais transportados pelos ventos. A fendilhação devido à corrosão das armaduras ou devido aos ciclos de gelo/degelo são os fenómenos mais deteriorantes e frequentes nesta zona. Na zona entre marés, a estrutura está sujeita a ciclos alternados de secagem/molhagem, gelo/degelo, impactos das ondas e de gelo flutuante, abrasão das areias e corrosão das armaduras. A zona inferior, submersa na água, é relativamente estável onde a ação gelo/degelo e corrosão das armaduras não ocorrem. A ação de deterioração predominante é o ataque químico que provoca perda da resistência [36].

As medidas preventivas deste ataque podem ser: a diminuição da permeabilidade do betão; a escolha adequada do tipo de cimento (betões produzidos com aluminatos de cálcio, cimentos supersulfatados e aqueles que contém materiais cimentícios adicionais têm melhor comportamento); garantir a fissuração mínima (cuidados no projeto e execução de juntas); definir espessuras de recobrimento adequadas para as armaduras; utilizar revestimentos apropriados nas superfícies expostas.

Ataque por ácidos;

Neste tipo de ataque os ácidos reagem com os componentes de cálcio do betão transformando-os em sais do ácido agressivo [21]. Exemplificando, a ação do ácido clorídrico conduz à formação do cloreto de cálcio, assim como o ataque por ácido nítrico resulta em nitrato de cálcio e assim sucessivamente. Agregados de calcário e dolomíticos também podem sofrem ataques por ácidos [23]. De entre os ácidos que atacam o betão destacam-se: ácido sulfúrico, ácido nítrico, ácido clorídrico, ácido láctico, ácido acético, ácido tartárico, ácido fluorídrico e ácido fosfórico.

A diferença primordial entre o ataque por ácidos e o ataque por sulfatos ou álcalis é o facto de no ataque por ácidos, o sistema de poros ser destruído como um todo, uma vez que estes reagem com todos os componentes do cimento, enquanto no ataque por sulfatos ou álcalis, apenas certos componentes são atacados (ver Figura 2.10). Mais uma vez a permeabilidade é de enorme importância para o ataque.

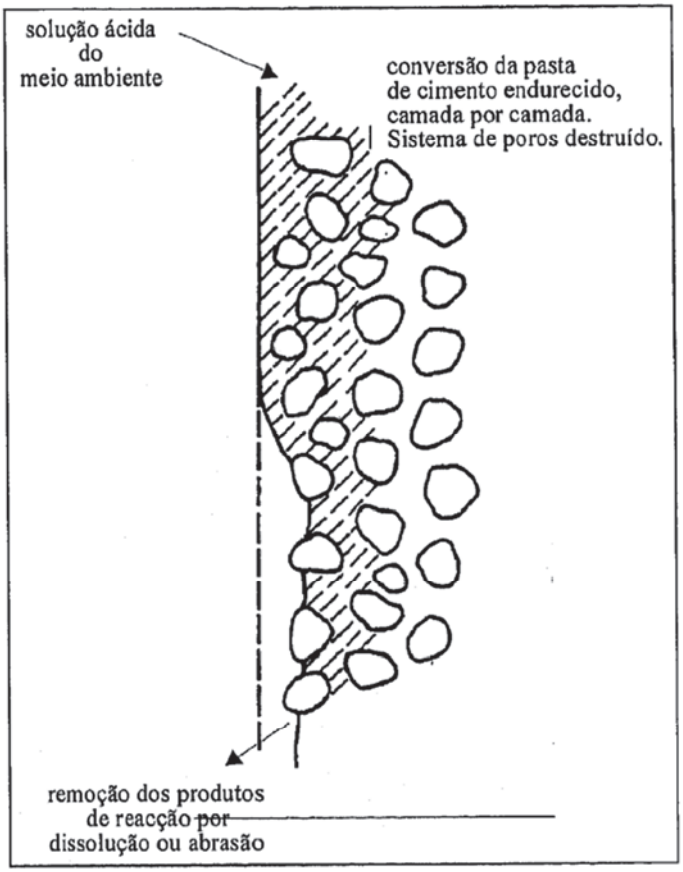


Figura 2.10 – Ataque ácido [21].

A velocidade de reacção por ataque ácido é determinada pelo grau de solubilidade do sal de cálcio resultante da reacção e, portanto, se este for pouco soluvel e não for arrastado, terá um efeito passivante fazendo baixar a velocidade de reacção. Assim, quanto mais soluvel for o sal formado na reacção e mais rápido o seu arrastamento na solução, mais intensa será a deterioração do betão, nestas condições de ataque por ácidos agressivos [21].

As medidas de proteção para o ataque dos ácidos à estrutura podem ser: a redução da permeabilidade do betão; a minimização do tempo de exposição do betão aos ácidos, evitando-se a imersão; a secagem do betão antes da exposição aos ácidos; o recurso a tratamentos artificiais das superfícies expostas, como pinturas de borracha e betuminosas, resinas epóxicas etc.

Ataque por águas puras

Consideram-se águas quimicamente puras, entre outras, a água destilada, água de poços em regiões siliciosas, águas provenientes de condensação ou degelo e algumas águas de montanha. Essas águas não contêm sais dissolvidos e, portanto, possuem grande capacidade de dissolução, podendo danificar seriamente a pasta de cimento, a partir da lixiviação dos seus constituintes, destruindo, assim, a estrutura dos poros [23]. Águas que contenham sais dissolvidos possuem capacidade de dissolução muito reduzida.

Este tipo de ataque é pouco usual nas estruturas uma vez que exige um longo período de exposição para que os danos sejam significativos, a menos que a água possa atravessar a massa de betão de forma continua.

Algumas medidas preventivas do ataque por águas puras são: a diminuição da permeabilidade; a utilização de cimentos pozolânicos ou de alto-forno (para evitar a dissolução do hidróxido de cálcio); a promoção de tratamentos superficiais que impeçam o acesso dessas águas ao betão.

Ataque por dióxido de carbono agressivo ou carbonatação;

A par do ataque por iões de cloreto, o ataque por dióxido de carbono agressivo ou carbonatação é um dos principais responsáveis pela deterioração das estruturas. O dióxido de carbono é encontrado na atmosfera, sobretudo em ambientes urbanos e industriais, e também dissolvido em água. Sempre que existir dióxido de carbono (CO_2) no ambiente de exposição da estrutura existirá a probabilidade de ocorrência natural deste processo, com a devida redução da alcalinidade do cimento (normalmente correspondente a um pH entre 12 e 13) responsável, juntamente com outros fatores, pela proteção contra a corrosão das armaduras.

O processo de difusão, conforme já referido anteriormente, é o responsável pela infiltração do dióxido de carbono nos poros betão, dissolvendo-se este na fase aquosa dos poros e reagindo com o hidróxido de cálcio ($CA(OH)_2$), proveniente da hidratação do cimento, conforme a equação (2.1) demonstra. Esta reação vai ocorrer enquanto houver hidróxido de cálcio disponível no betão.

$$CA(OH)_2 + CO_2 \rightarrow CaCO_3 + H_2O \qquad (2.1)$$

Em alguns casos este processo de carbonatação pode ser benéfico para a estrutura, causando um aumento da resistência, da densidade e da estabilidade volumétrica do betão. Contudo, este também pode provocar e redução do pH para valores inferiores a 9, possibilitando a corrosão das armaduras. O avanço acontece a partir da superfície para o interior da peça de betão, e quando atinge as armaduras gera a sua despassivação, isto é, destruição da camada de óxido criada pelo aço no meio alcalino do betão, que serve de proteção das armaduras da reação com o oxigénio e a água. A destruição desta camada protetora pela carbonatação conduz assim à corrosão das armaduras.

O processo inicia-se nas superfícies expostas e vai lentamente evoluindo para o interior da massa de betão, formando, assim, uma frente de carbonatação (ver Figura 2.11). A velocidade e a profundidade de carbonatação, determinantes da intensidade do ataque, dependem do meio ambiente (concentração de CO_2, humidade relativa do ar, temperatura, etc.) e das características do betão endurecido (composição química do cimento, execução, fissuras, qualidade da cura, etc.).

O tipo de cimento, a razão água/cimento, e o teor de humidade são fatores de grande importância no desenvolvimento da carbonatação visto estarem na origem e dimensão da estrutura porosa do betão. A esta estrutura porosa está conotada a difusidade da pasta de cimento endurecido que controla a carbonatação. A razão água/cimento, parâmetro interno do betão num determinado elemento da estrutura, exerce uma influência significativa na penetração do CO_2, verificando-se que quanto maior for essa relação, maior será a permeabilidade e porosidade do betão e consequentemente, maior a difusão de CO_2. Uma maior quantidade de cimento no betão implica a existência de uma maior quantidade de substâncias carbonatáveis no betão e consequentemente uma menor velocidade de carbonatação.

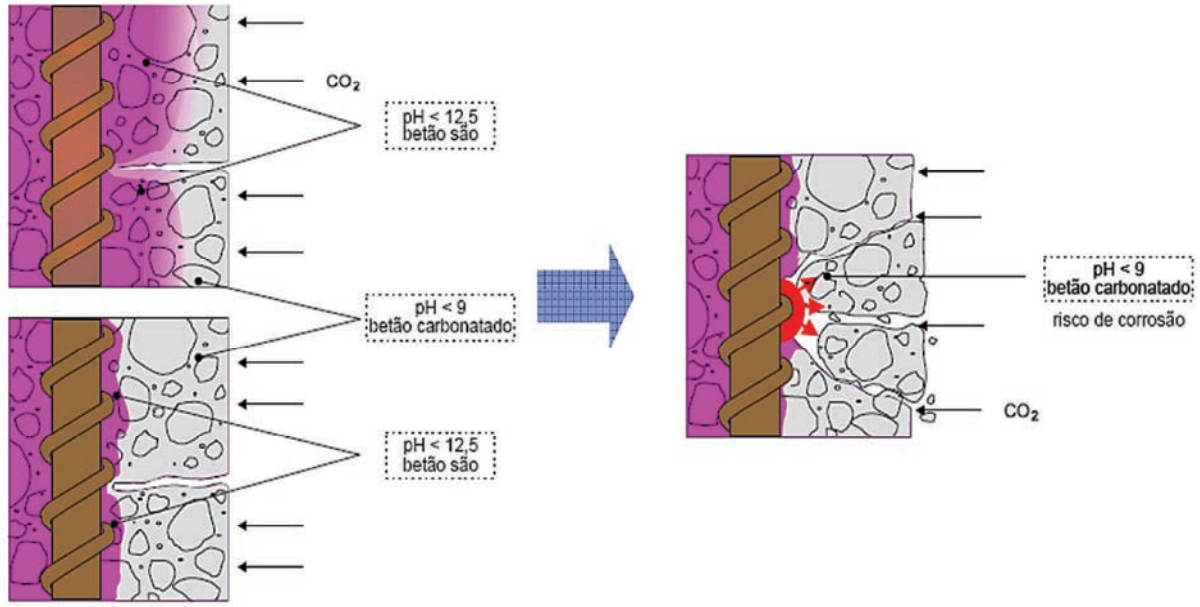


Figura 2.11 – Frente de carbonatação [29].

A humidade relativa do ar é um fator decisivo na velocidade da carbonatação, visto que influi diretamente no grau de saturação dos poros. Conforme dito anteriormente, o CO_2 penetra nos poros por difusão e se dissolve na fase aquosa. Se os poros estiverem saturados de água (por exemplo, durante a cura, em betões submersos ou em locais onde a humidade é elevada), a difusão terá que se dar em meio aquoso, sendo, portanto, muito mais lenta (cerca de 10.000 vezes) se comparada com a difusão em meio gasoso. Se, por outro lado, a humidade relativa do ar for muito baixa, a dissolução, tanto do CO_2 como do $Ca(OH)_2$, fica praticamente impedida ou retardada, o mesmo acontecendo com a carbonatação [23].

O método comum de medida da carbonatação de um elemento de betão é a aplicação de fenolftaleína diluída em álcool na superfície exposta do betão. Mediante a aplicação desta solução, o hidróxido de cálcio livre no elemento reage apresentando uma coloração rosa, enquanto as outras partes permanecem com a mesma cor. Além da fenolftaleína, também podem ser utilizados outros indicadores químicos como timolftaleína e o amarelo de alizarina, tal como outros métodos laboratoriais incluindo a difração por raios-X, espectrografia por infravermelhos e análise termogravimétrica. A Especificação LNEC E 391 "Betões. Determinação da resistência à carbonatação" [8] apresenta um procedimento baseado na Recomendação RILEM CPC – 182, para determinar a profundidade de carbonatação.

Para prevenção da carbonatação as medidas comuns são: a diminuição da permeabilidade; definição de espessuras de recobrimento adequadas; restringir a exposição do betão ao CO_2 durante a fase de endurecimento; diminuição da razão água/cimento.

Ataque por cloretos

A par do ataque por dióxido de carbono, o ataque por cloretos é uma das formas principais de corrosão das armaduras e deterioração do betão. Contudo, ao contrário da carbonatação, no ataque por cloretos, a deterioração do betão é consequência da corrosão do aço e não uma deterioração direta do betão.

Esta corrosão induzida por iões cloreto é mais frequente e intensa em ambientes onde a concentração destes é mais elevada, como sejam as estruturas hidráulicas em ambientes marítimos. Todavia, além de penetrarem desde o exterior através da rede porosa, o que normalmente ocorre em ambientes marinhos ou quando se utilizam sais descongelantes, os iões cloreto podem existir no betão através dos seus componentes, como agregados, água da mistura ou adjuvantes/aditivos que contenham cloro.

A corrosão por ataque de cloretos ocorre com grande velocidade e provoca proeminentes perdas de secção das armaduras. É de notar uma certa dificuldade na determinação do tempo necessário para que os iões de cloro penetrem no betão e na quantidade de iões cloreto suficientes para romper a camada passivante das armaduras e dar início ao processo de corrosão. As dificuldades resultam do défice de compreensão do mecanismo de transporte dos iões no betão e da variedade de intervenientes no processo de corrosão.

É mais provável que a corrosão da armadura devido ao ataque dos cloretos seja localizada nas áreas em que a concentração de cloro é elevada. Uma vez iniciada a corrosão da armadura, forma-se uma célula eletroquímica de corrosão onde as zonas corroídas funcionam como ânodo e a restante área de aço passivado como cátodo [36].

O mecanismo de transporte do cloro no betão é muito complicado. A difusão de iões, a sucção capilar, associado a reações físicas e químicas de fixação do cloro, poderão estar envolvidos neste processo complicado. Com a aplicação de um potencial elétrico externo, por exemplo, para a extração dos iões de cloro, desenvolve-se o mecanismo da migração [36].

São diversos os intervenientes no processo, nomeadamente a qualidade do betão, o tipo de cimento, razão água/cimento, grau de humidade, dosagem de cimento, etc. A qualidade do betão de recobrimento e a razão água/cimento, ligada intrinsecamente à estrutura porosa do betão, condicionam a resistência à penetração dos cloretos. As condições de exposição ambiental determinam os tipos de mecanismos de transporte que irão atuar no betão, influenciando a velocidade de penetração de cloretos. O cimento, através da sua quantidade e a composição, determina a capacidade de fixação dos cloretos pela pasta de cimento. As adições podem aumentar a resistência à penetração de cloretos, possibilitando um refinamento e bloqueio da estrutura porosa do betão.

Existe uma certa dificuldade a respeito da quantidade de iões cloretos suficientes para romper a camada de óxidos passivantes e iniciar o processo de corrosão das armaduras. O conhecimento deste parâmetro tem uma importância significativa, quer para a execução de obras novas, quer para a reparação e manutenção de obras existentes. Este limite não está associado a um valor fixo, embora existam algumas normas que recomendam valores orientativos. Esta dificuldade de estabelecer um limite surge devido às numerosas variáveis intervenientes, nomeadamente tipos de cimento, proporção de cimento, relação água cimento, conteúdo de humidade e outros. Para além disso, o mecanismo de despassivação por iões cloreto não se encontra totalmente compreendido, mas acredita-se que os iões se incorporam na camada passiva, substituindo parte do oxigénio e aumentando a sua condutibilidade. A camada perde assim a sua função de proteção acabando por permitir a corrosão do aço envolvido no betão [37].

O estudo do ataque por cloretos é complementado na secção 2.5.2 (*A corrosão do aço*) para betão armado por estar intimamente ligado a corrosão das armaduras.

Quanto às medidas preventivas do ataque por cloretos recomenda-se o controlo da qualidade do betão, nomeadamente dos seus constituintes, compactação, fissuração, permeabilidade e rede porosa, assim como o uso de revestimentos da superfície.

Reações com agregados.

As reações químicas não atacam somente a pasta de cimento do betão, mas também podem atacar os agregados do mesmo. De entre essas reações envolvendo os agregados destacam-se as que ocorrem entre os álcalis do cimento e determinados compostos dos agregados, sendo as principais as reações álcalis-sílica, e as reações álcalis com carbonatos. As expansões internas, resultantes de algumas reações químicas envolvendo os agregados, podem ser acompanhadas por fissuração do betão e perda de resistência, ameaçando seriamente a sua durabilidade.

- Reações álcalis-sílica

A reação álcalis-sílica é a reação química com agregados mais conhecida e estudada. Envolve os iões OH^- associados aos álcalis (óxido de sódio, Na_2O e óxido de potássio K_2O) do cimento ou de outras fontes (por exemplo, águas contendo álcalis) e certos constituintes siliciosos de determinados tipos de inertes [23]. A solução que circula nos poros e fendas do betão é uma solução saturada em hidróxido de cálcio que contém sódio e potássio em quantidades variáveis e que podem reagir com determinados tipos de sílica (variedades criptocristalinas ou mesmo amorfas) que exista nos inertes, provocando expansões e deteriorando o betão [21].

Embora sejam as mais conhecidas e as que maior atenção tem recebido, ainda existem divergências quanto aos mecanismos que governam as reações álcalis-sílica. Sabe-se, entretanto, que essas reações podem resultar em expansões consideráveis, dependendo de certos fatores, dentre os quais reatividade (presença, tipo e quantidade de sílica) e dimensões dos agregados, concentração de álcalis nos poros, tipo e quantidade de cimento e condições de exposição (humidade e temperatura), principalmente com relação à quantidade de água disponível para as reações [23].

Nem todas as reações dos agregados são prejudiciais para a estrutura, existindo casos onde apresentam benefícios para o betão, tal como o aumento da aderência entre os agregados, quando suficientemente numerosos ou finos, e a pasta de cimento. Isto acontece porque a sílica pode ser dissolvida em soluções de elevada alcalinidade, formando-se um gel álcalis-sílica não existindo expansão do betão.

- Reações álcalis com carbonatos dos inertes

As rochas carbonatadas também podem ser suscetíveis de ataque pelos álcalis pois, quando contém o mineral dolomite (carbonato de cálcio e magnésio), este, pela ação dos álcalis é suscetível de desdolomitização que consiste na substituição da dolomite por calcite, em $CaCO_3$ e brucite, $Mg(OH)_2$ [21].

A reação é suscetível de provocar expansão e fissuração excessivas no betão, pois o volume dos produtos resultantes é menor que o original mas criam-se condições para as argilas e constituintes mais finos dessas rochas, adsorverem água.

Os mecanismos das reações não estão ainda bem definidos. Porém, sabe-se que são reações bastante diferentes das que ocorrem entre álcalis e sílica [23].

Na Figura 2.12 apresenta-se um esquema ilustrativo de como se processam as reações entre os álcalis e os agregados do betão.

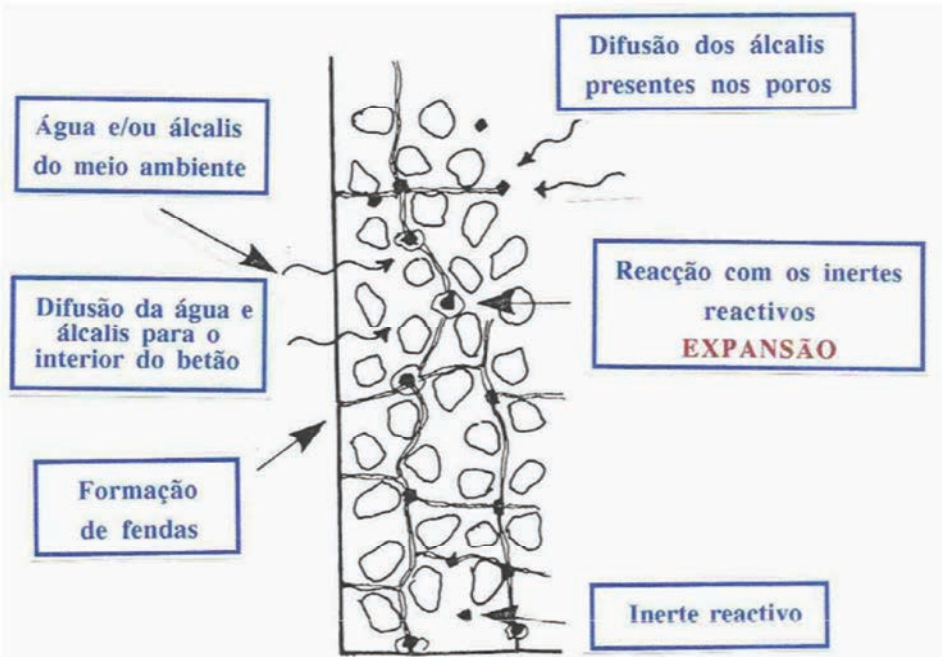


Figura 2.12 – Esquema das reações químicas álcalis e agregados [29].

A Especificação LNEC E 461 [10] estabelece metodologias para prevenir reações expansivas internas, enquanto a Especificação LNEC E 415 [52] define métodos de avaliação da reatividade potencial aos álcalis.

A melhor medida preventiva das reações com agregados é impedir o uso de agregados reativos. Em caso de uso de agregados reativos devem ser tomadas cuidados no seu uso, como a utilização de cimentos com baixo teor de álcalis, a proibição de uso de água do mar e de águas alcalinas na mistura, a diluição dos agregados reativos (misturando-os com outros não reativos) e a redução do diâmetro nominal máximo do agregado. Podem ainda ser tomadas precauções a nível das adições como evitar cloretos de sódio e de potássio e empregar pozolanas e escórias de alto-forno, que reduzem a permeabilidade e a concentração de hidróxido de cálcio.

A Figura 2.13 apresenta a ocorrência de uma reação entre álcalis e agregado numa barragem, destacando-se que em Portugal estas são as estruturas onde esta reação é mais observada.

Figura 2.13 – Paramento de montante da barragem da Pracana [38].

2.5.1.2. Processos Físicos e Mecânicos

Prossegue-se o estudo dos mecanismos de deterioração do betão com uma descrição sumária de alguns processos físicos e mecânicos que são responsáveis por esta deterioração. São abordados os seguintes processos:

- ciclo de gelo/degelo;
- abrasão;
- cavitação.

Ciclo de gelo/degelo

Este processo é evidentemente muito mais patente e prejudicial em ambientes de clima frio.

Nas betonagens em tempo frio, pode ocorrer o congelamento da água do betão ainda fresco. Se este fenómeno se dá antes do início da presa, os danos se reduzem apenas a um retardamento do processo de endurecimento do betão. Isto deve-se ao fato de que a água de amassadura, necessária às reações de hidratação do cimento, encontra-se congelada. Após o descongelamento, é necessário que o betão seja revibrado para que ocorram a presa e o endurecimento da massa sem prejuízo para a resistência do betão. Quando o congelamento dá-se após a presa, os danos podem ser irrecuperáveis se o betão, ainda muito jovem, não tiver atingido uma certa resistência mínima. Infelizmente, ainda não se dispõe de dados suficientes para fixar o valor desta resistência [23].

A temperatura de congelamento da água é variável com o tamanho dos poros, sendo tanto menor quanto menor for este tamanho. Quando os poros são muito grandes, raramente estão totalmente preenchidos por água. Mas o tamanho dos poros é apenas um dos fatores que interferem neste processo, sendo que também a sua distribuição, as condições ambientais, frequência do ciclo de gelo/degelo, idade do betão e a secagem entre ciclos representam fatores determinantes.

Observa-se que a deterioração decorre, principalmente, da incapacidade do betão de absorver o acréscimo de volume que a água sofre ao congelar. Esta incapacidade, por sua vez, é consequência da impossibilidade de redistribuição da água na massa do betão durante o fenômeno, seja pelo alto grau de saturação do betão, pelas dificuldades impostas por sua estrutura de poros ou, ainda, pela velocidade elevada de arrefecimento [23].

As pressões expansivas ou dilatantes podem surgir a partir de duas origens: (1) o aumento de volume de aproximadamente 9% devido ao congelamento da água e a expulsão da água em excesso na cavidade; e (2) a difusão da água originando o crescimento de um número relativamente pequeno de corpos de gelo [36].

Caso o betão apresente uma quantidade adequada de poros com ar, não preenchidos totalmente com água, a expansão pode ser absorvida sem causar grandes danos. É por isso que a incorporação de ar no betão, isto é a introdução intencional de ar, é uma medida preventiva eficaz contra tal fenómeno. A utilização de agentes descongelantes é outra medida usual no combate a este fenómeno, contudo a utilização desses agentes (normalmente sais descongelantes, como cloretos de sódio e de cálcio) deve ser devidamente cuidada pois pode apresentar outros perigos para a durabilidade do betão.

A maior concentração de sais nas superfícies onde são aplicados, em relação às regiões internas no betão, provoca o surgimento de uma pressão osmótica, que faz com que a água se desloque em direção àquelas superfícies. Este aumento no grau de saturação representa a principal causa dos efeitos nocivos que os sais ocasionam [23].

Destaca-se ainda o comportamento distinto, em relação ao ataque por gelo/degelo, entre a pasta de cimento e os agregados, sendo a vulnerabilidade da pasta muito maior. Isto se deve ao fato de que, dificilmente, os agregados atingem a saturação quando em serviço, a menos que já estejam saturados no momento da confeção do betão [23].

A resistência do agregado aos efeitos do congelamento é inversamente proporcional ao seu tamanho. Assim, agregados miúdos têm, em geral, grande resistência ao ataque por congelamento. Os agregados graúdos com poros de tamanho médio são os mais críticos. Quando os poros são muito grandes, raramente estão totalmente preenchidos por água. Por outro lado, nos poros pequenos, a água não congela pelas razões anteriormente apresentadas [23].

De modo a evitar a ocorrência deste processo de deterioração recomendam-se algumas medidas preventivas:

- Empregar aditivos incorporadores de ar em proporções adequadas, principalmente se for previsto o uso de sais para degelo;
- Garantir um betão denso e com porosidade reduzida, adotando uma relação água/cimento baixa e um certo teor mínimo de cimento na mistura;
- Propiciar condições para que haja evaporação da água durante o congelamento, sempre que possível;
- Realizar ensaios de laboratório aos agregados, sempre que houver dúvidas quanto à sua resistência ao congelamento da água;
- Evitar ter zonas de empoçamento de água, através de um projeto cuidado de drenagem.

Abrasão

A abrasão pode ser definida como o processo que provoca no betão o desgaste através de esfregamento, enrolamento, escorregamento ou fricção repetitiva [36]. Assim a resistência do betão à abrasão é definida como a capacidade da sua camada superficial resistir a esta diversidade de ações, não sendo por isso fácil de avaliar.

A abrasão pode ser provocada por tráfego pesado, impacto ou deslizamento de cargas, materiais de enchimento e partículas sólidas transportadas pelo vento ou pela água, envolvendo a aplicação de tensões de intensidade elevada. As estruturas mais suscetíveis a este ataque serão portanto os pisos industriais, as barragens hidráulicas e os vários elementos das pontes.

De início a resistência do betão à abrasão é função da resistência e dureza da sua superfície sujeita ao ataque. Uma vez que esta superfície é desgastada, os agregados apresentam-se expostos e a resistência passa a ser dependente da sua dureza, por serem mais resistentes á abrasão, e da sua aderência com a pasta de cimento.

Quanto às medidas preventivas desse ataque, sugere-se:

- Garantir a qualidade superficial do betão;
- Controlar a duração das operações de acabamento;
- Evitar aumento da relação água/cimento na superfície;
- Promover cura apropriada;
- Utilizar betões com agregados maiores, mais densos e de maior dureza, pois sofrem menor desgaste por abrasão;
- Melhorar a superfície do betão com recurso a revestimentos específicos.

Cavitação

A cavitação é a perda de material provocado pela implosão de bolhas de vapor no escoamento de um fluido a elevada velocidade [36]. Esta distingue-se, na aparência, da abrasão pois ao contrário de superfícies de textura lisa, apresenta irregularidades, riscos e cavidades.

Quando a pressão estática da água corrente, em alguns pontos, se torna menor do que a pressão do vapor à temperatura ambiente, formam-se bolhas de vapor, que se deslocam com a correnteza. Em regiões de alta pressão, ocorre a condensação do vapor e as bolhas sofrem uma redução brusca de tamanho, causando grande impacto. Essa redução de tamanho implica em entrada de água, com grande velocidade, no espaço antes ocupado pelo vapor, acarretando o surgimento de uma pressão extremamente elevada, durante intervalos de tempo muito curtos. É a repetição desses impactos numa mesma região da superfície do betão que provoca o aparecimento de cavidades [23].

São válidas as mesmas medidas preventivas apresentadas para a abrasão tal como a adoção de superfícies lisas, bem acabadas, isentas de irregularidades (depressões, saliências, etc.) e de mudanças bruscas de inclinação ou de curvatura, que tendem a provocar alterações no fluxo da água.

2.5.1.3. Processos Biológicos

Os processos biológicos são um outro mecanismo de deterioração do betão. O desenvolvimento de musgo, líquenes, raízes de plantas ou de árvores que penetram através das fendas e pontos fracos de estruturas de betão pode provocar aumento da fissuração, fazer reter a humidade à superfície do betão (eventualmente sujeita a ciclos de gelo/degelo) e consequentemente, provocar deterioração do betão. Tais ataques são comuns em indústrias como óleo, gás, polpa e papel, a indústria química e muitos sistemas de armazenamento e distribuição de água [36].

O ataque biológico mais frequente é o que se verifica em sistemas de águas residuais onde se desenvolve sulfureto de hidrogénio, a partir de sulfato ou proteínas das águas residuais, em condições anaeróbicas (ausência de oxigénio). Acima do nível da água o sulfureto de hidrogénio pode ser oxidado por ação bacteriológica formando-se ácido sulfúrico que ataca o betão [21].

Além desta componente quimica do ataque, este também pode apresentar uma deterioração de natureza mecânica através da proliferação de parasitas de origem animal ou vegetal, tais como algas, moluscos e outros organismos microscópicos assim como raízes de plantas, geradoras de forças de fendilhação capazes de provocar a fissuração da estrutura.

2.5.2.A CORROSÃO DO AÇO PARA BETÃO ARMADO

A corrosão das armaduras é um dos problemas mais críticos das estruturas de betão, podendo comprometer severamente a sua segurança e capacidade de serviço. Os fatores principais que condicionam a corrosão são a exposição ambiental a que a estrutura está sujeita e a espessura de recobrimento inadequada da estrutura de betão.

2.5.2.1. A Passivação das armaduras

A corrosão das armaduras está ligada ao fenómeno de despassivação das mesmas. Assim sendo para explicar o processo de corrosão é conveniente abordar antes este fenómeno, por forma a obter-se uma melhor perceção geral do problema.

O betão armado saudável apresenta uma alcalinidade elevada. A forte alcalinidade do betão são é devida ao fato da solução intersticial existente na rede de poros e fendas do betão conter hidróxido de cálcio formado na hidratação do cimento e aos álcalis provenientes do cimento [21]. Pouco depois do início da hidratação do betão é originada uma pelicula microscópica, que impede a dissolução do ferro, sendo constituído por Fe_2O_3, com forte aderência às armaduras. A esta pelicula protetora das armaduras dá-se o nome de camada de passivação ou camada passivante, verificando-se que enquanto esta se mantiver intacta as armaduras permanecerão ilesas (Figura 2.14).

A ocorrência deste fenómeno de passivação protege as armaduras e impede a ocorrência de corrosão do aço. É a destruição desta camada, por decréscimo do pH do betão ou por penetração de agentes despassivantes, que possibilita o início do processo de corrosão na estrutura.

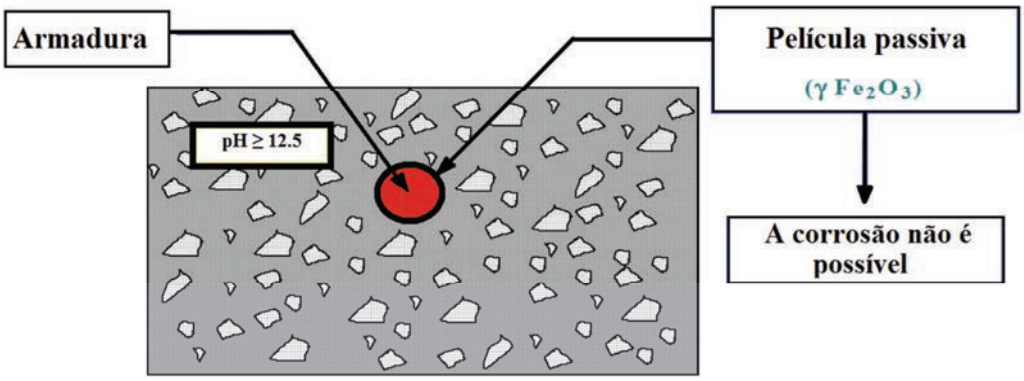


Figura 2.14 – Proteção das armaduras no betão [39].

A carbonatação e a lixiviação de álcalis provocada por água corrente, que pode ocorrer em zonas sensíveis da estrutura (juntas de construção, por exemplo), podem ser responsáveis pelo decréscimo do pH do betão, enquanto os cloretos são os agentes penetrantes mais prejudiciais para a despassivação das armaduras, conforme indica a Figura 2.15.

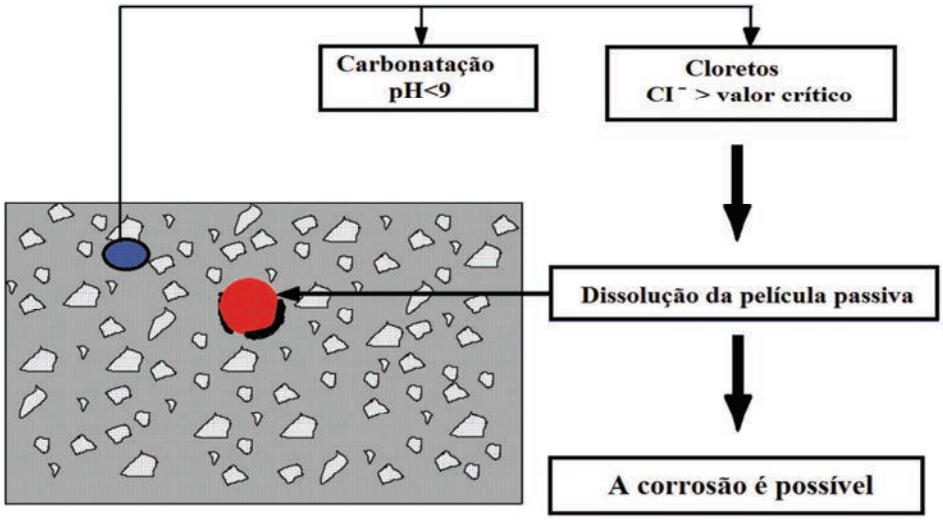


Figura 2.15 – Corrosão das armaduras após a dissolução da pelicula passiva [39].

2.5.2.2. Definição da corrosão e seus efeitos

A perda de alcalinidade do betão com a consequente dissolução da película passiva forma uma célula de corrosão. A corrosão das armaduras no betão consiste na oxidação destrutiva do aço pelo meio que o envolve, ou seja, é o resultado da formação de uma célula eletroquímica [36]. A Figura 2.16 apresenta um modelo simplificado de uma célula de corrosão.

A corrosão necessita de um eletrólito, uma diferença de potencial e de oxigénio para que possa ocorrer. O eletrólito é o meio onde ocorrem as células de corrosão de natureza eletroquímica, que irá conduzir os iões, gerando uma corrente de natureza iónica, sendo também necessário na dissolução do oxigénio. Nas estruturas de betão armado e pré-esforçado este eletrólito é a solução intersticial aquosa que contém iões em solução. Entre dois pontos da armadura a diferença de potencial pode ser resultante da diferença de humidade, concentração de sais, impurezas no metal ou heterogeneidades do betão, pela carbonatação ou presença de iões. O oxigénio é fundamental para o processo, independentemente da existência ou não de agentes agressivos, pois regula as reações desencadeadas.

Assim, reunindo os elementos indispensáveis para o processo, nomeadamente, um ânodo (onde ocorre a oxidação), um cátodo (onde ocorre a redução), um condutor metálico e um eletrólito, caso haja uma diferença de potencial entre o ânodo e o cátodo haverá corrente elétrica com possibilidade de ocorrência do fenómeno da corrosão. Identificando cada um desses elementos na estrutura, o ânodo será a zona da armadura despassivada, o cátodo a zona da armadura com acesso ao oxigénio, a armadura como condutor elétrico e o betão como eletrólito.

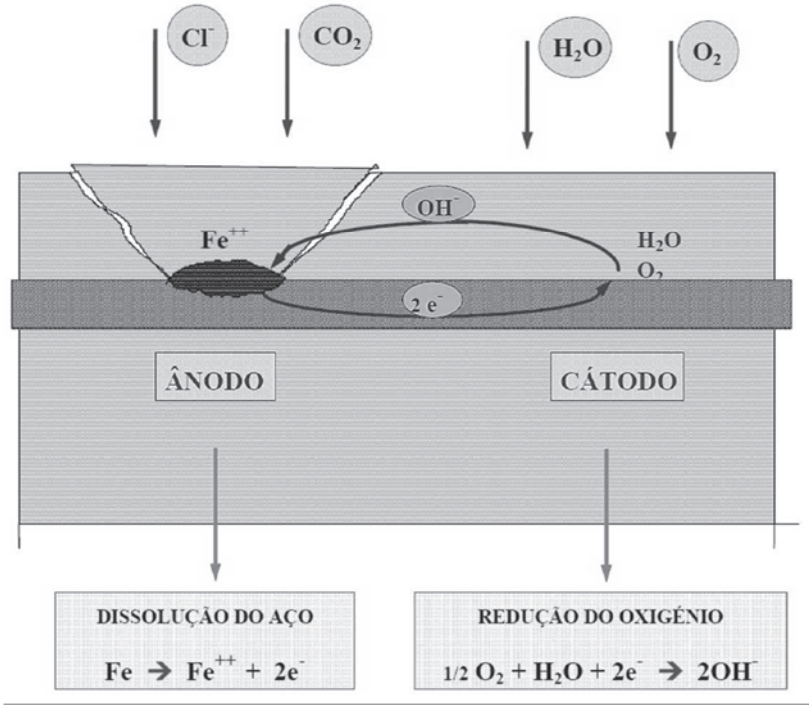


Figura 2.16 – Modelo de uma célula de corrosão [39].

Durante o processo de corrosão das armaduras dá-se a formação de óxidos e hidróxidos com expansão do volume e consequente fissuração na estrutura (ver Figura 2.17), beneficiando a entrada de outros agentes agressivos. A humidade relativa dos poros, composição química do betão, a rede porosa, a

espessura de recobrimento e as condições de exposição ambiental, atuando tanto isoladamente como em combinação, são fatores decisores da velocidade de ocorrência da corrosão.

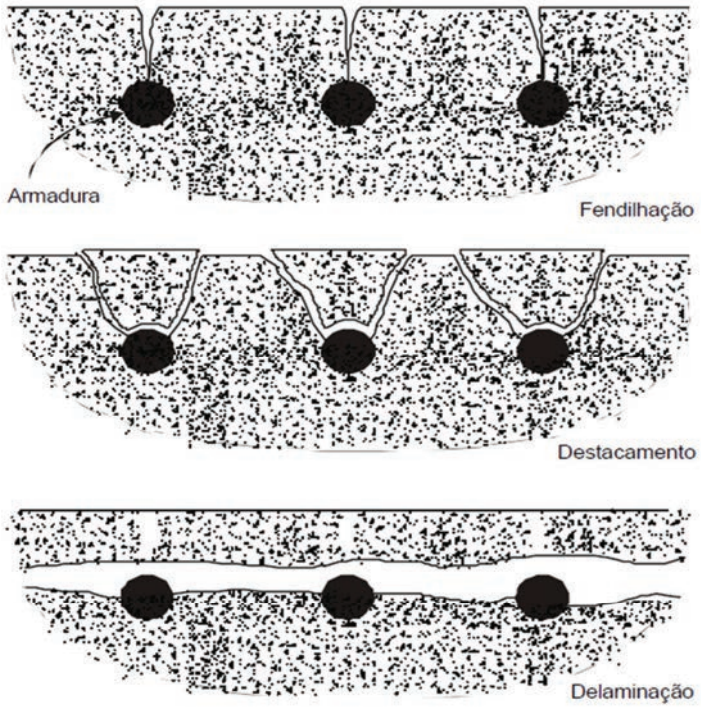


Figura 2.17 – Estragos provocados pela corrosão [36].

Outro efeito decorrente da corrosão é a redução da secção transversal das armaduras. Este efeito acarreta consequências como a perda de capacidade de carga das armaduras, assim como prejuízos para a sua ductilidade e resistência à fadiga.

Destacam-se algumas condições que afetam o processo corrosivo das armaduras:

- A água, embora não sendo um participante ativo no processo de formação da ferrugem (Fe_2O_3), é necessária para que o processo eletrolítico se desenvolva;
- Apresentando uma humidade relativa do ar abaixo de 60%, nos betões secos não ocorre corrosão significativa, pois o processo eletrolítico é impedido pela insuficiência de água;
- Em estruturas submersas, com betão saturado, o fenómeno da corrosão é retardado devido ao défice de oxigénio, sendo a difusão deste consideravelmente lenta. Nesta situação, não existe cátodo indispensável ao processo e a expansão devida à formação de ferrugem é pequena;
- A difusão é um mecanismo controlador do fenómeno da corrosão, uma vez que os principais processos que o desencadeiam utilizam este mecanismo. A difusão do CO_2 origina a carbonatação, a do Cl^- em meio aquoso provoca a infiltração dos cloretos e a difusão do oxigénio é responsável pela sua penetração no betão.

2.5.2.3. Formas de manifestação da corrosão

A corrosão pode ser classificada consoante a natureza do seu processo (corrosão de baixa tensão, corrosão por corrente de interferência, etc.) e também pela sua forma de manifestação ou morfologia. A classificação por formas de manifestação é dividida em três categorias morfológicas:

- corrosão generalizada;
- corrosão localizada;
- corrosão sob tensão.

A corrosão generalizada caracteriza-se por uma perda generalizada da pelicula passivante. Pode ocorrer devido à carbonatação, por lixiviação do hidróxido de cálcio ou ainda pela presença de quantidades excessivas de cloretos. Geralmente está associada a uma velocidade de corrosão baixa.

Na corrosão localizada (ou por picadas) o ataque processa-se em profundidade podendo conduzir à rotura da armadura. O nome deriva do facto de a dissolução da pelicula de passivação ser localizada, tipicamente associada à presença de cloretos e a uma velocidade de corrosão elevada. Este tipo de corrosão é ilustrado na Figura 2.18, juntamente com a corrosão generalizada.

Por sua vez, a corrosão sob tensão é característica do betão pré-esforçado, por este se apresentar sujeito a tensões elevadas. Neste tipo de corrosão a superfície do betão é sujeita ao aparecimento de uma microfissura de rápida progressão, causadora de rutura brusca e frágil do metal em questão, embora não exista sinais do ataque. É normalmente associado à fraca qualidade do betão, lixiviação do betão ou presença de determinados iões.

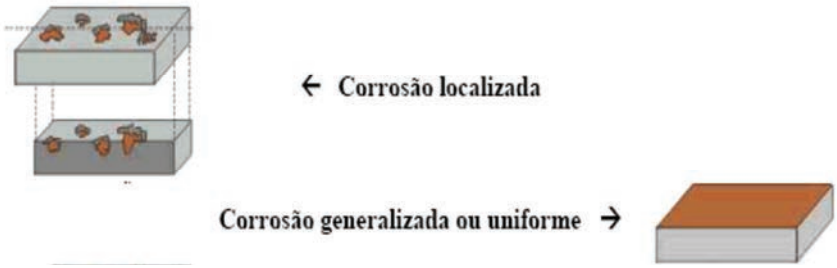


Figura 2.18 – Formas de corrosão [33].

2.5.2.4. Medidas preventivas

De forma a prevenir o início do processo de corrosão nas armaduras, podem ser necessárias algumas medidas de proteção. Apresentam-se a seguir algumas sugestões dessas medidas:

- adotar uma espessura de recobrimento adequada, por forma a melhorar a propriedade de barreira aos agentes agressivos pelo betão (espessura maior implicam maior intervalo de tempo para que os agentes agressivos atinjam a armadura);
- garantir a qualidade do betão de recobrimento;
- garantir uma baixa permeabilidade do betão.

3
REVISÃO NORMATIVA

Independentemente do tipo de estrutura, do material em que é construído, da idade ou da posição geográfica há um aspeto comum a todas as construções: todas se deterioram com o tempo. Este aspeto é tão relevante que por todo o mundo tem-se verificado o aumento dos custos com o reforço e reabilitação de estruturas, em grande parte devido à deficiente durabilidade das estruturas, conforme demonstrado no Quadro 3.1.

Quadro 3.1 – Custos com a construção em diferentes países (*Structural Engineering Documents - Case Studies of Rehabilitation, Repair, Retrofitting, and Strengthening of Structures, 2010*)

País	Trabalhos com estruturas novas	Trabalhos de manutenção e reparação	Total de trabalhos na construção
Japão(1)	52,5 Trilhões de Yen (83%)	10,7 Trilhões de Yen (17%)	63,2 Trilhões de Yen (100%)
Coreia do Sul(1)	116,8 Trilhões de Won (85%)	21,1 Trilhões de Won (15%)	137,9 Trilhões de Won (100%)
França(1)	85,6 Bilhões de Euros (52%)	79,6 Bilhões de Euros (48%)	165,2 Bilhões de Euros (100%)
Alemanha(1)	99,7 Bilhões de Euros (50%)	99,0 Bilhões de Euros (50%)	198,7 Bilhões de Euros (100%)
Itália(2)	58,6 Bilhões de Euros (43%)	76,8 Bilhões de Euros (57%)	135,4 Bilhões de Euros (100%)
Reino Unido(1)	60,7 Bilhões de Libras (50%)	61,2 Bilhões de Libras (50%)	121,9 Bilhões de Libras (100%)
Suíça(3)	29,1 Bilhões de Francos Suíços (62%)	17,9 1 Bilhões de Francos Suíços (38%)	47,0 Bilhões de Francos Suíços (100%)

Notas:

(1) Valores correspondentes ao ano de 2004;
(2) Valores correspondentes ao ano de 2003;
(3) Valores correspondentes ao ano de 2009.

De forma a fazer frente a esta problemática da deficiente durabilidade das estruturas de betão e consequente aumento de custos, inúmeros estudos e publicações relevantes sobre o tema têm surgido um pouco por toda a parte, tanto no desenvolvimento da aplicação de novas técnicas de conceção de estruturas de betão como na aplicação de novos materiais como constituintes do betão. Verifica-se também que têm-se intensificado o número de seminários e formações ([40] [28] [42]) com o intuito de dar a conhecer aos projetistas e empresas ligadas ao uso do betão os novos avanços atingidos com vista a uma maior durabilidade das estruturas face à exposição ambiental.

Esta preocupação em aumentar a durabilidade das estruturas, projetando-as de modo a obter um melhor comportamento perante as adversidades ambientais encontra-se bem patente nos principais códigos e regulamentos que especificam o projeto de estruturas de betão em diversos países. Nas revisões e emendas às suas Normas as principais entidades reguladoras têm incluído especificações relativas à correta definição das condicionantes ambientais, focando-se nas medidas a dispor de forma a prolongar a vida útil das estruturas.

O caminho adotado, até agora, pelas principais Normas internacionais tem sido a definição de medidas prescritivas ao projeto de estruturas de betão, impondo valores limites para algumas das principais características da estrutura que afectam a durabilidade, como:

- mínimo recobrimento das armaduras;
- máxima razão água/cimento;
- mínima dosagem de cimento;
- mínima classe de resistência do betão.

Uma comparação exaustiva das Normas internacionais, em relação às suas medidas para melhorar a durabilidade e prolongar a vida útil das estruturas, não é de forma alguma um dos objetivos deste trabalho. Esta secção apresenta uma análise de algumas das Normas, nas suas formas de expor e de tratar a problemática das condicionantes ambientais ao projeto de estruturas. Assim, serão abordadas:

- A Norma Norte Americana ACI 318M-2008;
- A Norma Brasileira NBR 6118:2003;
- A Norma Europeia EN 206-1:2000, na sua versão portuguesa NP EN 206-1:2007;
- O *fib* Model Code:2010.

Este capítulo propõe-se a efetuar uma verificação de como é feita a definição da exposição ambiental em cada uma dessas Normas, das medidas prescritivas que estas impõem face a diferentes exposições e a eventuais aspetos distintos, isto é, características próprias, que estas apresentam sobre o tema. Sendo o objetivo do trabalho analisar as metodologias para a consideração das condicionantes ambientais no projeto das estruturas de betão armado e pré-esforçado em Portugal, a Norma Europeia EN 206-1:2000 é abordada de forma mais detalhada, na sua versão portuguesa, a NP EN 206-1:2000, assim como as suas emendas e especificações correspondentes.

As Normas ACI 318M-2008) [46] e a NBR 6118:2003) [47] são referenciadas na tentativa de demonstrar que as abordagens não diferem muito de uma norma para outra. O Model Code 1990 serviu de base a alguns dos documentos normativos mais importantes para o projeto das estruturas de betão. Tendo sido apresentada a nova versão do Model Code 2010 recentemente, este é aqui abordado de modo a verificar o que vem implementar de novo nas metodologias de análise face às condições ambientais.

3.1. Norma Norte-Americana ACI 318M:2008

A recente revisão, realizada em 2008, ao código de construção em betão estrutural do American Concrete Institute (ACI: Building Code Requirements for Structural Concrete) [46] dedica um capítulo inteiro à durabilidade das estruturas. Neste capítulo da durabilidade é apresentada a definição das categorias de exposição da estrutura baseadas na severidade do ataque prevista. Esta classificação das condições ambientais é apresentada no Quadro 3.2, juntamente com as classes em que se dividem as categorias, dependendo do grau ou do nível de contacto com a humidade, cloretos, sulfatos, etc.

Quadro 3.2 – Categorias e classes de exposição na ACI 318:2008 (Fonte: ACI 318:2008 Quadro 4.2.1)

Categoria	Severidade	Classe	Condição	
F Gelo/degelo	Não aplicável	F0	Betão não exposto ao ciclo de gelo/degelo	
	Moderada	F1	Betão exposto aos ciclos de gelo/degelo e exposição ocasional à humidade	
	Severa	F2	Betão exposto aos ciclos de gelo/degelo e em contacto contínuo com a humidade	
	Muito severa	F3	Betão exposto aos ciclos de gelo/degelo em contacto contínuo com a humidade e exposto aos produtos químicos de descongelação	
S Sulfatos			Sulfato (SO_4) solúvel em água no solo, percentagem por peso	Sulfato (SO_4) dissolvido em água, em ppm.
	Não aplicável	S0	SO_4 <0,10	SO_4 <150
	Moderada	S1	0,10 ≤ SO_4 <0,10	150 ≤ SO_4 <1500 Água do mar
	Severa	S2	0,20 ≤ SO_4 <0,10	1500 ≤ SO_4 <10000
	Muito severa	S3	SO_4 > 2,00	SO_4> 10000
P Requisito de permeabilidade reduzida	Não aplicável	P0	Em contacto com a água, onde não é exigida permeabilidade reduzida.	
	Exigida	P1	Em contacto com a água, onde é exigida permeabilidade reduzida.	
C Protecção contra a corrosão das armaduras	Não aplicável	C0	Betão seco ou protegido da humidade	
	Moderada	C1	Betão exposto à humidade mas não a fontes externas de cloretos.	
	Severa	C2	Betão exposto à humidade, a fontes externas de cloretos de produtos químicos descongelantes, sal, água salobra, água do mar (água salgada), ou pulverizações a partir destas fontes	

Em cada categoria de exposição é definida uma classe "Não aplicável" para dar a possibilidade ao projetista de indicar que, a dita categoria, não se aplica ao elemento estrutural em causa. As exposições especialmente severas, tais como ácidos e temperaturas elevadas, assim como considerações estéticas, tais como revestimentos de superfície, são colocadas fora do seu âmbito de aplicação devendo ser abordados nas especificações de projeto.

Ao definir requisitos mínimos para as classes de exposição, o ACI 318M:2008 estabelece que os materiais constituintes e as suas proporções no betão devem ser seleccionados para atender a estes requisitos, para além de outros requisitos presentes no caderno de encargos. Os requisitos mínimos para cada uma das classes, como a razão água/cimento máxima ou a mínima resistência à compressão do betão, são apresentados no Quadro 3.3. Os Quadros 3.4 a 3.7 apresentam requisitos adicionais, para algumas classes de exposição, complementares aos requisitos gerais do Quadro 3.3.

Quadro 3.3 – Requisitos ao betão por classe de exposição no ACI 318:2008 (Fonte: ACI 318:2008 Quadro 4.3.1)

Classe de exposição	Máxima razão água/cimento	Mínima f'c (MPa)	Requisitos mínimos adicionais			
			Teor de ar			Limites os materiais cimentícios
F0	N/A	17	N/A			N/A
F1	0,45	31	Ver Quadro 3.4			N/A
F3	0,45	31	Ver Quadro 3.4			N/A
F4	0,45	31	Ver Quadro 3.4			Ver Quadro 3.6
			Tipo de cimento(1)			Aditivo de cloreto de cálcio
			ASTM C150	ASTM C595	ASTM C1157	
S0	N/A	17	Nenhuma restrição	Nenhuma restrição	Nenhuma restrição	Nenhuma restrição
S1	0,50	28	II(2)	IP (MS), IS (<70) (MS)	MS	Nenhuma restrição
S2	0,45	31	V(3)	IP (HS) IS (<70) (HS)	HS	Não permitido
S3	0,45	31	V + pozolana ou escória(4)	IP (HS) + pozolana ou escória ou IS (<70) (HS) + pozolana ou escória(4)	HS + pozolana ou escória(4)	Não permitido
P0	N/A	17	Nenhum			
P1	0,50	28	Nenhum			
			Máximo conteúdo do ião cloreto (Cl^-) solúvel em água no betão, percentagem por peso de cimento(5)			Disposições relacionadas
			Betão armado	Betão pré-esforçado		
C0	N/A	17	1,00	0,06		Nenhuma
C1	N/A	17	0,30	0,06		
C2	0,40	35	0,15	0,06		Ver (6)

Notas:

(1) Combinações alternativas aos tipos de cimento listados no Quadro 3.3 são permitidas quando testadas para a resistência aos sulfatos e cumprirem os requisitos presentes no Quadro 3.7.

(2) Para exposição à água do mar, outros tipos de cimento Portland com conteúdo de até 10% de aluminato tricálcico (C_3A) são permitidos se a razão água/cimento não ultrapassar 0,40.

(3) Outros tipos disponíveis de cimento, tais como Tipo III ou Tipo I são permitidos nas classes de exposição S1 ou S2, se o conteúdo de C_3A for menos do que 8 ou 5 por cento, respetivamente.
(4) A quantidade da pozolana ou escória de origem específica a ser usada não deve ser inferior à quantidade que foi determinada por registo de serviço para melhorar a resistência aos sulfatos, quando utilizada em betão contendo cimento Tipo V. Alternativamente, a quantidade da pozolana ou escória de origem específica a ser usada não deve ser inferior à quantidade testada em conformidade com a Norma ASTM C1012 e que preenche os critérios do Quadro 3.7.
(5) Conteúdo de iões cloreto solúveis em água, que é uma contribuição dos ingredientes incluindo água, agregados, cimento e adjuvantes, deve ser determinado na mistura do betão pela ASTM C1218M na idade entre 28 e 42 dias.
(6) Avaliar necessidade de proteção adicional.
As siglas utilizadas na tabela têm os seguintes significados, definidos na ACI E3-01:

- II – Cimento Portland Tipo II (uso generalizado);
- V – Cimento Portland Tipo V (uso onde for requerida elevada resistência aos sulfatos);
- IP – Cimento Portland de alto-forno;
- IS – Cimento Portland de pozolana;
- HS – Elevada resistência aos sulfatos;
- MS – Moderada resistência aos sulfatos.

Quadro 3.4 – Teor de ar total para betão exposto a ciclos de gelo/degelo (Fonte: ACI 318:2008 quadro 4.4.1)

Máxima dimensão nominal do agregado (mm)(1)	Teor de ar (%)	
	Classe de exposição F1	Classes de exposição F2 e F3
9,5	6,0	7,5
12,5	5,5	7,0
19,0	5,0	6,0
25,0	4,5	6,0
37,5	4,5	5,5
50,0(2)	4,0	5
75,0(2)	3,5	4,5

Notas:

(1)Ver ASTM C33 para a tolerância nos tamanhos grandes para várias designações de dimensão nominal máxima.
(2) Teor de ar aplicado à mistura total. Ao testar betões, no entanto, as partículas de agregados maiores do que 40 mm são removidos por peneiração e o teor de ar é medido na fração peneirada (tolerância no teor de ar como entregue aplica-se a este valor). Teor de ar da mistura total é calculado a partir do valor medido na fração peneirada passando no peneiro de 40 mm, em conformidade com a Norma ASTM C231.

Quadro 3.5 – Limites de cloretos para construções novas (Fonte: ACI 318:2008 quadro R4.3.1)

Tipo e condição da construção	Limite de cloretos, percentagem por massa		
	Método de teste		
	Solúvel em ácido	Solúvel em água	
	ASTM C1152	ASTM C1218M	Soxhlet(1)
Betão pré-esforçado	0,08	0,06	0,06
Betão armado molhado em serviço	0,10	0,08	0,08
Betão armado seco em serviço	0,20	0,15	0,15

Notas:
(1) O teste Soxhlet é descrito na ACI 222.1

Quadro 3.6 – Requisitos para o betão sujeito à classe de exposição F3 (Fonte: ACI 318:2008 quadro 4.4.2).

Materiais de cimentação	Percentagem máxima de materiais cimentícios totais por peso(1)
Cinzas volantes ou outras pozolanas em conformidade com a ASTM C618	25
Escória conforme com a ASTM C989	50
Sílica de fumo em conformidade com a ASTM C1240	10
Total de cinzas volantes ou outros pozolanas, escória, e sílica de fumo	50(3)
Total de cinzas volantes ou outras pozolanas e sílica de fumo	35(3)

Notas:

(1) Materiais de cimentação totais também incluem cimentos da ASTM C150, C595, C845 e C1157.
(2) A percentagem máxima acima apresentada deve incluir:
a) Cinzas volantes ou outras pozolanas no Tipo IP, cimento de mistura, ASTM C595 ou ASTM C1157;
b) Escória usada na manufaturação de um cimento de mistura IS, ASTM C595 ou ASTM C1157;
c) Sílica de fumo, ASTM C1240, presente num cimento de mistura.
(3) Cinzas volantes ou outras pozolanas e sílicas de fumo devem constituir não mais do que 25 e 10 por cento, respetivamente, do peso total dos materiais de cimentação.

Quadro 3.7 – Requisitos que estabelecem a adequação das combinações de materiais de cimentação expostos a sulfatos solúvel em água (Fonte: ACI 318:2008 quadro 4.5.1).

Classe de exposição	Expansão máxima quando ensaiada segundo a ASTM C1012		
	Aos 6 meses	Aos 12 meses	Aos 18 meses
S1	0,10%	-	-
S2	0,05%	0,10%*	-
S3	-	-	0,10%

Notas:

(1) O limite de expansão de 12 meses aplica-se apenas quando a expansão medida excede o limite máximo de expansão de 6 meses.

Ao projetar estruturas de acordo com a Norma ACI 318:2008, o projetista deve primeiro selecionar as categorias de exposição relevantes para cada componente da estrutura e, consoante estas exposições e os seus requisitos, escolher o que requerer uma maior exigência, em termos da razão água/cimento, resistência mínima do betão e outras exigências adicionais. Isto conduz a que, diferentes elementos da estrutura sejam concebidos para diferentes condições de exposição e, consequentemente apresentem diferentes requisitos e características [50].

3.2. Norma Brasileira NBR 6118 (2003)

À semelhança da Norma ACI 31:2008, a NBR 6118:2003 (Projecto de Estruturas de Concreto – Procedimento) [47] apresenta um capítulo dedicado à durabilidade das estruturas, definindo diretrizes gerais de abordagem do tema. As condicionantes ambientais são estabelecidas através da agressividade do meio ambiente, relacionada com as ações físicas e químicas que atuam na estrutura, independentemente das ações mecânicas, das variações volumétricas de origem térmica, da retração hidráulica e outras previstas no dimensionamento das estruturas de betão. A classificação para esta agressividade ambiental nas estruturas, segundo a NBR 6118:2008, deve ser de acordo com o estabelecido no Quadro 3.8.

A classificação da estrutura pode ser avaliada, através das condições de exposição da estrutura de um modo global ou dos seus elementos isolados. Além da classificação, a Norma associa diretamente a cada classe de agressividade ambiental, um determinado risco de deterioração da estrutura.

Quadro 3.8 - Classes de agressividade ambiental (Adaptado de [41]).

Classe de agressividade ambiental	Agressividade	Classificação geral do tipo de ambiente para efeito de projeto	Risco de deterioração da estrutura
I	Fraca	Rural	Insignificante
		Submersa	
II	Moderada	Urbana (1)(2)	Pequeno
III	Forte	Marinha (1)	Grande
		Industrial (1)(2)	
IV	Muito forte	Industrial (1)(3)	Elevado
		Respingos de maré	

Notas:
(1) Pode-se admitir um micro clima com uma classe de agressividade mais branda (um nível acima) para ambientes internos secos (salas, dormitórios, casas de banho, cozinhas e áreas de serviço de apartamentos residenciais e conjuntos comerciais ou ambientes com betão revestido com argamassa e pintura).
(2) Pode-se admitir uma classe de agressividade mais branda (um nível acima) em: obras em regiões de clima seco, com humidade relativa do ar menor ou igual a 65%, partes de estrutura protegidas de chuva em ambientes predominantemente secos, ou regiões onde chove raramente.
(3) Ambientes quimicamente agressivos, tanques industriais, galvanoplastia, branqueamento em indústrias de celulose e papel, armazéns de fertilizantes, indústrias químicas.

Destaca-se que é dada ao projetista alguma liberdade na avaliação das condições ambientais a que a estrutura se encontra exposta, não se restringindo unicamente ao exposto no Quadro 3.8, uma vez que permite considerar uma classe de exposição mais severa, desde que se possua dados específicos do ambiente em que será construída a estrutura. Definidas as classes, devem ser respeitados os requisitos mínimos relativos à razão água/cimento e resistência mínima de compressão do betão, para cada classe conforme apresenta o Quadro 3.9.

Quadro 3.9 - Correspondência entre classe de agressividade e qualidade do betão (Adaptado de [41]).

Betão	Tipo	Classe de agressividade			
		I	II	III	IV
Relação água/cimento, em massa	BA	≤ 0,65	≤ 0,60	≤ 0,55	≤ 0,45
	BP	≤ 0,60	≤ 0,55	≤ 0,50	≤ 0,45
Classe do betão (NBR 8953)	BA	≥ C20	≥ C25	≥ C30	≥ C40
	BP	≥ C25	≥ C30	≥ C35	≥ C40

Notas:

(1) O betão empregue na execução das estruturas deve cumprir com os requisitos estabelecidos na NBR 12655.
(2) BA corresponde a componentes e elementos estruturais de betão armado.
(3) BP corresponde a componentes e elementos estruturais de betão pré-esforçado.

Conforme visto no Capítulo 2 deste trabalho, além da razão água/cimento e da resistência à compressão do betão, outro factor que influencia a durabilidade das estruturas é a espessura de recobrimento das armaduras. Assim, tendo em conta também este factor, a NBR 6118:2003 define um conjunto de recobrimentos mínimos a serem verificados no projeto em cada classe, para determinados elementos estruturais, conforme indica o Quadro 3.10.

Quadro 3.10 – Correspondência classe de agressividade ambiental e recobrimento nominal (Adaptado de [41]).

Tipo de estrutura	Componente ou elemento	Classe de agressividade			
		I	II	III	IV(3)
		Recobrimento nominal (mm)			
Betão Armado	Laje (2)	20	25	35	45
	Viga/Pilar	25	30	40	50
Betão pré-esforçado (1)	Todos	30	35	45	55

Notas:

(1)Recobrimento nominal da armadura passiva que envolve a bainha ou os fios, cabos e cordoalhas, sempre superior ao especificado para o elemento de betão armado, devido aos riscos de corrosão fragilizante sob tensão.
(2) Para a face superior de lajes e vigas que serão revestidas com argamassa de contrapiso, com revestimentos finais secos tipo carpete e madeira, com argamassa de revestimento e acabamento tais como pisos de elevado desempenho, pisos cerâmicos, pisos asfálticos e outros tantos, as exigências desta tabela podem ser substituídas por dados constantes no item 7.4.7.5 da referida Norma, respeitando um recobrimento nominal maior ou igual a 15 mm.
(3) Nas faces inferiores de lajes de reservatórios, estações de tratamento de água e esgoto, condutas de esgoto, canaletas de efluentes e outras obras em ambientes química e intensamente agressivos, a armadura deve ter recobrimento nominal maior ou igual a 45 mm.

Apresentados os requisitos das classes de agressividade, esta Norma, em caso de condições de exposição adversas, permite ainda adotar medidas preventivas especiais de proteção e conservação, como sejam, a aplicação de revestimentos hidrofugantes e pinturas impermeabilizantes sobre as superfícies de betão, revestimentos de argamassas, de cerâmicas ou outros sobre a superfície do betão, galvanização da armadura, proteção catódica da armadura entre outros.

3.3. Norma Europeia EN 206-1:2000 na sua versão portuguesa NP EN 206-1:2007

A Norma Europeia EN 206-1:2000 é aqui abordada segundo a sua versão portuguesa, a NP EN 206-1:2007 "Betão. Parte 1: Especificação, desempenho, produção e conformidade" [2] resultante da revisão da NP ENV 206:1993. A norma tem vindo a ser revista de modo a acompanhar as evoluções tecnológicas relacionadas com os aspetos produtivos, a durabilidade das estruturas e metodologias de ensaio desenvolvidas ao longo dos anos [43]. Assim, as alterações mais recentes verificaram-se:

- na classificação das ações ambientais e nos requisitos para os betões inseridos em ambientes agressivos;
- no uso de adições em substituição de parte do cimento;
- no controlo da produção, incluindo o controlo da conformidade.

Estas alterações permitem que a norma proporcione um incremento dos requisitos de qualidade e durabilidade das estruturas de betão. Como tal, o seu campo de aplicação é abrangente aos diferentes aspetos de projeto de estruturas de betão, especificando requisitos para:

- materiais constituintes do betão;
- propriedades do betão fresco e endurecido e a sua verificação;
- limitações à composição do betão;
- especificação do betão;
- entrega de betão fresco;
- procedimentos de controlo de produção;
- critérios e avaliação da conformidade.

Os requisitos que apresenta servem para verificar os vários princípios de utilização a que se propõem cumprir com a sua correta aplicação, nomeadamente:

- construções mais sustentáveis e económicas, dando a devida importância à durabilidade e vida útil da obra;
- otimização dos recursos envolvidos, melhorando o controlo e normalização dos materiais constituintes, implicando também na sustentabilidade ambiental/ecológica da obra;
- definição precisa das responsabilidades durante todo o processo de especificação, desempenho, produção e conformidade do betão, e melhoria na comunicação entre os agentes envolvidos (dono-de-obra, projetista e construtor);
- salvaguarda do utilizador final da obra, garantindo a qualidade da mesma.

Sendo um documento de especificação, desempenho, produção e conformidade do betão, a norma define os principais procedimentos que devem acompanhar o betão de ligantes hidráulicos desde a sua origem no projeto de estrutura, passando pela produção, até ao momento da sua entrega para aplicação em obra, remetendo a partir daqui os requisitos de execução para a NP ENV 13670-1 "Execução de estruturas de betão. Parte 1: Regras gerais" [7]. Tal abrangência de procedimentos implica uma definição precisa de alguns termos, de modo a proporcionar um correcto entendimento das suas disposições. Não sendo necessário expor por extenso todas as definições presentes na norma, convém

apresentar algumas de maior destaque para o restante desenvolvimento do trabalho, como é o caso das *acções ambientais*, que a norma define como sendo "ações químicas e físicas às quais o betão se encontra exposto, com efeitos no betão, nas armaduras ou noutras peças de metal embebidos no betão, e não consideradas como cargas no projecto da estrutura". As definições de vida útil e durabilidade foram abordadas em secções próprias pelo que não se repetem aqui.

A norma separa o betão de ligante hidráulico a ser colocado no mercado em três tipos distintos, nomeadamente,

- *o betão de comportamento especificado*, betão cujas propriedades e características são especificadas ao produtor, sendo este o responsável por fornecer um betão que satisfaça aquelas propriedades e características,
- o *betão de composição prescrita*, betão cuja composição e materiais constituintes são especificados ao produtor, sendo este responsável por fornecer um betão com a composição especificada e
- o *betão de composição prescrita em norma* que é o betão cuja composição se encontra estabelecida numa norma válida no local de utilização do betão. O betão de composição prescrita em norma ainda não existe em Portugal.

Outras definições interessantes de referir são as respeitantes aos diferentes agentes intervenientes no processo de especificação, desempenho, produção e conformidade do betão. Estes agentes dividem-se em três: *especificador, produtor e utilizador*.

O *especificado*r é a pessoa ou entidade responsável pela especificação, isto é, pela compilação final de requisitos técnicos documentados dados ao produtor em termos de desempenho ou de composição, do betão fresco e endurecido. É ele quem deve assegurar que todos os requisitos relevantes, referentes às propriedades do betão, se encontram na especificação fornecida, assim como especificar todo e qualquer requisito para as propriedades do betão que sejam necessárias para o transporte após a entrega, para a colocação, compactação, cura ou outro tratamento adicional. Além da consideração das ações ambientais às quais a estrutura ficará exposta, o especificador deve também ter em consideração outros aspetos, como a utilização do betão fresco e endurecido, as condições de cura, requisitos do recobrimento da estrutura, etc.

O *produtor* define-se como a pessoa ou entidade que produz betão fresco. Dependendo do tipo de betão que lhe é solicitado, o produtor deve fazer com que o betão tenha comportamento ou composição de acordo com a especificação que lhe é entregue.

Por último, o *utilizador* é a pessoa ou entidade que utiliza betão fresco na execução de uma construção ou de um elemento. O utilizador gere uma troca de informações com o produtor de modo a proceder à correta receção e aplicação do betão especificado na estrutura a ser construída.

Os técnicos que elaboram o projeto de estabilidade da estrutura, designados como projetistas de estruturas enquadram-se na categoria de especificadores de betão, logo devem ter um conhecimento profundo da documentação que rege os requisitos que o betão deve cumprir de forma a ser considerado adequado para uma determinada utilização. A Figura 3.1 apresenta uma ilustração das relações entre a NP EN 206-1:2007 e as normas para a conceção e para a execução, as normas dos materiais constituintes e as normas de ensaio que devem ser tidas em atenção durante a especificação. Os Anexos A1, A2 e A3 apresentam uma lista mais extensa das normas e especificações do LNEC a serem consideradas durante este processo.

Conforme o tipo de betão desejado, ou seja, betão de composição prescrita ou betão de comportamento especificado é estabelecida a sua designação, de acordo com a norma. Caso o betão pretendido seja um betão de composição prescrita, na sua designação deverá estar presente:

- conformidade com a NP EN 206-1;
- dosagem de cimento;
- tipo e classe de resistência de cimento;
- razão a/c ou consistência através da classe de consistência;
- tipo, categorias e teor máximo de cloretos dos agregados;
- no caso de betão leve ou pesado a massa volúmica máxima ou mínima;
- máxima dimensão do agregado (ou outras limitações);
- tipo e quantidade de adjuvantes e/ou adições;
- as origens dos adjuvantes ou adições e do cimento em substituição das características impossíveis de definir por outros meios.

Para o betão de comportamento especificado, a designação apresentará obrigatoriamente:

- conformidade com a NP EN 206-1;
- classe de resistência à compressão (ex. C30/37);
- classes de exposição ambiental seguido abreviatura do nome do país (ex. XC3(P));
- classe de teor de cloretos (ex. Cl 0,20);
- máxima dimensão do agregado (ex. Dmáx22);
- classe de consistência (ex. S3) ou valor pretendido, incluindo neste caso o método de ensaio.

Um exemplo de designação de um betão de comportamento especificado pode ser NP EN 206-1 C30/37 XC3(P) Cl 0,20 D_{max}22 S3 (em referência aos parâmetros apresentados). Além destas designações, caso o betão seja um betão leve ou um betão pesado deve apresentar a massa volúmica através da classe (betão leve) ou de um valor pretendido (betão pesado).

Assim, para que os especificadores possam usar uma designação em conformidade com a norma, esta define um conjunto de classificações da estrutura de acordo com os parâmetros a serem definidos (classe de exposição ambiental, classe de teor de cloretos, etc.). Além destes parâmetros e requisitos gerais são definidos outros requisitos para condições especiais como sejam tipos ou classes especiais de cimento (ex. baixo calor de hidratação), tipos ou classes especiais de agregados, características requeridas pelo gelo/degelo (ex. teor de ar), etc. a serem estabelecidos quando forem relevantes.

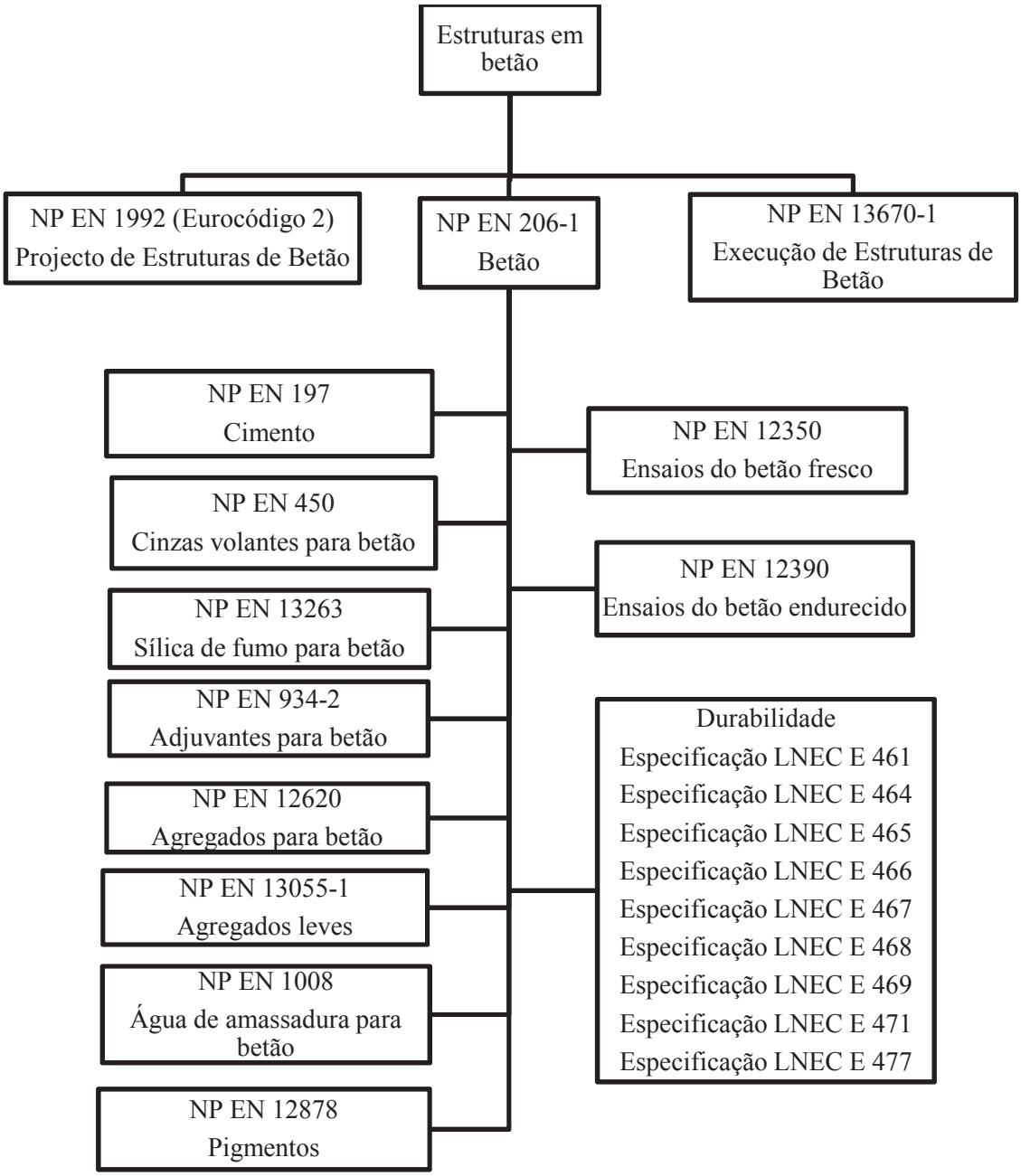


Figura 3.1 – Relações entre a NP EN 206-1 e as normas para a concepção e para a execução, as normas dos materiais constituintes e as normas de ensaio

A classificação primordial para o projeto da estrutura deverá ser a classificação ambiental, através da caracterização dos agentes ambientais do meio onde a estrutura será inserida. Esta classificação condiciona diversos parâmetros tanto do projeto de estabilidade da estrutura como da própria qualidade do betão, sendo exemplos, o recobrimento das armaduras, a classe de resistência à compressão do betão, a razão água/cimento ou a dosagem de cimento, consoante a vida útil pretendida para a estrutura. É importante aqui referir que a NP EN 1990:2009 [5] apresenta valores indicativos para a vida útil de projeto consoante as características e funções da estrutura, sendo recomendado,

como regra de aplicação, que a vida útil, de cada elemento de betão armado, deva ser especificada em conformidade com esses valores. O Quadro 3.11 transpõe esses valores indicativos para as estruturas de betão. Para uma correcta aplicação das metodologias de abordagem da durabilidade, a NP EN 206-1:2007 impõe obrigatoriamente o estabelecimento da vida útil da estrutura como o primeiro requisito fundamental a determinar.

Quadro 3.11 – Valores indicativos do tempo de vida útil do betão.

Tempo de vida útil de projeto		Exemplos
Categoria	Valor indicativo (anos)	
1	10	Estruturas provisórias(1)
2	10 a 25	Componentes estruturais substituíveis, por exemplo vigas-carril, apoios
3	15 a 30	Estruturas agrícolas e semelhantes
4	50	Estruturas de edifícios e outras estruturas correntes
5	100	Estruturas de edifícios monumentais, pontes e outras estruturas de engenharia civil Estruturas de edifícios sociais ou economicamente muito importantes

Notas:

(1) As estruturas ou componentes estruturais que podem ser desmontados, tendo em vista uma sua reutilização, não devem ser considerados como provisórias.

A classificação ambiental presente na norma apresenta seis categorias principais de classes de exposição ambientais e um conjunto de 18 subclasses referentes a estas, de acordo com os ataques a que a estrutura estará sujeita. Para uma melhor definição das classes de exposição nas estruturas, são ainda apresentados exemplos informativos de onde poderão ser aplicadas cada uma das classes e subclasses. A classificação e os respectivos exemplos podem ser consultados no Quadro 3.12.

Existe sempre a possibilidade de que o betão possa ser submetido a mais do que um mecanismo de degradação. Em tal caso a norma declara que as condições ambientais às quais está sujeito podem, assim, ter que ser expressas como uma combinação de classes de exposição. A mesma refere ainda que para um dado componente estrutural, é provável que as diferentes superfícies de betão possam ser submetidas a diferentes acções ambientais.

A classificação ambiental da norma encontra-se também presente no Eurocódigo 2 [6], no capítulo onde é abordada a durabilidade das estruturas de betão.

Quadro 3.12 – Classes de exposição definidas na NP EN 206-1.

Ação Ambiental	Classe	Descrição do ambiente	Exemplos informativos
Sem risco de corrosão ou ataque	X0	Para betão não armado: todas as exposições, excepto ao gelo/degelo, abrasão ou ao ataque químico; Para betão armado ou com metais embebidos: ambiente muito seco.	Betão no interior de edifícios com muita baixa humidade do ar.
Corrosão induzida por carbonatação	XC1	Seco ou permanentemente húmido	Betão no interior de edifícios com baixa humidade do ar; Betão armado permanentemente submerso em água.
	XC2	Húmido, raramente seco	Superfícies de betão sujeitas a longos períodos de contacto com água; Muitas fundações
	XC3	Moderadamente húmido	Betão no interior de edifícios com moderada ou elevada humidade do ar; Betão no exterior protegido da chuva.
	XC4	Ciclicamente húmido e seco	Superfícies de betão sujeitas ao contacto com a água, fora do âmbito da classe XC2
Corrosão induzida por cloretos não provenientes da água do mar	XD1	Moderadamente húmido	Superfícies de betão expostas a cloretos transportados pelo ar.
	XD2	Húmido, raramente seco	Piscinas; Betão exposto a águas industriais contendo cloretos
	XD3	Ciclicamente húmido e seco	Partes de pontes expostas a salpicos de água contendo cloretos; Pavimentos; Lajes de parques de estacionamento de automóveis.
Corrosão induzida por cloretos da água do mar	XS1	Ar transportando sais marinhos mas sem contacto directo com água do mar.	Estruturas na zona costeira ou na sua proximidade.
	XS2	Submersão permanente.	Partes de estruturas marítimas.
	XS3	Zona de marés, de rebentação e de salpicos.	Partes de estruturas marítimas.
Ataque pelo gelo/degelo com ou sem produtos descongelantes	XF1	Moderado número de ciclos de gelo/degelo, sem produtos descongelantes.	Superfícies verticais de betão expostas à chuva e ao gelo.
	XF2	Moderado número de ciclos de gelo/degelo, com produtos descongelantes	Superfícies verticais de betão de estruturas rodoviárias expostas ao gelo e a produtos descongelantes transportados pelo ar.

	XF3	Fortemente saturado, sem produtos descongelantes	Superfícies horizontais de betão expostas à chuva e ao gelo
	XF4	Fortemente saturado, com produtos descongelantes	Estradas e tabuleiros de pontes expostos a produtos descongelantes; Superfícies de betão expostas ao gelo e a salpicos de água contendo produtos descongelantes; Zona das estruturas marítimas expostas à rebentação e ao gelo.
Ataque químico	XA1	Ambiente químico ligeiramente agressivo, de acordo com o Quadro 2 da NP EN 206-1.	Terrenos naturais e água no terreno.
	XA2	Ambiente químico moderadamente agressivo, de acordo com o Quadro 2 da NP EN 206-1.	Terrenos naturais e água no terreno.
	XA3	Ambiente químico fortemente agressivo, de acordo com o Quadro 2 da NP EN 206-1.	Terrenos naturais e água no terreno.

A classificação da exposição ambiental por ataque químico é feita considerando um conjunto de substâncias e patamares de concentração, presentes no Quadro 3.13. Os ambientes classificados neste quadro têm como base o solo e a água nele contida, com temperaturas do solo ou da água entre os 5 ºC e os 25 ºC e com velocidades da água suficientemente lentas para que possam ser consideradas próximas das condições estáticas. A classe de exposição é determinada pelo valor mais elevado para qualquer característica química. Quando duas ou mais características agressivas conduzirem à mesma classe, o ambiente deve ser classificado na classe imediatamente superior, a menos que um estudo especial para este caso específico prove que tal não é necessário.

As classes de ataque químico são as únicas explicitamente alvo de quantificação na norma, conforme o Quadro 3.13 demonstra. São ainda apresentadas no Anexo F valores limites recomendados para a composição do betão mas os valores apresentados são apenas de carácter informativo, salvo para a classe XC0 onde são definitivos, sendo a limitação da composição e outros aspetos regulamentares relativos às restantes classes definidos conforme o país de execução da estrutura.

Quadro 3.13 – Valores limites das substâncias químicas agressivas para o betão.

Meio	Característica química	Método de ensaio de referência	XA1	XA2	XA3
Águas	SO_4^{2-} mg/l	NP EN 196-2:2006	≥ 200 e ≤ 600	> 600 e ≤ 3000	> 3000 e ≤ 6000
	pH	ISO 4316	≥ 5,5 e ≤ 6,5	≥ 4,5 e < 5,5	≥ 4,0 e < 4,5
	CO^2 agressivo mg/l	NP EN 13577	≥ 15 e ≤ 40	> 40 e ≤ 100	> 100 até a saturação
	NH_4^+ mg/l	ISO 7150-1 ou ISO 7150-2	≥ 15 e ≤ 30	> 30 e ≤ 60	> 60 e ≤ 100
	Mg^{2+} mg/l	ISO 7980	≥ 300 e ≤ 1000	> 1000 e ≤ 3000	> 3000 até a saturação
Solos	SO_4^{2-} total [a)] mg/kg	EN 196-2[b)]	≥ 2000 e ≤ 3000[c)]	> 3000[c)] e ≤ 12000	> 12000 e ≤ 24000
	Acidez ml/kg	DIN 4030-2	> 200 Baumann Gully	Não encontrado na prática	

Notas:

a) Os solos argilosos com uma permeabilidade abaixo de 10^{-5} m/s podem ser colocados numa classe mais baixa.

b) O método de ensaio prescreve a extracção do SO_4^{2-} através de ácido clorídrico; em alternativa, pode usar-se a extracção aquosa, se houver experiência no local de utilização do betão.

c) O limite de 3000 mg/kg deve ser reduzido para 2000 mg/kg, caso exista risco de acumulação de iões sulfato no betão devido a ciclos de secagem e molhagem ou à absorção capilar.

Na versão portuguesa os requisitos para o método de especificação da resistência às acções ambientais são expostos na Especificação LNEC E 464 [12] quando adotada a metodologia prescritiva de abordagem.

Uma ressalva neste ponto do trabalho: ficou implícito na explanação até agora discutida que a norma dá maior destaque a uma metodologia prescritiva de abordagem da durabilidade, contudo, são expostas duas metodologias de abordagem, uma através de valores limites para a composição do betão, a qual é aplicada segundo a Especificação LNEC E 464, e outra através de métodos de especificação do betão baseados no desempenho.

A secção 5.3.3 da norma indica que os requisitos relacionados com as classes de exposição podem ser estabelecidos utilizando métodos de especificação do betão baseados no desempenho que considerem a durabilidade e ser especificados em termos de parâmetros relacionados com o desempenho. Ainda na norma o Anexo J dá as orientações para a aplicação de um método alternativo de especificação do betão baseado no desempenho que considere a durabilidade. Esta metodologia baseada em propriedades de desempenho pode ser adoptada em Portugal, para as classes XC e XS, por meio da aplicação da Especificação LNEC E 465 [13]. As Especificações LNEC E 464 e LNEC E 465 referentes às duas abordagens possíveis para a especificação do betão são apresentadas em detalhe nos Capítulos 4 e 5 deste trabalho. Além das duas especificações referidas a NP EN 206-1:2007 apresenta um conjunto de outras especificações associadas, como sejam as especificações LNEC E 461 [10] e a LNEC E 477 [19].

A Especificação LNEC E 461:2007 "Betões. Metodologia para prevenir reações expansivas internas" [10] identifica as rochas e minerais potencialmente reativos aos álcalis, define metodologias para avaliar a reatividade dos agregados e a possibilidade das composições de betão virem a desenvolver reações expansivas internas, estabelecendo as medidas a tomar para evitar a ocorrência de reações expansivas por reações álcalis-sílica ou por formação de etringite retardada. A reação álcalis-carbonato e as outras reações sulfáticas internas não são abordadas, a primeira por não ser conhecida a sua ocorrência em Portugal e as restantes porque o cumprimento das normas de produtos relevantes previnem a sua ocorrência [41]. A par da descrição de quais os tipos de rochas e minerais potencialmente reativos aos álcalis, a norma propõe uma metodologia para a avaliação da reatividade dos agregados (Figura 3.2). Esta metodologia, não é no entanto aplicável aos granitóides, devendo para estes ser empregue uma metodologia diferente. Para as rochas calcárias, desde que o teor de resíduos insolúveis em ácido seja inferior a 2%, dispensa-se também a presente metodologia.

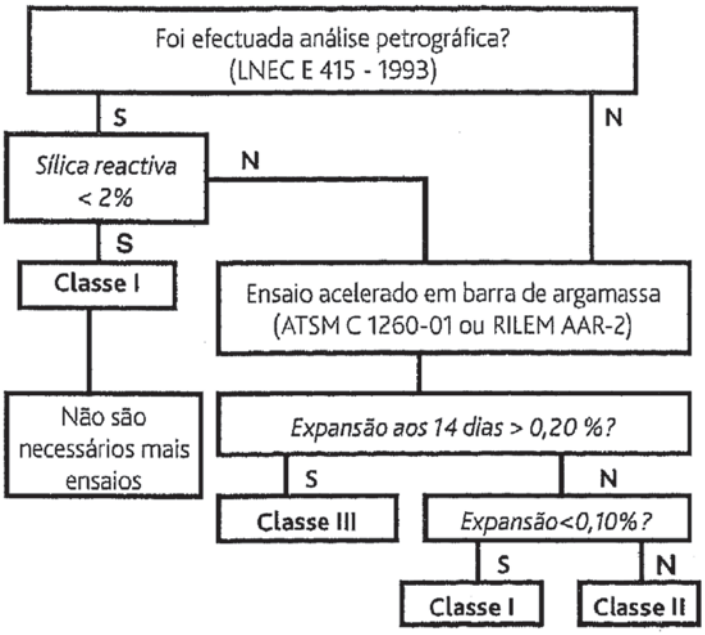


Figura 3.2 – Metodologia para a avaliação da reatividade dos agregados [10].

A reatividade dos agregados é definida em três classes, conforme a seguir se indica:

- Classe I – agregado não reativo;
- Classe II – agregado potencialmente reativo;
- Classe III – agregado potencialmente reativo.

A probabilidade de ocorrência de reações expansivas será maior para os agregados da classe III. Ao nível do projeto, o dono de obra ou o projetista deve identificar o nível de prevenção aplicável, em função do risco associado à ocorrência de fenómenos de degradação da estrutura e da categoria de exposição à humidade. Em face das categorias ambientais dos betões e do risco das estruturas são definidos três níveis de prevenção:

- P1 – ausência de precauções especiais;
- P2 – nível de prevenção normal;
- P3 – nível de prevenção especial.

O caso P1 não apresenta preocupações especiais, não sendo necessário tomar qualquer medida preventiva. Já para o nível normal de prevenção P2 e para o nível de prevenção especial P3 devem ser adoptadas medidas preventivas. Estas medidas são comuns aos dois casos residindo a diferença no facto de o nível P2 exigir a aplicação de uma medida enquanto no nível P3 devem ser pelo menos duas as medidas preventivas aplicadas. Essas medidas são:

- controlar a alcalinidade dos poros do betão;
- evitar a presença de um teor crítico de sílica reactiva e manter o betão seco;
- controlar a humidade;
- modificar as propriedades do gel para não ser expansivo.

Relativamente às reações sulfáticas internas é adotada a metodologia anterior, identificando-se o nível de ocorrência de fenómenos de degradação da estrutura e da categoria de exposição à humidade sendo também definidos três níveis de prevenção, P1, P2 e P3. A forma de aplicação dessas medidas é semelhante ao já abordado, isto é, o nível P1 não requer medidas, o nível P2 requer uma medida preventiva e o nível P3 pelo menos duas das seguintes medidas:

- controlar a temperatura máxima do betão;
- controlar o teor de álcalis do betão e de aluminatos e sulfatos do ligante;
- controlar a humidade e manter o betão seco;
- controlar o teor de hidróxido de cálcio.

A especificação LNEC E 477:2007 "Guia para especificação do betão de ligantes hidráulicos conforme com a NP EN 206-1" [19] serve como um agregador de informações, fornecendo uma sistematização da especificação do betão de acordo com a norma. Esta especificação não acrescenta propriamente novas metodologias de abordagem mas é de grande valor pois efectua um encadeamento das duas abordagens, nomeadamente, abordagem prescritiva e abordagem baseada no desempenho, com as restantes disposições da NP EN 206-1. É assim um documento de orientação do processo de especificação do betão relacionando os diversos regulamentos aplicáveis. Uma vez que o processo de especificação do betão exige que o especificador consulte vários regulamentos, ter um documento que apresente as relações entre estes regulamentos e sistematize o procedimento é uma mais-valia enorme.

3.4.O *fib* Model Code 2010

O *fib* Model Code 2010 (na sigla MC 2010) [48] é a continuação dos Model Code que foram desenvolvidos e publicados pela *fib* e pelos seus antecessores CEB e FIP nas últimas três décadas. Estes incluem a primeira edição do Model Code CEB-FIP publicado em 1978, o CEB Model Code sobre Dimensionamento Sísmico de Estruturas de Betão de 1985, o CEB-FIP Model Code 1990, e o *fib Bulletin* 34, "Model Code no Dimensionamento da Vida Útil" de 2006.

O Model Code influenciou sempre as grandes normas e regulamentos internacionais, tanto a nível de concepção como de pesquisa e investigação. Tendo um tempo de preparação de quase 10 anos o MC 2010 tem como objectivo seguir o caminho traçado pelos seus antecessores e estabelecer-se como um dos documentos mais abrangentes sobre estruturas de betão, incluindo o seu ciclo de vida completo: projeto, dimensionamento, construção, conservação e demolição.

Dada a sua importância no meio dos regulamentos e normas estruturais, estando sempre na vanguarda das técnicas e métodos, é justo referir numa pequena análise as abordagens apresentadas por este documento. Por outro lado, a Especificação LNEC E 477 já abordada, com base nas disposições da NP EN 206-1, permite que a abordagem à durabilidade de uma obra de betão estrutural seja feita de forma prescritiva (pela aplicação da LNEC E 464), recorrendo às propriedades do desempenho do betão

(pela aplicação da LNEC E 465) ou ainda recorrendo a outros métodos probabilísticos como os propostos pela *fib* no Model Code.

A degradação das estruturas é amplamente discutida neste documento, abordando as questões da exposição ambiental, durabilidade e vida útil, destacando-se das restantes normas pois apresenta uma análise mais profunda desta questão. São abordadas questões desde mecanismos de transporte dos agentes agressivos para o betão até o dimensionamento da durabilidade, com base numa determinada vida útil, através da quantificação dos mecanismos de degradação.

Os mecanismos de transporte de líquidos e gases no betão endurecido apresentados no MC 2010 são a permeação (permeabilidade da água e dos gases), a difusão (da água, dos gases e dos iões cloretos) e a sucção capilar. Associados a estes mecanismos, a par de uma explicação teórica dos mesmos, são apresentados métodos de quantificação que os permitam considerar no dimensionamento da durabilidade.

Ainda relativamente à durabilidade do betão, são apresentados modelos de previsão do avanço da deterioração com o tempo, resultante tanto de ataques directos ao betão (ciclo gelo/degelo, ataque químico, reactividade dos agregados) como de ataques indirectos (carbonatação e ataque de cloretos conduzindo à corrosão das armaduras), considerando as propriedades do betão.

Assim, no MC 2010, são apresentados e discutidos os seguintes fenómenos de deterioração:

- a progressão da carbonatação;
- a penetração de cloretos;
- a degradação devida aos ciclos de gelo/degelo e aos produtos descongelantes associados a estes ciclos;
- as reacções álcalis-agregado;
- a degradação por ácidos;
- a progressão da lixiviação.

São apresentados modelos de cálculo para todos os fenómenos listados, salvo para o ataque por ciclos de gelo/degelo e reacções álcalis-sílica onde os modelos ainda estão em discussão sendo porventura apresentados em versões posteriores do código.

A par da apresentação dos mecanismos de transporte e das propriedades do betão associadas com a durabilidade, o MC 2010 propõe a verificação de estados limites associados à durabilidade da estrutura.

Para tal apresenta quatro metodologias possíveis de verificação:

- Modelo de segurança probabilística (*probabilistic safety format*);
- Modelo do coeficiente parcial de segurança (*partial safety factor format*);
- Abordagem de consideração da satisfação (*deemed-to-satisfy approach*);
- Abordagem de prevenção da deterioração (*avoidance-of-deterioration approach*).

Estas quatro metodologias, excetuando-se os casos em que não exista ainda um modelo internacionalmente consensual disponível, são posteriormente aplicadas no MC 2010 aos mecanismos de deterioração seguintes:

- Corrosão induzida por carbonatação (betão não fendilhado);
- Corrosão induzida por cloretos (betão não fendilhado);
- Ataque gelo/degelo;
- Ataque químico;
- Reações álcalis-agregados.

É dado ainda destaque à influência das fendas na corrosão das armaduras e ao risco de despassivação relativamente ao aço pré-esforçado.

Ao permitir o uso de diferentes formas de abordar a deterioração das estruturas, o MC 2010 dá maior liberdade ao responsável pelo projeto de estabilidade de modo a garantir uma durabilidade adequada à vida útil pretendida, permitindo otimizar o projeto com benefícios em termos de custos, sem sacrificar a segurança estrutural. Introduzindo novas abordagens inovadoras de encarar o problema da durabilidade, com maior recurso à engenharia dos materiais e não tanto por limitações prescritivas ao betão, este documento facilita a transição das restantes normas internacionais das metodologias mais simplistas e conservadoras para a adoção de novas metodologias de cálculo e quantificação dos mecanismos de deterioração e das formas de prevenção destes.

3.5. Considerações Finais

A revisão de algumas das mudanças recentes em alguns dos principais regulamentos internacionais discutidos acima revela algumas tendências notáveis:

- A definição das condições de exposição está alinhada com a severidade de exposição antecipada durante a vida útil das estruturas;
- São definidas classes de risco ambiental, sendo ainda subdivididas em subclasses para obter mais clareza. Exemplos típicos são incluídos para a orientação dos projetistas;
- Dependendo da severidade da exposição, o que limita os valores para a composição e as propriedades do betão são especificados;
- Onde forem essenciais outros requisitos adicionais também são especificados, por exemplo, limite permitido de iões cloreto no betão (ACI 318) ou tipo de cimento para a exposição a sulfatos (NP EN 206-1);
- A não consideração dos fatores ambientais é uma situação potencialmente geradora de dificuldades em obra, e, eventualmente, no respectivo licenciamento;
- Apesar do betão ser ainda maioritariamente associado apenas à classe de resistência à compressão, todas as normas internacionais têm atuado para que tal deixe de ser o único meio caracterizador do mesmo. A classe de exposição ambiental e o tempo de vida útil também são requisitos fundamentais ao projeto;
- A abordagem prescritiva por ser de mais fácil aplicação apesar de ser viável e resultar, tem-se mostrado simplista e conservadora, procurando-se desenvolver novas metodologias que permitam caracterizar o betão, através das propriedades do desempenho, recorrendo à engenharia dos materiais e à análise de modelos temporais de deterioração;
- Mesmo actuando maioritariamente a nível de projeto, as normas não deixam de referir que o betão da estrutura só satisfaz os requisitos de durabilidade para a utilização pretendida nas condições ambientais específicas, desde que seja devidamente colocado, compactado e curado, tenha sido selecionada a classe de exposição apropriada e seja feita a manutenção adequada.

4
A METODOLOGIA PRESCRITIVA DA ESPECIFICAÇÃO LNEC E 464

4.1. INTRODUÇÃO

A metodologia prescritiva apresentada na Especificação LNEC E 464 [12] trata da definição de valores limites da composição e da classe de resistência do betão para as diferentes classes de exposição apresentadas e para diferentes tipos de cimentos. Contudo referirmo-nos a esta especificação somente como o documento que apresenta as medidas prescritivas a aplicar ao betão da estrutura é algo minimalista e redutor da sua importância. De facto, a especificação LNEC E 464, além de apresentar estas medidas prescritivas, esclarece a seleção das classes de exposição ambientais agressivas para o betão, estabelece a aptidão dos ligantes hidráulicos (cimentos e misturas de cimentos e adições) como constituintes do betão, e ainda o enquadramento geral para garantir a vida útil de projeto das estruturas de betão e a aptidão do conceito de desempenho equivalente. Assim, trata-se de um documento de enorme importância para o projeto de estruturas, até mesmo quando a metodologia prescritiva não é a adotada para lidar com a exposição ambiental.

Neste capítulo propõe-se apresentar a especificação LNEC E 464 em termos gerais, com foco nas classes de exposição e respetivas medidas prescritivas, assim como nas misturas de cimentos e adições, sistematizando a metodologia descrita de modo a poder ser possível gerar uma aplicação de cálculo de auxílio aos especificadores do betão. Como tal são apresentadas as disposições da especificação e a forma adotada para a automatização dos procedimentos.

4.2. A DEGRADAÇÃO DO BETÃO E AS CLASSES DE EXPOSIÇÃO AMBIENTAL

Não são apresentadas na especificação classes de exposição ambiental diferentes das apresentadas na NP EN 206-1, descritas anteriormente no Quadro 3.12. São apresentados sim, mais exemplos informativos das classes de exposição e excluídas as que não são aplicáveis a Portugal, nomeadamente, a XF3 e a XF4.

As classes descritas na especificação são organizadas em quadros relativos à deterioração do betão por corrosão das armaduras por ação do dióxido de carbono (classes XC) e dos cloretos provenientes da água do mar ou de outras origens (classes XS e XD. respetivamente), ou por deterioração do próprio betão pelos ciclos de gelo/degelo (classes XF). A deterioração do betão por ataque químico (classes XA) e os casos onde não há risco de corrosão de metais ou de ataque ao betão (classe X0) não são descritos nem exemplificados na especificação, pois não acrescentando nada de novo mantém-se diretamente a descrição e os exemplos apresentados na NP EN 206-1.

A classificação ambiental disposta na especificação é apresentada no Quadro 4.1.

Quadro 4.1 – Classes de exposição, descrição sumária e exemplos informativos.

Ataque	Classe	Descrição do ambiente	Exemplos informativos
Sem risco de corrosão ou ataque	X0	Para betão sem armaduras: Todas as exposições, exceto ao gelo/degelo, à abrasão ou ao ataque químico.	Betão enterrado em solo não agressivo; Betão permanentemente submerso em água não agressiva; Betão com ciclos de molhagem/secagem não sujeito à abrasão, gelo/degelo ou ao ataque químico
		Para betão armado muito seco	Betão armado em ambiente muito seco. Betão no interior de edifícios com muita baixa humidade do ar
Corrosão induzida por carbonatação	XC1	Seco ou permanentemente húmido	Betão armado no interior de edifícios ou estruturas, com exceção das áreas com humidade elevada. Betão armado permanentemente submerso em água não agressiva.
	XC2	Húmido, raramente seco	Betão armado enterrado em solo não agressivo. Betão armado sujeito a longos períodos de contacto com água não agressiva.
	XC3	Moderadamente seco	Superfícies exteriores de betão armado protegidas da chuva transportada pelo vento. Betão armado no interior de estruturas com moderada ou elevada humidade do ar (v.g., cozinhas, casas de banho).
	XC4	Ciclicamente húmido e seco	Betão armado exposto a ciclos de molhagem/secagem. Superfícies exteriores de betão armado expostas à chuva ou fora do âmbito da XC2
Corrosão induzida por cloretos não provenientes da água do mar	XD1	Moderadamente húmido	Betão armado em partes de pontes afastadas da ação direta dos sais descongelantes, mas expostas a cloretos transportados pelo ar.
	XD2	Húmido, raramente seco	Betão armado completamente imerso em água contendo cloretos; piscinas.
	XD3	Ciclicamente húmido e seco	Betão armado diretamente afetado pelos sais descongelantes ou pelos salpicos de água contendo cloretos(1). Betão armado em que uma das superfícies está imersa em água contendo cloretos e a outra exposta ao ar (v.g., algumas piscinas ou partes delas). Lajes de parques de estacionamento de automóveis(2) e outros pavimentos expostos a sais contendo cloretos.

Corrosão induzida por cloretos da água do mar	XS1	Ar transportando sais marinhos mas sem contacto direto com água do mar.	Betão armado em ambiente marítimo saturado de sais. Betão armado em áreas costeiras perto do mar, diretamente exposto e a menos de 200 m do mar; esta distância pode ser aumentada até 1 km nas costas planas e foz de rios.
	XS2	Submersão permanente.	Betão armado permanentemente submerso.
	XS3	Zona de marés, de rebentação e de salpicos.	Betão armado em que uma das superfícies está imersa em água do mar e a outra exposta ao ar (v.g., túneis submersos ou abertos em rocha ou solos permeáveis no mar ou em estuário de rios). Esta exposição exigirá muito provavelmente medidas de proteção suplementares.
Ataque pelo gelo/degelo	XF1	Moderado número de ciclos de gelo/degelo, sem produtos descongelantes.	Betão em superfícies verticais expostas à chuva e ao gelo. Betão em superfícies não verticais mas expostas à chuva ou gelo.
	XF2	Moderado número de ciclos de gelo/degelo, com produtos descongelantes.	Betão, tal como nas pontes, classificável como XF1, mas exposto aos sais descongelantes direta ou indiretamente.

Notas:
(1) Em Portugal estas situações deverão ser consideradas na classe XD1.
(2) Idem, se relevante.

Ainda relativamente às classes, a especificação esclarece algumas situações relativas ao ataque químico do betão. Uma delas refere-se às classes XA1 e XA2, para as quais diz que nas situações onde houver riscos de acumulação de sulfatos devido a ciclos de secagem e molhagem ou de absorção capilar, devem satisfazer-se os requisitos da classe superior. Para além disso, esclarece também que o ataque por bactérias, nomeadamente, as anaeróbias que se encontram, por exemplo, nos esgotos e produzem ácido sulfúrico e nítrico, é um ataque químico fortemente agressivo, estando portanto enquadrado na classe XA3.

Qualquer tentativa de auxílio ao especificador do betão, deve então apresentar-lhe a informação necessária, nomeadamente, a descrição e exemplos, a respeito das classes de exposição que permitam esclarecer, com rigor, qual a classe a aplicar.

4.3. PRESCRIÇÕES QUANTO À COMPOSIÇÃO E CLASSE DE RESISTÊNCIA DO BETÃO PARA CONSIDERAR A DURABILIDADE

Esclarecidas as classes de exposição ambiental, a especificação atribui prescrições, ou seja, limites e restrições, aplicadas a cada uma das classes de modo a considerar a durabilidade e cumprir a vida útil de projeto. Para esta vida útil de projeto são válidas as considerações apresentadas no Capítulo 3, sobre a sua importância e influência nas metodologias de consideração da durabilidade. A metodologia prescritiva abordada por esta especificação apenas considera medidas para estruturas com vida útil de 50 ou de 100 anos, dando a hipótese de caso a vida útil ser diferente destes valores poder recorrer-se aos métodos da Especificação LNEC E 465, discutida no capítulo seguinte.

A especificação distingue prescrições diferentes para cada caso de vida útil além de apresentar algumas prescrições gerais que são comuns a ambos os casos de vida útil. É importante aqui destacar que as prescrições dependem, para além da classe de exposição, do tipo de ligante a utilizar. Os tipos de cimentos considerados na definição das prescrições são os que estão presentes no Quadro 1 da NP EN 197-1 [4], contudo a norma permite a adoção de misturas de cimentos e adições como constituintes do betão, definindo para isso uma metodologia de verificação ou formulação de misturas. A aptidão dos cimentos, adições e misturas é abordada mais à frente neste capítulo.

À classe X0, conforme exposto no capítulo 3, deve aplicar-se o estabelecido no Anexo F da NP EN 206-1 independentemente da vida útil da estrutura, podendo utilizar-se qualquer cimento (exceto II/T e II/W). Para as restantes classes de exposição ambiental e ainda em função do tipo de ligante, a especificação estabelece:

- as classes de resistência à compressão mínimas do betão normal (ou pesado) e leve;
- as mínimas dosagens de ligante;
- as máximas razões água/ligante;
- os recobrimentos nominais mínimos a adotar (exceto para as classes XF e XA);
- os teores mínimos de ar (exclusivo para as classes XF)

Mais uma vez, a especificação recorre a quadros para organizar as prescrições por tipo de ataque e tipo de ligante. Somente as prescrições para o caso da vida útil ser de 50 anos são explicitamente apresentadas na especificação. No caso das estruturas de 100 anos de vida útil a especificação não apresenta de forma explícita as prescrições, mas define as alterações a efetuar nas prescrições para os 50 anos de vida útil de forma a adapta-las corretamente para os 100 anos.

As prescrições que permitem esperar que em cada classe de exposição fique garantida a vida útil de projeto de 50 anos são ilustradas no Quadro 4.2.

Quadro 4.2 – Limites da composição e da classe de resistência do betão para uma vida útil de 50 anos.

Tipo de cimento	Classe de exposição	Recobrimento nominal mínimo (mm)	Dosagem de cimento mínima (kg/m3)	Razão água/cimento	Classe de resistência mínima	Teor de ar (%)
-	X0	-	-	-	C12/15	-
CEM I; CEM II/A(1)	XC1	25	240	0,65	C25/30	-
	XC2	35	240	0,65	C25/30	-
	XC3	35	280	0,60	C30/37	-
	XC4	40	280	0,60	C30/37	-
	XS1/XD1(3)	45	360	0,45	C40/50	-
	XS2/XD2(3)	50	360	0,45	C40/50	-
	XS3/XD3(3)	55	380	0,40	C50/60	-
	XF1	-	280	0,60	C30/37	-
	XF2	-	280	0,55	C30/37	4,0
	XA1(3)	-	340	0,50	C35/45	-
	XA2(3)	-	360	0,45	C40/50	-
	XA3(3)	-	380	0,45	C40/50	-
CEM II/B(1) CEM III/A(2) CEM IV(2) CEM V/A(2)	XC1	25	260	0,65	C25/30	-
	XC2	35	260	0,65	C25/30	-
	XC3	35	300	0,55	C30/37	-
	XC4	40	300	0,55	C30/37	-
	XF1	-	300	0,55	C30/37	-
	XF2	-	300	0,50	C30/37	4,0
CEM IV/A CEM IV/B CEM III/A CEM III/B CEM/V CEM II/B(3) CEM II/A-D	XS1/XD1	45	320	0,55	C30/37	-
	XS2/XD2	50	320	0,55	C30/37	-
	XS3/XD3	55	340	0,45	C35/45	-
	XA1	-	320	0,55	C35/45	-
	XA2	-	340	0,50	C40/50	-
	XA3	-	360	0,45	C40/50	-

Notas:

(1) Não aplicável aos cimentos II/A-T e II/A-W e aos cimentos II/B-T e II/B-W, respetivamente.
(2) Não aplicável aos cimentos com percentagem inferior a 50% de clínquer Portland, em massa.
(3) Não aplicável aos cimentos II-T, II-W, II/B-L e II/B-LL.

As alterações a efetuar às prescrições do Quadro 4.2, de modo a garantir um tempo de vida útil de 100 anos são:

- nas classes XC, XD e XS o recobrimento nominal mínimo é aumentado em 10 mm relativamente ao valor apresentado, mantendo-se os restantes requisitos inalterados;
- nas classes XF e XA:
  - a máxima razão água/cimento é diminuída de 0,05;
  - a mínima dosagem de cimento é aumentada de 20 kg/m^3;
  - a classe de resistência à compressão simples dos betões é aumentada de 2 classes.

As prescrições gerais dizem respeito a prescrições que se aplicam independentemente da vida útil pretendida. Uma dessas prescrições relaciona a dimensão máxima do agregado grosso do betão com a dosagem de cimento a ser adotada. A dimensão máxima padrão do agregado grosso, considerada para estabelecer as prescrições da norma, é de maior ou igual a 20 mm. Se o betão apresentar um valor da dimensão máxima do agregado mais grosso inferior a 20 mm, a dosagem de ligante deve ser alterada da seguinte forma:

- dimensão máxima do agregado grosso inferior a 20 mm mas superior a 12,5 mm: aumentar a dosagem de ligante num fator de 1,10;
- dimensão máxima do agregado grosso inferior a 12,5 mm mas superior a 4 mm: aumentar a dosagem de ligante num fator de 1,23.

Assim, para estruturas cuja vida útil de projeto seja de 50 anos e os betões possuam a dimensão máxima do agregado grosso maior ou igual a 20 mm, aplicam-se as prescrições definidas no Quadro 4.2. Se a vida útil for de 100 anos ou a dimensão máxima do agregado mais grosso for inferior a 20 mm devem efetuar-se alterações a estas prescrições.

A agressividade química também é alvo de uma prescrição geral, quando provém da ação dos sulfatos presentes na água ou nos solos em contacto com o betão. Nestes casos, a composição do clínquer do ligante deve verificar os limites indicados no Quadro 4.3, salvo o caso de satisfazerem o estabelecido na Especificação LNEC E 462 [53] após realização do ensaio de resistência aos sulfatos nela previsto.

Quadro 4.3 – Composição do clínquer de cimentos resistentes aos sulfatos.

Tipo de cimento		CEM I(1)	CEM II(2)	CEM III,IV, V(3)
Teor de C_3A	XA2	≤ 5 %	≤ 8 %	≤ 10 %
	XA3	≤ 5 %	≤ 6 %	≤ 8 %
Teor de (C_3A + C_4AF)		≤ 20 %		≤ 25 %

Notas:

(1) Aplicável também aos cimentos CEM II/A-L, II/A-LL e II/A-M
(2) Só aplicável aos cimentos CEM II/S, II/D, II/P e II/V.
(3) Só exigível aos cimentos CEM III/A, IV/A e V/A.

Outra prescrição geral estabelecida na Especificação traduz a preocupação em alertar o especificador para o facto de a durabilidade depender não só das medidas adotadas em projeto mas também dos requisitos relativos à colocação em obra, proteção e cura do betão estabelecidos na NP ENV 13670-1 "Execução de Estruturas de Betão. Parte 1: Regras gerais" [7].

Com base nas prescrições apresentadas o projetista pode aplicar para os diferentes elementos estruturais de um obra, betões diferentes para atender às diferentes classes de exposição a que cada um daqueles elementos está exposto, ou um único betão correspondente à classe de exposição mais agressiva, isto é, que exige um betão com requisitos mais exigentes.

Disto pode concluir-se que a classificação ambiental é portanto um parâmetro fulcral no desenvolvimento da metodologia prescritiva mas também o são a vida útil da estrutura, o tipo de cimento a utilizar e a dimensão máxima do agregado grosso. Estas são as variáveis que combinadas permitem definir com rigor as prescrições a serem adotadas e como tal devem ser definidas na aplicação de cálculo.

A sistematização da metodologia prescritiva pode basear-se então numa base de dados com todas as medidas a serem adotadas, apresentando ao especificador, consoante a conjugação da vida útil, classe de exposição, tipo de cimento e dimensão máxima do agregado grosso definidas, as que se aplicam ao caso concreto. Ou seja, é possível automatizar para um processo computacional as medidas prescritivas da Especificação, utilizando como dados de entrada as condições da estrutura e disponibilizando como dados de saída os requisitos estabelecidos.

4.4. COMBINAÇÕES DE CLASSES DE EXPOSIÇÃO AMBIENTAL

A NP EN 206-1 define a necessidade das condições de exposição de um betão poderem, por vezes, ter de ser expressas como uma combinação de classes de exposição e acrescenta que num elemento de betão, as suas diferentes superfícies podem estar sujeitas a diferentes tipos de ações. Tendo isso em conta a Especificação LNEC E 464 define as combinações de classes de exposição mais frequentes em Portugal, conforme indica o Quadro 4.4.

Quadro 4.4 – Combinação de classes de exposição.

Classes de exposição possíveis de serem combinadas	
XC2 com	XD2
	XS2 + ataque da água do mar (XA1)
	XF1
	XA1, XA2 ou XA3
XC3 com	XF1
	XD1 + XF2
	XS1
	XD3
	XS3 + ataque da água do mar (XA1)
XC4 com	XA1, XA2 ou XA3
	XF1
	XD1 + XF2
	XS1
	XD3
	XS3 + ataque da água do mar (XA1)

Para a definição dessas combinações são estabelecidos alguns pressupostos:

- a classe de exposição X0 e, em geral, a classe XC1 aplicam-se isoladamente;
- todas as estruturas de betão sofrem o processo comum de carbonatação, mas a ação dos cloretos ou os ataques químicos e por ciclos de gelo/degelo são específicos de determinados ambientes;
- nas zonas marítimas (classe XS) onde se poderiam aplicar as classes XF, em Portugal o número de dias com temperaturas negativas é desprezável;
- no interior, nas zonas com um total de 30 ou mais dias com temperaturas negativas, podem ser combinadas as classes XF2 e XD, embora esta última seja pouco frequente em Portugal;
- o ataque químico ao betão de fundações, obras de suporte de terras ou pavimentos em contacto com solos dá-se em solos agressivos ou em águas agressivas com nível freático atingindo as fundações e ao betão de superestruturas de reservatórios ou condutas por ação de águas agressivas.

Estabelecidas estas combinações, a sua avaliação é realizada segundo o princípio presente na especificação: *"Em cada combinação de classes de exposição ambiental devem ser satisfeitos, para o cimento (ou para a correspondente mistura) a utilizar e como requisitos de combinação, os valores prescritivos mais exigentes da mínima dosagem de cimento, da máxima razão água/cimento (e do teor de ar se for o caso) e da classe de resistência entre os valores de cada uma das classes de exposição ambiental da combinação. No caso do cimento não ser comum às diferentes classes de exposição prevalece aquele que satisfizer a classe com os requisitos mais exigentes."* [12]. Quer isto dizer que tendo as prescrições individuais de cada classe envolvida na combinação, fazendo a análise das medidas prescritivas mais condicionantes é estabelecida a classe mais exigente, isto é, a que requer maiores cuidados, e são determinadas as prescrições a cumprir na combinação em estudo.

O mínimo recobrimento nominal não é estabelecido na especificação como fator diferenciador a ter em atenção nas combinações mas para uma análise geral da estrutura não deixa de ser importante. Um exemplo da verificação das prescrições a aplicar a uma combinação de classes de exposição é apresentado no Quadro 4.5, tendo em conta as prescrições definidas no Quadro 4.2.

Quadro 4.5 – Prescrições isoladas das classes numa combinação de classes de exposição (exemplo).

Classes de exposição	XC4	XD1	XF2	Condicionantes
Mínimo recobrimento nominal (mm)	40	45	–	45
Máxima razão água/cimento	0,60	0,45	0,55	0,45
Mínima dosagem de cimento (kg/m^3)	280	360	280	360
Mínima classe de resistência à compressão	C30/37 LC30/33	C40/50 LC40/44	C30/37 LC30/33	C40/50 LC40/44
Teor mínimo de ar (%)	–	–	4,0	4,0

No exemplo apresentado a classe mais severa que condiciona as prescrições a serem estabelecidas, para a estrutura ou elemento estrutural em causa, é a classe XD1, pois esta impõe medidas prescritivas mais graves. A forma de proceder perante uma combinação de classes de exposição é assim analisar cada classe individualmente e estabelecer as medidas mais condicionantes. Assim convém que logo de início seja definido para a estrutura ou elemento estrutural em análise, se a exposição ambiental presente é descrita numa classe isolada, ou se resulta de uma combinação de classes de exposição, pois as medidas prescritivas podem ser diferentes dependendo do caso.

Aproveitando a explicação apresentada até este ponto, pode ser feita uma sistematização da metodologia prescritiva da Especificação, conforme ilustra a Figura 4.1.

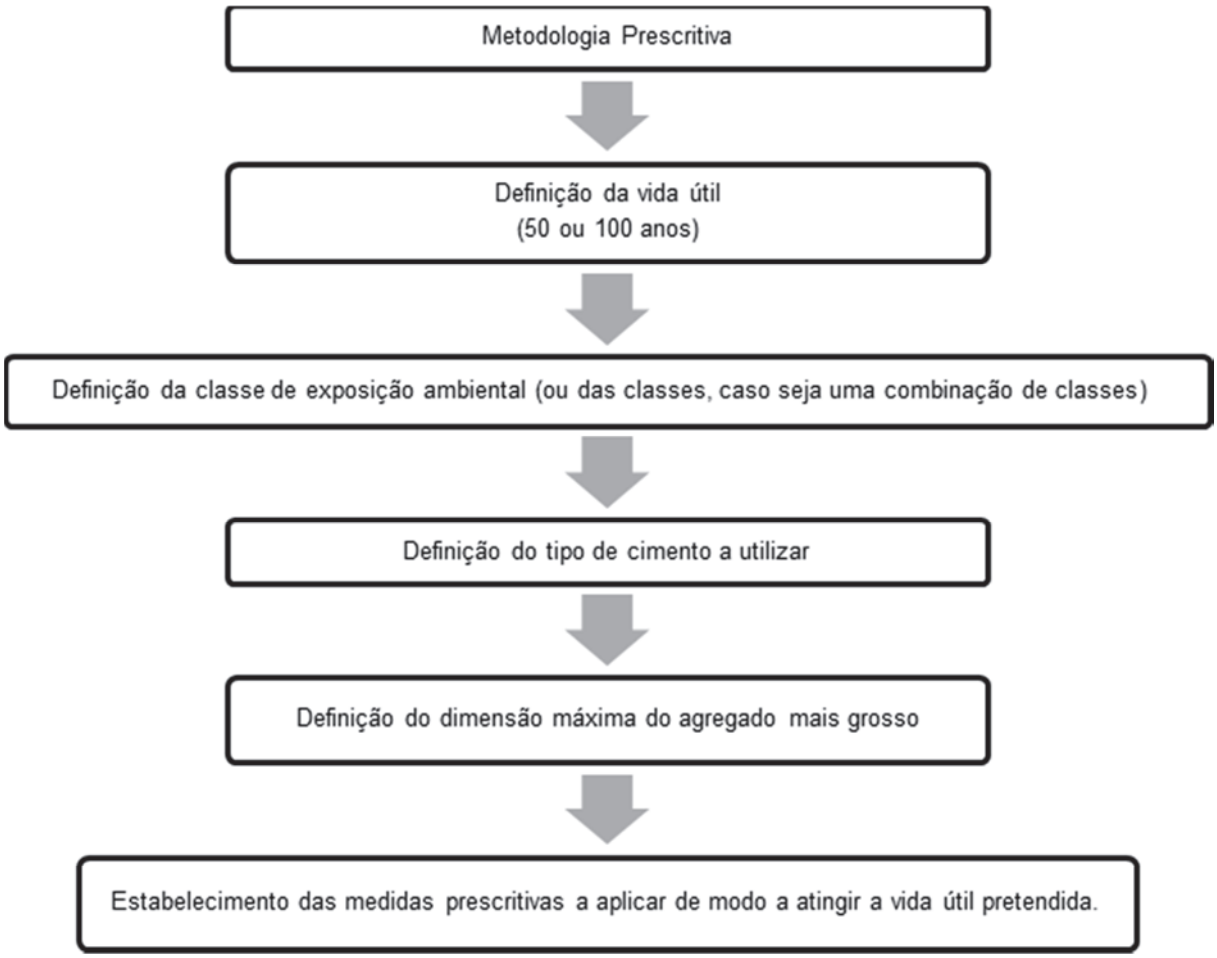


Figura 4.1 – Sistematização da metodologia prescritiva da Especificação LNEC E 464

Por conseguinte, com o encadeando dos procedimentos, é possível estabelecer um método linear de definição das prescrições para as estruturas, com base em parâmetros iniciais previamente definidos.

4.5. APTIDÃO DOS CIMENTOS, ADIÇÕES E MISTURAS COMO CONSTITUINTES DO BETÃO

São considerados ligantes hidráulicos os cimentos e as misturas, sendo estas últimas obtidas da junção na betoneira, de um cimento corrente conforme com a NP EN 197-1 e de adições conformes com os respetivos documentos normativos. A Especificação LNEC E 464:2007 estabelece a aptidão dessas misturas para serem constituintes do betão, isto é, para poderem ser consideradas na sua composição relativamente à dosagem de cimento e razão água/cimento. Uma chamada de atenção neste ponto para esclarecer que quando na composição do betão for utilizada uma mistura, os termos dosagem de cimento e razão água/cimento devem ser substituídos pelos termos dosagem de ligante e razão água/ligante.

É importante distinguir que estabelecer a aptidão geral de um material para ser constituinte do betão, não implica aptidão em todas as situações e em todas as composições, especialmente em situações relacionadas com a durabilidade. É esta a razão pela qual a Especificação exige requisitos diferentes para cimentos diferentes e restringe a utilização de certos tipos de cimentos em algumas classes de exposição.

A aptidão geral dos cimentos para serem constituintes do betão está estabelecida na NP EN 206-1 para os cimentos correntes que satisfaçam a NP EN 197-1. Apenas os tipos de cimentos que verifiquem esta aptidão são contemplados nesta especificação. No caso das misturas, a especificação indica que a aptidão destas para serem constituintes do betão fica estabelecida desde que sejam satisfeitas simultaneamente as seguintes condições:

- o cimento seja do tipo CEM I ou CEM II/A e da classe de resistência 42,5 ou superior;
- as adições sejam do tipo I de origem calcária e satisfazendo a Especificação LNEC E 466 ou do tipo II;
- a composição da mistura satisfaça os limites estabelecidos para a composição de um dos cimentos do Quadro 1 da NP EN 197-1, constantes do Quadro 4.2;
- a proporção de sílica de fumo em relação ao clínquer (se ele existir na composição da mistura) seja igual ou inferior a 11%.

Numa composição de betão, se uma dada mistura verifica estas condições, é comprovada a sua aptidão como constituinte, aplicando-se à mistura as medidas prescritivas do cimento correspondente.

Ao estabelecer que uma mistura pode ser considerada como apta para ser constituinte do betão, deve possuir uma composição que satisfaça os limites para a composição de um dos cimentos do Quadro 1 da NP EN 197-1, a Especificação apresenta procedimentos para o cálculo desta composição da mistura. Estes procedimentos dizem respeito a dois tipos de análise:

- Verificação de uma composição de misturas de cimentos e adições já definida;
- Formulação de uma nova composição de misturas de cimento e adições.

Ambos os procedimentos de análise da conformidade das misturas para serem consideradas como ligantes são apresentadas no Anexo A da Especificação LNEC E 464, sendo discutidos adiante neste trabalho.

4.5.1. VERIFICAÇÃO DA COMPOSIÇÃO DE MISTURAS DE CIMENTOS E ADIÇÕES

A primeira metodologia de análise das misturas aborda a verificação da composição de uma eventual mistura de cimento e adições existente, estabelecendo a dosagem que pode ser considerada como ligante no betão, isto é, a quantidade que pode ser considerada apta a ser um constituinte do betão.

Antes de mais, para uma melhor compreensão da metodologia, importa esclarecer a formulação utilizada na Especificação LNEC E 464 para a verificação da composição de misturas de um cimento corrente com adições do tipo I ou II. Esta baseia-se no seguinte conjunto de símbolos:

CM_{mist} – quantidade de componentes minoritários na mistura;

CS_i – quantidade do componente i da mistura;

CSi_{alt} – quantidade alterada do componente i da mistura;

D_0 – massa da mistura inicial a verificar;

DL- dosagem de ligante;

$DL_{,P}$ – dosagem preliminar de ligante;

D_{max_i} – quantidade de ligante máxima para o componente i considerando o lim_{inf_i};

D_{min_i} – quantidade de ligante mínima para o componente i considerando o lim_{sup_i};

lim_{inf_i} – limite inferior admissível para o componente i no cimento ou no ligante equivalente.

Esclarecida a simbologia adotada, procede-se com a apresentação da metodologia nos mesmos moldes em que é apresentada na especificação, ou seja, por secções ou etapas de cálculo que permitam ao especificador avançar gradualmente até alcançar o resultado final, sendo neste caso a composição e dosagem final da mistura que podem ser considerados constituintes do betão.

As etapas de cálculo são enumeradas como A.1 até A.6 conforme o avançar do processo. Apesar de não ser estabelecida na Especificação, no âmbito deste trabalho apresenta-se mais uma etapa, definida como etapa inicial do processo, chamada de etapa A.0.

O procedimento para verificação da composição de misturas consiste nas seguintes etapas:

- **A.0** - Definição dos constituintes e da massa da mistura;

Antes de dar início ao procedimento propriamente dito, é necessário que o especificador defina os componentes da mistura a verificar, isto é, definir qual o tipo de cimento e as adições presentes na mistura, assim como as respetivas dosagens. Com as dosagens do cimento e das adições combinadas obtém-se a massa da mistura inicial a verificar (D_0). Tendo definido os constituintes, a dosagem inicial da mistura e a dosagem individual de cada componente, o especificador encontra-se então na posse de todos os dados para dar início ao processo de verificação.

- **A.1** - Determinação dos componentes e teores da mistura;

Partindo dos constituintes e quantidades definidas na etapa A.0, determinam-se as dosagens, CS_i, e percentagens preliminares de cada um dos diferentes componentes no total da mistura de massa D_0. É importante nesta etapa conhecer a composição do tipo de cimento utilizado, isto é, os seus constituintes principais (clínquer, calcário, escória de alto forno, etc.) e respetivas percentagens em massa do cimento, em concordância com os limites do Quadro 1 da NP EN 197-1, de forma a poder considerar estes constituintes isoladamente e estabelecer os seus teores na mistura em estudo.

- **A.2** - Correspondência da mistura com os cimentos do Quadro 1 da NP EN 197-1;

Esta etapa define a primeira verificação a efetuar à mistura, através da análise da conformidade ou não da mistura em estudo com os limites dos cimentos do Quadro 1 da NP EN 197-1. Neste ponto o

especificador deve ter em mente qual o tipo de cimento a que pretende que a sua mistura seja equivalente. Pelos teores dos constituintes, definidos na etapa anterior, ele deve verificar se estes cumprem os limites definidos no quadro da NP EN 197-1 já referido. Em caso afirmativo da verificação, a composição inicial da mistura cumpre a Especificação e pode ser adotada como ligante, com a dosagem igual a D_0 e equivalente ao cimento selecionado. A verificação está assim concluída e a mistura é apta a ser constituinte do betão.

Caso a mistura inicial não verifique os limites da norma, o procedimento continua para a etapa seguinte recalculando a mistura de modo a torna-la equivalente ao cimento selecionado.

- **A.3** - Determinação da dosagem de ligante preliminar (DL_P);

Visto que a mistura não cumpre os requisitos para ser considerada como equivalente ao cimento escolhido, é necessário determinar como a ajustar de forma que tal seja possível.

A dosagem de ligante preliminar é o menor de todos os valores da quantidade de ligante máxima ($D_{máx_i}$) determinada para cada componente i da mistura que faça parte dos constituintes principais do cimento escolhido na etapa A.2. As dosagens de ligante máxima ($D_{máx_i}$) e mínima (D_{min_i}) são obtidas pelas equações 4.1 e 4.2 respetivamente.

$$D_{máx_i} = \frac{CS_i}{lim_{\inf_i}} \quad (4.1)$$

$$D_{min_i} = \frac{CS_i}{lim_{\sup_i}} \quad (4.2)$$

Onde lim_{sup_i} é o limite superior, e lim_{inf_i} o limite inferior admissível para o componente i no cimento ou no ligante equivalente. Para cada componente i da mistura, que faça parte dos constituintes principais do cimento, estabelece-se assim um intervalo de variação da dosagem [D_{min_i}; $D_{máx_i}$].

Consoante o valor da dosagem de ligante preliminar avança-se para a etapa A.4, caso $DL,_P \geq D_0$, ou para a etapa A.5, caso $DL,_P < D_0$.

- **A.4** - Determinação de novas dosagens dos componentes alterados;

As alterações a efetuar à mistura não serão feitas de forma uniforme em todos os constituintes da mistura. Quer isto dizer que, o facto de a mistura não verificar a composição do tipo de cimento pretendido não quer dizer que todos os constituintes e teores devam ser alterados para obter-se a concordância com os limites desejados. Alguns constituintes são mantidos com as suas dosagens e teores inalterados desde a dosagem inicial, alterando-se apenas aqueles que não se ajustem à composição.

Na etapa A.4 é definido que os constituintes que terão a sua dosagem alterada, para um valor menor (CSi_{alt}), serão os constituintes cujo D_{min_i} seja superior a D_0. As alterações a serem efetuadas na mistura devem ser de tal forma que, para estes componentes i, se verifique, simultaneamente, as condições expostas nas equações abaixo:

$$CSi_{alt} = lim_{\sup_i} \times [(\sum_i^{n-1} restantesCS_i) + CS_i + CM_{mist}] \quad (4.3)$$

$$CM_{mist} \leq \frac{(\sum_i^{n-1} restantesCS_i)+CSi_{alt}}{0,95} \times 0.05 \quad (4.4)$$

$$CM_{mist} \leq D_0 - [(\sum_i^{n-1} restantesCS_i) + CSi_{alt}] \quad (4.5)$$

A quantidade alterada do componente i da mistura será assim o menor dos valores:

$$CSi_{alt} = \frac{lim_{\sup_i} \times (\sum_i^{n-1} restantesCS_i)}{0,95 - lim_{\sup_i}} \quad (4.6)$$

$$CSi_{alt} = lim_{\sup_i} \times D_0 \quad (4.7)$$

Caso seja necessário alterar a dosagem de mais do que um constituinte da mistura obtém-se um intervalo de valores, para cada um desses constituintes, que verifica o exposto na equação (4.3).

Concluídos os cálculos para esta etapa avança-se para a etapa A.6.

- **A.5** - Determinação de nova dosagem dos componentes alterados;

Nesta etapa, diferente da etapa A.4, é definido que os constituintes que terão a sua dosagem alterada, para um valor menor na mesma (CSi_{alt}), serão os constituintes cujo D_{min_i} seja superior a DL_P.

A nova dosagem deve ser determinada de tal modo que:

$$CSi_{alt} = lim_{\sup_i} \times DL_P \quad (4.8)$$

No caso de se verificar que:

$$(\sum_i^{n-1} restantes\ CS_i) + CSi_{alt} \geq DL_P \quad (4.9)$$

então, não há lugar na mistura para a consideração de constituintes adicionais minoritários, a dosagem de ligante será igual à dosagem de ligante preliminar ($DL = DL_{,P}$) obtendo-se:

$$CSi_{alt} = DL_P - (\sum_i^{n-1} restantesCS_i) \quad (4.10)$$

Se pelo contrário se verificar que:

$$(\sum_i^{n-1} restantesCS_i) + CSi_{alt} < DL_P \quad (4.11)$$

Existe margem na composição da mistura para a consideração de constituintes adicionais minoritários, de tal forma que:

$$CM_{mist} \leq \frac{(\sum_i^{n-1} restantesCS_i)+CSi_{alt}}{0,95} \times 0.05 \quad (4.12)$$

e

$$(\sum_i^{n-1} restantesCS_i) + CSi_{alt} + CM_{mist} = DL_P \quad (4.13)$$

O procedimento de alteração dos constituintes fica assim completo, podendo avançar-se para a etapa seguinte.

- **A.6** - Determinação de dosagem final de ligante e dos respetivos componentes

Percorrido todo o processo de verificação até esta última etapa, consegue-se estabelecer que a dosagem de ligante, a considerar equivalente ao cimento, será o somatório de todos os componentes (principais e minoritários), selecionados em A.2, cujas quantidades foram determinadas nas etapas A.1 e A.4 ou A.5. A equação (4.14) define analiticamente a forma de obtenção da dosagem de ligante a considerar.

$$DL = (\sum_i^{n-1} restantesCS_i) + CSi_{alt} + CM_{mist} \quad (4.14)$$

Fica concluído assim o processo de verificação, podendo o utilizador agora utilizar a mistura como ligante num betão.

A Figura 4.2 ilustra uma sistematização do procedimento de verificação da composição de misturas de cimento e adições presente na Especificação LNEC E 464. Para melhor compreensão do procedimento a Especificação apresenta dois exemplos de aplicação que ilustram todas as etapas, sendo um caso referente à etapa A.4 e outra à etapa A.5.

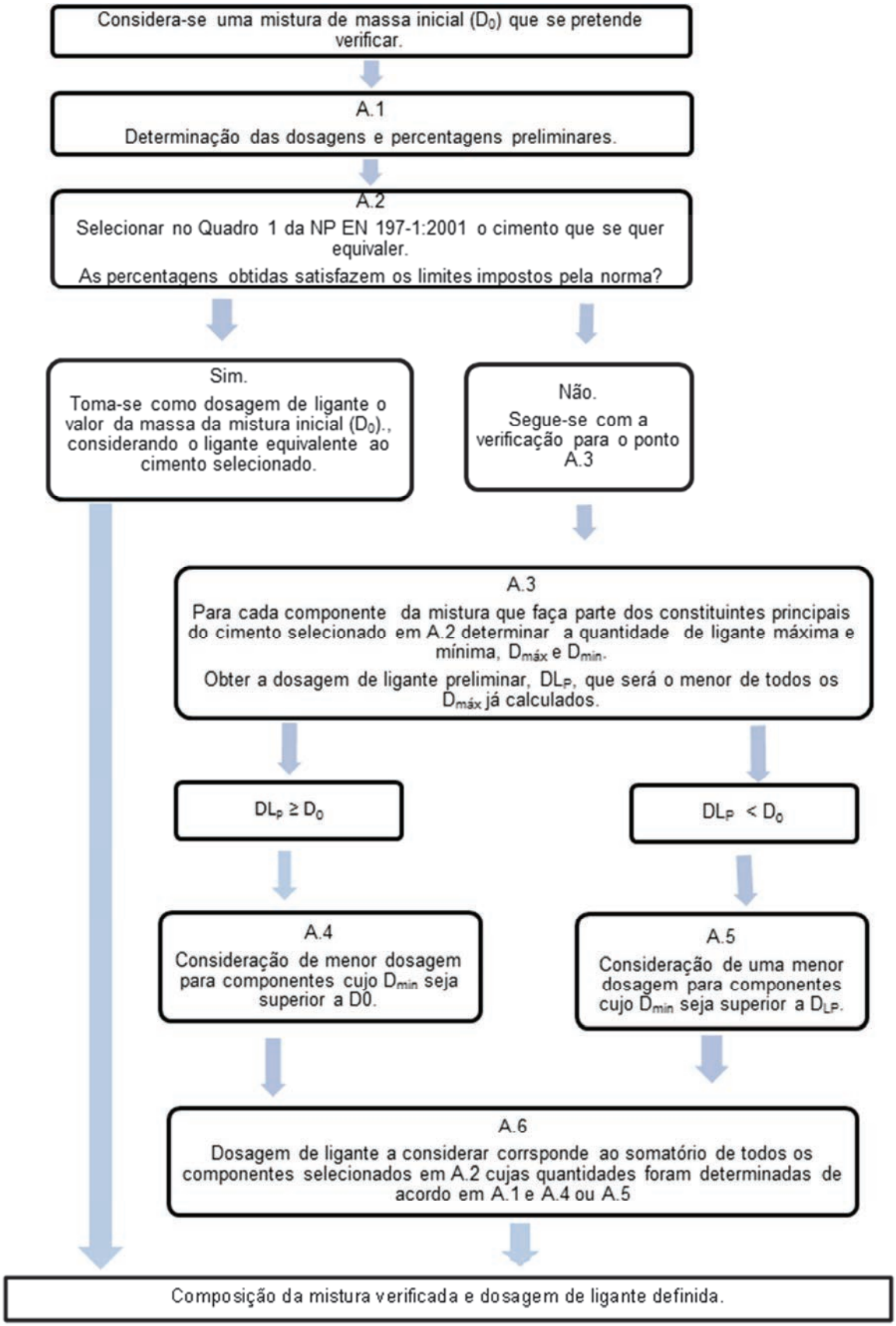


Figura 4.2 – Sistematização da verificação da composição de misturas conforme a Especificação LNEC E 464.

4.5.2. FORMULAÇÃO DE MISTURAS DE CIMENTOS E ADIÇÕES

A verificação de misturas é um processo a ser executado na eventualidade da mistura já estar formulada e se querer apenas verificar a sua aptidão como ligante. Para os casos em que o especificador sabe qual o tipo de cimento equivalente e a dosagem de ligante a utilizar, mas não tem a formulação da mistura de cimentos e adições feita, a especificação estabelece um procedimento que permite realizar esta formulação, verificando automaticamente a sua aptidão como ligante.

É conveniente apresentar, antes do procedimento em si, a simbologia utilizada na Especificação LNEC E 464 para a formulação de misturas de um cimento corrente com adições tipo I ou II. O conjunto de símbolos utilizados é o seguinte:

D_0 – massa da mistura a formular;

D_a – dosagem total das adições a utilizar;

D_c – dosagem de cimento a utilizar;

D_{cc} – dosagem total de constituintes no cimento a utilizar, para além de clínquer;

D_k – dosagem de clínquer no cimento ou na mistura;

p_k – percentagem de clínquer existente no cimento a utilizar;

p_{km} – percentagem de clínquer que se pretende na mistura.

O procedimento para formulação de misturas adotado tem por base a limitação *a priori* da quantidade de clínquer na mistura.

À semelhança do processo de verificação da composição de misturas, o procedimento para formulação de misturas é dividido em etapas de cálculo. São apresentadas abaixo estas etapas, com o acréscimo da etapa A.0.

- **A.0** - Definição dos constituintes de que se dispõe para formulação da mistura;

Inicialmente o especificador deve avaliar quais os materiais de que dispõe para formular a mistura, tendo desde logo em vista o tipo de cimento a que pretende equivaler. A par desta avaliação, deve ser determinada a dosagem de ligante pretendida para o betão, sendo que um bom indicador dessa quantidade pode ser a medida prescritiva, relacionada com a classe de exposição, quanto à dosagem de ligante mínima.

Determinada a dosagem de ligante esta passa a ser a massa da mistura a formular (D_0).

- **A.1** - Seleção do cimento que se pretende equivaler;

Com base nos materiais disponíveis seleciona-se o cimento do Quadro 1 da NP EN 197-1 que se pretende equivaler com a mistura.

- **A.2** - Seleção da percentagem de clínquer que se pretende na mistura;

Tendo em conta o tipo de cimento e os limites impostos na NP EN 197-1 ou na própria especificação (Quadro 4.3), escolhe-se a percentagem de clínquer pretendida para a mistura (p_{km}).

- **A.3** - Cálculo da dosagem de clínquer;

O cálculo da dosagem de clínquer a empregar na mistura é feito através da equação (4.15) com base no teor de clínquer definido na etapa A.2.

$$D_k = \frac{p_{km}}{100} \times D_0 \qquad (4.15)$$

- **A.4** - Determinação da quantidade de cimento a utilizar;

Antes da determinação da quantidade de cimento a utilizar, será necessário determinar a dosagem global dos restantes constituintes, incluindo os minoritários, do cimento a utilizar (D_{cc}). Para esta determinação utiliza-se a equação (4.16)

$$D_{cc} = \frac{100 - p_{km}}{p_{km}} \times D_k \quad (4.16)$$

Tendo a quantidade de clínquer e a quantidade dos restantes constituintes, somando as duas determina-se a dosagem de cimento a utilizar, D_c, conforme a equação 4.17 demonstra.

$$D_c = D_{cc} + D_k \qquad (4.17)$$

Estabelecida a dosagem de cimento a empregar na mistura, avança-se para a determinação das dosagens dos restantes constituintes da mistura.

- **A.5** - Determinação da dosagem total de adições a utilizar;

Estando definida à partida a dosagem de ligante pretendida, com a dosagem de cimento a utilizar calculada na etapa A.4, obtém-se a dosagem de adições a empregar na mistura por diferença entre estes dois valores.

$$D_a = D_0 - D_c \qquad (4.18)$$

Entretanto, se o cimento a equivaler não possuir na sua composição um ou mais constituintes da mistura a utilizar, deverá ser subtraída à quantidade de cimento a utilizar (Dc) a quantidade correspondente a estes constituintes, ou então considera-los como constituintes adicionais minoritários, estando estes últimos limitados a um máximo de 5%. No caso de se dispor de mais do que uma adição a incorporar na mistura, estas serão consideradas em teores que respeitem os limites impostos na NP EN 197-1 para o cimento a equivaler. Concluído o procedimento, o especificador obtém a mistura equivalente ao cimento pretendido.

À semelhança da metodologia apresentada para a verificação de misturas, também para formulações de novas misturas a Especificação apresenta um exemplo de aplicação informativo. Na Figura 4.3 é apresentada o encadeamento das etapas de cálculo da formulação de misturas de cimento e adições.

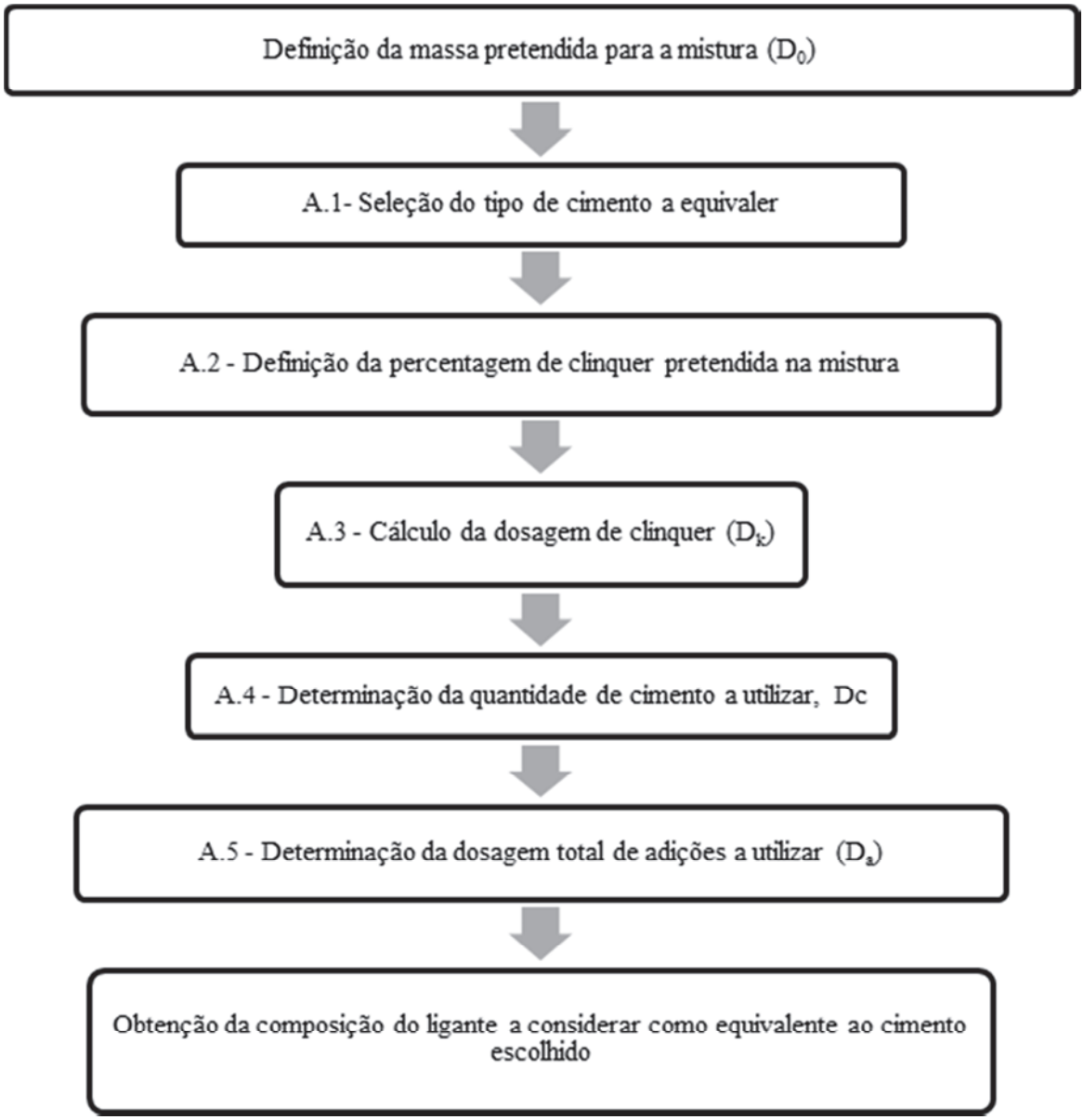


Figura 4.3 – Sistematização da formulação de misturas de acordo com a Especificação LNEC E 464.

Da apresentação efetuada da Especificação LNEC E 464, e com base nas sistematizações de cálculo ilustradas nas Figuras 4.1 a 4.3, é possível verificar que a metodologia prescritiva pode ser alvo de uma automatização de cálculo, com base em determinados dados iniciais. No Capítulo 7 deste trabalho é discutida a aplicação desta metodologia a um caso prático, com recurso a uma aplicação de cálculo automático, desenvolvida para servir de auxílio ao procedimento.

4.6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A aplicação da metodologia prescritiva apresenta algumas consequências, nomeadamente:

- para as estruturas com vidas úteis inferiores a 50 anos ou entre 50 e 100 anos são aplicadas as disposições prescritivas correspondentes a 50 e a 100 anos, respetivamente;
- não permite ter em conta a influência de recobrimentos diferentes dos estabelecidos e de outras composições de betão;
- na classe XS1, não considera a influência da diminuição da ação agressiva com a distância à linha de costa e, na classe XS2, do aumento da ação agressiva com a profundidade.

De forma a minimizar algumas destas consequências, a Especificação permite recorrer ao conceito de desempenho equivalente do betão e à Especificação LNEC E 465. O conceito de desempenho equivalente do betão em relação à exposição ambiental em causa (classe XC e XS) ou à que for mais desfavorável no caso de haver combinação é apresentado na secção 8 da especificação. Pode ser utilizado nos casos de estruturas de 50 ou de 100 anos de vida útil, respeitando os mínimos recobrimentos nominais estabelecidos no Quadro 4.2, em que se pretende aplicar uma composição que não respeite os limites do Quadro 4.2 mas utilizando um cimento (ou mistura) indicado no quadro, ou se pretender aplicar outros cimentos (ou outras misturas) que não são indicados no mesmo quadro. Este conceito, apresentado de início na NP EN 206-1 tem o princípio de que quando aplicado deve ser demonstrado que, especialmente no que respeita à sua reação às ações ambientais e à sua durabilidade, o betão em estudo tem um desempenho equivalente ao de um betão de referência que satisfaça os requisitos para a classe de exposição relevante. Este método de análise não é desenvolvido no âmbito deste trabalho, indicando-se apenas no Quadro 4.6 as propriedades e métodos de ensaios que devem ser verificadas para as classes de exposição estabelecidas.

Quadro 4.6 – Propriedades, métodos e provetes de ensaio para o conceito de desempenho equivalente de um betão.

Classe de exposição	Propriedade a determinar	Métodos de ensaio	Número e tipo de provetes (mm)
XC1 XC2 XC3 XC4	Carbonatação acelerada	LNEC E 391	1 Provete 150 x 150 x 600
	Permeabilidade ao oxigénio	LNEC E 392	3 Provetes φ 150; h = 150
	Resistência à compressão	NP EN 12390-3	3 Provetes 150 x 150 x 150
XS1/XD1 XS2/XD2 XS3/XD3	Coeficiente de difusão dos cloretos	LNEC E 463	2 Provetes φ 100; h = 50
	Absorção capilar	LNEC E 393	3 Provetes φ 150; h = 50
	Resistência à compressão	NP EN 12390-3	3 Provetes 150 x 150 x 150

Quando para uma estrutura de 50 ou de 100 anos os recobrimentos nominais forem menores que os previstos nesta especificação para ambos os casos, ou maiores que os previstos para a vida útil de 50 anos e se pretender aplicar uma composição que não respeite os limites prescritos, deve recorrer-se aos

métodos de especificação do betão baseados no desempenho relacionado com a durabilidade que forem aplicáveis à exposição ambiental em causa (XC ou XS) ou a que for mais desfavorável no caso de combinação, seguindo, nomeadamente, a metodologia estabelecida na Especificação LNEC E 465. Pode recorrer-se ainda a esta metodologia baseada no desempenho caso a vida útil pretendida para a estrutura seja diferente de 50 ou 100 anos. No capítulo seguinte é abordada esta metodologia baseada no desempenho estabelecida na Especificação LNEC E 465.

5
METODOLOGIA BASEADA NO DESEMPENHO SEGUNDO A ESPECIFICAÇÃO LNEC E 465

5.1. INTRODUÇÃO

A metodologia prescritiva descrita é uma opção frequentemente seguida no projeto de estruturas, até porque algumas das ações agressivas, como as reações álcalis-agregado, ataque dos sulfatos e abrasão são apenas tratadas dessa forma [19]. Contudo existem casos onde é possível trabalhar a durabilidade das estruturas aplicando metodologias baseadas no desempenho.

Nas metodologias baseadas nas propriedades do desempenho as composições são definidas de acordo com testes e modelos matemáticos específicos, que permitem a determinação do tempo de vida útil em concordância com a antecipada exposição ambiental. A base conceptual de uma tal abordagem é a de assegurar que o desempenho necessário é mantido durante toda a vida útil prevista da estrutura, juntamente com a otimização dos custos associados [20].

A Especificação LNEC E 465 "Metodologia para estimar as propriedades de desempenho do betão que permitem satisfazer a vida útil de projeto de estruturas de betão armado ou pré-esforçado sob as exposições ambientais XC e XS" [13] propõe, fundamentalmente, a caracterização do betão através de propriedades de desempenho, nomeadamente, a resistência à carbonatação e a permeabilidade ao ar, para as classes de exposição sujeitas à ação do dióxido de carbono (classe XC), e o coeficiente de difusão dos cloretos como propriedade de desempenho para as classes sujeitas à ação dos cloretos (essencialmente a classe XS, embora também admita que as classes XD quando ocorrem devem ser assimiladas às classes XS). Segundo esta especificação, a determinação da composição de betões pode ser efetuada através destes indicadores de desempenho, em alternativa à definição de limites para as quantidades dos seus constituintes.

Visto que cada composição do betão tem de ser ensaiada e testada, com os resultados bem analisados, sendo alguns posteriormente incluídos em modelos matemáticos para a estimativa do tempo de vida útil, não se impõem limites para os tipos de constituintes e as quantidades a empregar na composição.

A especificação dedica toda uma primeira parte a definir as bases, isto é, o enquadramento necessário para o entendimento da metodologia, tanto a nível normativo, de definições e considerações teóricas, avançando depois para a apresentação dos procedimentos de análise.

Ao longo deste capítulo apresenta-se a metodologia descrita na especificação, acompanhada do necessário enquadramento teórico.

5.2. METODOLOGIA GERAL DO PROJETO DE DURABILIDADE

Assim como para a Especificação LNEC E 464, para a implementação da metodologia baseada no desempenho da Especificação LNEC E 465, o projetista deve especificar previamente a vida útil pretendida para a estrutura e a classe de exposição ambiental à qual esta estará sujeita. Para a definição da vida útil, conforme anteriormente visto, é recomendado, como regra de aplicação serem adotados os valores expostos no Quadro 3.11 para a categoria da estrutura, sendo que para a exposição ambiental são aplicadas as classes de exposição estabelecidas na Especificação LNEC E 464 e aqui apresentadas no Quadro 4.1.

A par destes parâmetros, a Especificação impõe também a obrigatoriedade da definição da classe de fiabilidade associada à estrutura. No âmbito desta Especificação define-se:

- *fiabilidad*e – como a aptidão de uma estrutura ou elemento estrutural para preencher os requisitos especificados, incluindo a vida útil, para as quais foi projetada. A fiabilidade é em geral expressa em termos probabilísticos e envolve segurança, utilização e durabilidade [13].

A garantia de graus de fiabilidade apropriados está presente nos princípios básicos da NP EN 1990 [5]. Esta Norma estabelece os requisitos para que a fiabilidade exigida seja alcançada recomendando regras de aplicação a adotar. Ainda nesta Norma, o seu Anexo B expõe a gestão da fiabilidade das construções apresentando as classes de consequências associadas às estruturas, CC, considerando as consequências do colapso ou do mau funcionamento destas, conforme uma das três classes seguintes:

- CC3 – elevadas consequências económicas, sociais e ambientais ou para a vida humana, aplicável, v.g., a edifícios altos, pontes principais, hospitais, teatros;
- CC2 – médias consequências, aplicável, v.g. a edifícios de habitação, industriais e de escritórios;
- CC1 – pequenas consequências, aplicável, v.g., a armazéns ou construções pouco frequentadas.

A estas classes de consequências estão associadas classes de fiabilidade, RC1, RC2 e RC3, e correspondentes valores mínimos do índice de fiabilidade, β. A estes índices de fiabilidade correspondem ainda níveis de supervisão do projeto e classes de inspeção previstas na NP ENV 13670-1 [7]. Contudo, os índices de fiabilidade apresentados na EN 1990 para as classes de fiabilidade dizem respeito apenas ao estado limite último, excetuando-se a classe RC2 onde é apresentado para todos os estados limites. Ora a Especificação LNEC E 465, na análise da durabilidade de estruturas, apenas considera "*o estado limite de utilização, definido como o início da fendilhação do betão de recobrimento por corrosão das armaduras, não se comprometendo a secção da armadura considerada nos cálculos estruturais*." Acrescentando "*Consequentemente, não se consideram estados limites últimos, até por o processo de corrosão não ser súbito e permitir em geral tomar oportunamente medidas corretivas*" [13].

Assim, a Especificação apresenta os mínimos índices de fiabilidade e as correspondentes probabilidades do estado limite de utilização não ser excedido, consideradas na metodologia exposta. Estes valores dos mínimos índices de fiabilidade e as correspondentes probabilidades do estado limite de utilização não ser excedido, são ilustrados no Quadro 5.1.

Quadro 5.1 – Mínimos índices de fiabilidade β

Classes de fiabilidade	RC3	RC2	RC1
β	2.0	1.5	1.2
Probabilidade do estado limite de utilização não ser excedido	$2.3*10^{-2}$	$6.7*10^{-2}$	$12*10^{-2}$
Nota: o valor sublinhado é o da EN 1990.			

À semelhança do cálculo estrutural onde se utilizam fatores parciais de segurança que afetam materiais e ações, a metodologia da Especificação LNEC E 465 baseia-se em fatores de segurança, nomeadamente, no fator de segurança da vida útil, γ, para estimar as propriedades de desempenho do betão, procurando garantir que, para o estado limite em causa e para a vida útil pretendida, t_g, que a vida útil estimada, t_L, avaliada segundo a abordagem do desempenho, seja superior à vida útil pretendida, t_g, conforme indica a equação (5.1).

$$t_L - t_g > 0 \quad (5.1)$$

Adotando a abordagem probabilística, exposta no seu Anexo B, a Especificação satisfaz a condição da equação (5.1), calculando de forma determinística as propriedades de desempenho para o valor da "vida útil de cálculo", t_d, através do fator de segurança adotado.

$$t_d = \gamma \times t_g \quad (5.2)$$

Assim, associados aos valores de β, definidos no Quadro 5.1, são definidos no Quadro 5.2 os valores do fator de segurança da vida útil a considerar.

Quadro 5.2 – Fatores de segurança da vida útil.

Classes de fiabilidade	Fator γ para o Estado Limite de Utilização
RC3	2.8
RC2	2.3
RC1	2

5.3. MODELAÇÃO DA DETERIORAÇÃO DO BETÃO ARMADO POR CORROSÃO DO AÇO

Esta especificação considera, para a evolução no tempo da deterioração do betão armado ou pré-esforçado por corrosão do aço, o modelo de Tutti. Este modelo, como já enunciado anteriormente, considera o tempo de vida útil dividido em dois períodos: período de iniciação e período de propagação da corrosão, admitindo que é só durante este último período que a corrosão do aço e a degradação do betão armado se processam.

A natureza físico-química dos mecanismos envolvidos em cada um dos períodos é diferente. Então é compreensível que a pormenorização dos modelos para previsão do período de iniciação e para previsão do período de propagação, com propriedades de desempenho que consideram aqueles mecanismos sejam também diferentes.

Para o estado limite de utilização adotado na Especificação, a máxima degradação admissível por corrosão das armaduras é muito limitada. Assim o critério de cálculo selecionado foi o de estimar valores mínimos para o período de propagação e caracterizar o betão através das propriedades ligadas ao período de iniciação.

Sendo o betão diretamente envolvido na resistência à penetração dos agentes agressivos, em particular, o betão de recobrimento das armaduras; para explicação da metodologia a aplicar, a especificação, faz uso dos recobrimentos mínimos determinados segundo as regras presentes na NP EN 1992-1-1 [6].

5.3.1. MODELAÇÃO DA HUMIDADE DO BETÃO NAS CLASSES DE EXPOSIÇÃO XC E XS

A simplificação presente nas descrições dos ambientes das classes de exposição definidas na NP EN 206-1 é deficitária uma vez que aborda maioritariamente apenas as condições de humidade do betão, não traduzindo de forma completa a influência do ambiente na resistência do betão armado à corrosão das armaduras. Além da humidade existem outros parâmetros intervenientes e condicionantes desta resistência, como a temperatura, a radiação solar, a chuva e o vento. Já foi visto que a porosidade do betão é a característica fundamental na resistência do betão à corrosão. Tendo isto em conta e com base em estudos teóricos e experimentais a Especificação estabelece que o grau de saturação dos poros do betão depende essencialmente dos períodos de chuva, aumentando com a sua frequência e duração e quando as temperaturas estão mais baixas. Entretanto, apesar da existência de mais água, nestes períodos de temperatura mais baixa, a corrosão processa-se de forma mais lenta.

Ainda em relação à humidade, em Portugal, na classe XC4 considera-se a existência de duas regiões climáticas: uma região seca e outra região húmida. Esta divisão surge como resultado da análise da informação relativa aos seguintes aspetos:

1. Número médio anual de dias N com precipitação igual ou superior a 1 mm;
2. Severidade da exposição à chuva e ao vento;
3. Relação entre a precipitação (P) e a evapotranspiração potencial (ETP) diárias médias, definindo estações secas (em que ETP > P) e estações húmidas (em que ETP < P).

Na classe XC4, o ambiente de molhagem/secagem pode caracterizar-se pelo tempo de molhagem, TdM, dado por TdM = N/365. Este parâmetro TdM, nas regiões secas onde N < 75, varia entre 0,14 e 0,2, e nas regiões húmidas, onde N ≥ 75, situa-se entre 0,2 e 0,27. Associando a variação de TdM ao facto de a humidade permanecer por um período relativamente mais longo no betão na região húmida do que na região seca, e que a ação do vento não altera basicamente a distribuição das regiões seca e húmida, a especificação considera então que em Portugal a classe de exposição XC4 comporta:

- uma região seca, com TdM = 0,18, a sul do rio Tejo, na Terra Quente do Douro, na zona centro/sul do distrito de Castelo Branco e na costa sul da Madeira;
- uma região húmida, com TdM = 0,24, acima do rio Tejo com exceção das zonas acima referidas, no centro/norte da Madeira e nos Açores.

O Anexo C da Especificação apresenta todas a considerações efetuadas na determinação das duas regiões para a classe XC4 em Portugal.

De notar que em Portugal, conforme já referido, a ocorrência das classes XD é pouco frequente. Esporadicamente pode ocorrer em pontes, no Norte, devendo então ser assimilada às classes XS.

Tendo em conta estes aspetos, o Quadro 5.3 apresenta a humidade do betão em cada classe de exposição através da humidade relativa do betão de recobrimento, $HR_{betão}$, e o tempo de molhagem, TdM.

Quadro 5.3 – Modelação da humidade relativa e tempo de molhagem do betão nas classes de exposição

Classe estrutural	Humidade relativa	TdM
XC1 (seco/sempre húmido)	Ambiente seco: 60% Ambiente húmido: 100%	0.05 1*
XC2 (húmido/raramente seco)	90%	0.8
XC3 (moderadamente húmido)	70%	0.1
XC4 (ciclicamente húmido e seco)	Região seca: 80% Região húmida: 80%	0.18 0.24
XS1 (ar com sais do mar)	80%	0.6
XS2 (submersão permanente)	100%	1*
XS3 (zona de marés e de rebentação)	100%	1

Nota:
*Ausência de oxigénio para o processo de corrosão

5.3.2. MODELOS PARA CÁLCULO DO PERÍODO DE INICIAÇÃO DA CORROSÃO

As propriedades do desempenho ligadas ao movimento do dióxido de carbono e dos cloretos nos poros do betão de recobrimento, permitem relacionar a profundidade de penetração destes agentes agressivos com o período de iniciação. Assim os modelos de cálculo apresentados na especificação utilizam esta relação para estimar as propriedades de desempenho a controlar na estrutura.

5.3.2.1. Modelos para cálculo do período de iniciação devido à carbonatação

A força motriz considerada relevante para o transporte do dióxido de carbono do ar para junto das armaduras, através da rede porosa do betão, é o gradiente de concentração deste constituinte do ar atmosférico. Para o desenvolvimento da metodologia, admite-se que a concentração do dióxido de

carbono na atmosfera é de $0{,}7*10^{-3}$ kg/m^3, existindo a possibilidade deste ser maior em ambientes poluídos.

A especificação define duas metodologias para estimar o período de iniciação devido à carbonatação, estabelecendo duas propriedades do desempenho a verificar, nomeadamente a resistência à carbonatação do betão, R_{C65}, e o coeficiente de permeabilidade ao ar, K_{60}.

Os dois modelos são de seguida apresentados.

1º Modelo de cálculo do período de iniciação devido à carbonatação.

O primeiro modelo é traduzido pela equação (5.3)

$$X = \sqrt{\frac{2\times D\times \Delta c}{a}\times t\times K} = \sqrt{\frac{2\times D\times \Delta c}{a}\times t\times \left[\sqrt{k0\times k1\times k2}\left(\frac{t_0}{t}\right)^n\right]} \quad (5.3)$$

Onde:

D – é o coeficiente de difusão do dióxido de carbono através do betão carbonatado em equilíbrio com o ambiente de 65% de humidade relativa e 20ºC (m^2/ano);

Δc – é a diferença de concentração de dióxido de carbono no exterior, c, e na frente de carbonatação, c_1. Considerando o CO_2 totalmente consumido na frente de carbonatação, é $c_1 = 0$ e $\Delta c = 0{,}7\times10^{-3}$ kg/m^3;

a – é a quantidade de CO_2 que provoca a carbonatação dos componentes alcalinos do betão contidos numa unidade de volume do betão, dependendo portanto do tipo e dosagem do cimento utilizado (kg/m^3);

k0 – é um fator de valor 3 quando as condições de ensaio são as da Especificação LNEC E 391 [8];

k1 – é um fator que permite considerar a influência da humidade relativa, com os valores do Quadro 5.4;

k2 – é um fator que permite considerar a influência da cura, tendo o valor 1 na cura normalizada e 0,25 quando a cofragem é de permeabilidade controlada e a cura é de 3 dias;

t_0 – é o período de referência (= 1 ano);

n – é um fator que permite considerar a influência da molhagem/secagem ao longo do tempo, com os valores dados no Quadro 5.4.

Quadro 5.4 – Valores dos parâmetros k1 e n.

	XC1	XC2	XC3	XC4
k1	1.00	0.20	0.77	0.41
n	0.000	0.183	0.020	0.085

A primeira parcela da equação corresponde à lei de Fick, que rege da evolução da profundidade de carbonatação X (m) no tempo t (anos), considerando o fluxo de CO_2 estacionário. A segunda parcela, representada pelo termo K, permite ter em consideração a influência das condições de ensaio e de exposições ambientais diferentes de 65% HR e a cura do betão.

Admitindo que a resistência à carbonatação dum betão pode ser medida pela grandeza R_{C65}:

$$R_{C65} = \frac{a}{D}\left(kg \times \frac{ano}{m^6}\right) \quad (5.4)$$

Integrante não só da difusibilidade ao CO_2 do betão, como do tipo e dosagem do cimento, a primeira parcela da equação (5.3) é substituída pela equação (5.5).

$$X = \sqrt{\frac{2 \times c \times t}{R_{C65}}} \quad (5.5)$$

A determinação em laboratório da resistência à carbonatação de um betão, R_{C65}, é feita seguindo a Especificação LNEC E 391 [8], usando o tempo t_1 necessário para atingir no provete de ensaio um valor mensurável de X_1 ao utilizar uma concentração superior à do CO_2 no ar, v.g., $c_{ace}l = 90 \times 10^{-3}$ kg/m^3, para acelerar o processo de carbonatação. Assim da equação (5.5) vem

$$R_{C65} = \frac{2 \times c_{acel} \times t_1}{X_1^2} \quad (5.6)$$

Introduzindo a equação (5.4) na equação (5.3) e tendo em conta o valor de c, a expressão do modelo de previsão da profundidade de carbonatação X dada pela equação (5.3) passa finalmente a ser descrita da seguinte forma:

$$X = \sqrt{\frac{2 \times 0{,}0007 \times t}{R_{C65}} \times \sqrt{k0 \times k1 \times k2} \times \left(\frac{t_0}{t}\right)^n} \quad (5.7)$$

Assim, a equação que permite determinar o valor da resistência à carbonatação a exigir ao betão em cada classe de exposição ambiental e a especificar no projeto, de modo a que ao fim do período de iniciação t_I a profundidade de carbonatação seja no máximo igual ao recobrimento R (mm), será:

$$R_{C65} = \frac{1{,}4 \times 10^2 \times t_I}{R^2} \times k0 \times k1 \times k2 \times \left(\frac{t_0}{t_I}\right)^{2n} \quad (5.8)$$

2º Modelo de cálculo do período de iniciação devido à carbonatação.

O segundo modelo apresentado na Especificação do LNEC, resulta de se ter verificado experimentalmente existir uma boa correlação entre os valores do coeficiente de difusão do ar e o coeficiente de permeabilidade ao ar no betão. Com base nesta última propriedade, foi estabelecida a equação (5.9), para prever a profundidade de carbonatação X (mm) ao fim do tempo t (anos):

$$X = \frac{a \times k^{0,4} \times t^{P}}{c^{0,5}} \times k2 \qquad (5.9)$$

Onde

a – é um fator de cálculo de valor 150;

k – é o coeficiente de permeabilidade ao ar do betão de recobrimento (em 10^{-16} m^2) nas condições de humidade da exposição ambiental. Está relacionado com o valor medido pelo método CEMBUREAU descrito na Especificação LNEC E 392 [9] (mas utilizando o oxigénio como fluido) com o provete com 28 dias de idade e em equilíbrio com HR = 60%, k60, pela expressão $k = m*K_{60}$;

p – é um expoente que depende da humidade relativa do betão e portanto da classe de exposição;

c – é o teor de óxido de cálcio da matriz de cimento hidratado do betão (kg/m^3), dependente do tipo de cimento utilizado e da classe de exposição;

k2 – é o fator que permite considerar a influência da cura, tendo o valor 1 na cura normalizada e 0,5 quando a cofragem é de permeabilidade controlada e a cura é de 3 dias.

De forma a estabelecer o valor da propriedade de desempenho, k_{60}, que o betão deve exibir para que o recobrimento R (em mm) só seja atingido pela frente de carbonatação ao fim do período de iniciação t_I, a equação (5.9) foi reorganizada da seguinte forma:

$$K_{60} = \frac{R^{2,5} \times c^{1,25}}{(a \times k2)^{2,5} \times t_I^{2,5 \times P} \times m} \qquad (5.10)$$

O Quadro 5.5 apresenta os valores a considerar para os parâmetros c, m e p em função da humidade relativa do betão.

Quadro 5.5 – Valores dos parâmetros m, p e c para cálculo de k_{60}.

HR (%)	m	p	c (kg/m^3)		
			CEM I *	CEM II/III	CEM IV/V
60	1	0.51	460	350	230
65	0.737	0.5	460	350	230
70	0.534	0.48	460	350	230
75	0.382	0.45	470	358	235
80	0.256	0.42	485	365	240
85	0.184	0.37	510	388	253
90	0.117	0.32	535	410	265
95	0.057	0.25	570	430	285
100	0	0.19	615	470	310

5.3.2.2. Modelo para cálculo do período de iniciação devido aos cloretos

O estado limite de serviço definido é atingido quando uma certa quantidade de cloretos, vulgarmente referida como teor crítico de cloretos, penetra no betão de recobrimento até ao nível das armaduras. Associada a essa profundidade, existe uma alta probabilidade de despassivação. Embora a penetração de cloretos no betão possa ocorrer através de diferentes processos, como permeação, absorção e difusão, dependendo das condições de exposição, os modelos atualmente utilizados para a estimativa do período de iniciação sob ataque dos cloretos baseiam-se apenas na difusão [20].

Inicialmente, as equações da modelação de cálculo da profundidade de penetração dos cloretos através do betão de recobrimento, consideravam somente a segunda lei de Fick da difusão, cuja integração tem a seguinte expressão:

$$C(x,t) = C_S\left(1 - \frac{erfX}{2\sqrt{Dt}}\right) \qquad (5.11)$$

Reorganizando-a, resulta:

$$X = 2\xi\sqrt{D \times t} \qquad (5.12)$$

Ou

$$D = \frac{X^2}{4 \times t \times \xi^2} \qquad (5.13)$$

com

$$\xi = erf^{-1}\frac{C_S - C(x,t)}{C_S} \qquad (5.14)$$

Sendo:

D – o coeficiente de difusão dos cloretos do betão, em m^2/s;

C(x,t) – a concentração dos cloretos, em % da massa de ligante, à profundidade x (m) após decorrido o tempo t (em s) de exposição aos cloretos. No caso de x = recobrimento (R) e de haver iniciação da despassivação das armaduras e com um tempo de exposição igual ao período de iniciação (independentemente da classe de exposição), $t = t_I$, é $C(R,t_I) = C_R$;

C_S – é a concentração dos cloretos, em % da massa de ligante, na superfície do betão (X = 0), para t=0, suposta constante;

erf – é a função erro: erf(z) = w e erf^{-1} o seu inverso: $erf^{-1}(w) = z$. A Especificação apresenta no seu Anexo D a modelação desta função.

Para as expressões 5.11 a 5.14 a concentração inicial de cloretos no próprio betão admite-se não existente. Caso ocorra esta concentração inicial via constituintes do betão, esta deve ser subtraída às concentrações C_R e C_S. A concentração dos cloretos, C_R, tem os valores atribuídos pela Especificação, conforme a classe de exposição ambiental e a razão água/cimento. Estes valores são reproduzidos no Quadro 5.6.

Quadro 5.6 – Concentração dos cloretos, C_R (% em massa do cimento).

Água/cimento	XS1; XS2	XS3
a/c ≤ 0,30	0.6	0.5
0,30 < a/c ≤ 0,40	0.5	0.4
a/c > 0,40	0.4	0.3

Os parâmetros C_S e D não são tabelados, necessitando assim de ser determinados através das equações que a seguir se indicam:

a) Concentração de cloretos à superfície do betão, C_S (% em massa de cimento):

$$C_S = C_b \times k_{a/c} \times k_{vert} \times k_{hor} \times k_{temp} \qquad (5.15)$$

Sendo:

C_b = 3,0% nas classes XS2 e XS3 e C_b = 2,0% na XS1. Tem em conta o teor de cloretos da água do mar em Portugal (21g/l) e a temperatura da água do mar de (16 ± 2)ºC. Na foz dos rios a salinidade da água depende das marés e da distância que estas atingem;

$k_{a/c} = 2{,}5 \times (a/c)$ sendo a/c a razão água/ligante;

k_{temp} referente ao betão, tem os valores indicados no Quadro 5.7.

k_{vert} e k_{hor} têm os valores indicados no Quadro 5.8.

Quadro 5.7 – Valores do parâmetro k_{temp}.

Temperatura do betão	0^0C	10^0C	15^0C	20^0C	25^0C	30^0C	35^0C
$\mathbf{k_{temp}}$	2.2	1.5	1.2	1.0	0.8	0.7	0.6

Quadro 5.8 – Valores dos parâmetros k_{vert} e k_{hor} para cálculo de CS.

	Classes de exposição	k_{vert}
	XS1	0.7
XS2	**a 1 m de profundidade**	1.0
	a 24 m de profundidade	1.4
	XS3	1.0
	Distância à linha de costa*	$\mathbf{k_{hor}}$
	0	1.0
	1 km	0.6

Notas:
Admitem-se variações lineares entre os limites de distância à linha da costa, em zonas planas e relativamente baixas e nos vales dos rios. Nas ilhas da Madeira e dos Açores pode ser duplicada.

b) Coeficiente de difusão do betão, D (em m^2/s), considerando que este diminui com o tempo de exposição segundo a expressão:

$$D_a(t) = D_a(t_0) \times \left(\frac{t_0}{t}\right)^n = k_{D,c} \times k_{D,RH} \times k_{D,T} \times D_0 \times \left(\frac{t_0}{t}\right)^t = k \times \left(\frac{t_0}{t}\right)^n \times D_0 \quad (5.16)$$

Onde

$k_{D,c}$ – é um fator que tem em conta a influência das condições de cura;

$k_{D,RH}$ – é um fator que tem em conta a influência da humidade relativa do ambiente;

$k_{D,T}$ – é um fator que tem em conta a influência da temperatura;

D_0 – é o coeficiente de difusão potencial (m^2/s), determinado em laboratório de acordo com a Especificação LNEC E 463 [11], com o betão na idade de referência t_0 = 28 dias;

n – é um fator que tem em conta o decréscimo de D ao longo do tempo.

O Quadro 5.9 apresenta os valores destes parâmetros de cálculo definidos na Especificação.

Quadro 5.9 – Valores dos parâmetros $k_{D,C}$, $k_{D,RH}$, $k_{D,T}$ e n para cálculo de $D_a(t)$.

Número de dias de cura	$k_{D,c}$	
normalizada	2.40	
em contacto permanente com água	0.75	
cofragem de permeabilidade controlada e 3 dias de cura húmida	1.00	
Classes de exposição	**$k_{D,RH}$**	
XS1	0.4	
XS3	1.0	
XS2	1.0	
Temperatura do betão (^{0}C)	**$k_{D,T}$**	
30^{0}C	1.50	
25^{0}C	1.20	
20^{0}C	1.00	
15^{0}C	0.80	
10^{0}C	0.75	
0^{0}C	0.40	
Classes de exposição	**n**	
	CEM I/II*	CEM III/IV/V
XS1	0.55	0.65
XS2	0.45	0.55
XS3	0.55	0.65

5.3.3. MODELO PARA ESTIMAR O PERÍODO DE PROPAGAÇÃO

A metodologia para estimar o período de propagação da corrosão no betão recorre à intensidade da corrente eletroquímica. A hipótese de cálculo adotada permite suportar o estado limite de utilização definido, estimando períodos de propagação mínimos, maximizando o período de iniciação e estimando propriedades de desempenho do betão relacionadas com este período.

Para definição do modelo a Especificação recorre a três princípios de cálculo diferentes, nomeadamente:

a) à lei de Faraday

$$x = 0{,}0115 \times I_{corr} \times t_p \qquad (5.17)$$

que permite determinar a redução de raio x (mm) provocada pela intensidade da corrente de corrosão I_{corr} ($\mu A/cm^2$), frequentemente designada na literatura de taxa de corrosão, durante o tempo de propagação da corrosão t_P (anos).

b) à expressão experimental de estima da redução de raio, x, que provoca a iniciação da fissuração:

$$x = 10^{-3} \times \left(74{,}5 + \frac{7{,}3 \times R}{\emptyset_0} - 17{,}4 \times f_{cd}\right) \qquad (5.18)$$

Onde:

R – é o recobrimento (mm);

f_{cd} – é a resistência à compressão diametral do betão, com valor 2 e 2,5 MPa nos betões para a carbonatação e 3 e 4 MPa nos betões para os cloretos;

c) à consideração da diferente influência na corrosão da carbonatação e da ação dos cloretos. Sendo o diâmetro inicial ϕ_0 das armaduras passivas reduzido, devido à corrosão, de αx:

$$\emptyset_0 - \emptyset = \alpha x \qquad \text{ou} \qquad r_0 - r = \left(\frac{\alpha}{2}\right) x \qquad (5.19)$$

sendo α = 2 para a carbonatação (a corrosão é uniforme), e α = 10 para o ataque por cloretos (a corrosão é por picadas), a redução do raio x pode então escrever-se de acordo com a expressão (5.20)

$$x = r_0 - r = \frac{k - r_0}{100} \text{ (k em \%)} \qquad (5.20)$$

Isto permite rescrever a equação (5.17) sob a forma

$$\frac{k \times r_0}{100} = \left(\left(\frac{\alpha}{2}\right) \times (0{,}0115 \times I_{corr} \times t_P)\right) \qquad (5.21)$$

Ou

$$t_P = \frac{k \times \emptyset_0}{(1{,}15 \times \alpha \times I_{corr})} \qquad (5.22)$$

e a expressão (5.18) sob a forma

$$k = 0{,}1 \times \frac{\left(74{,}5 + \frac{7{,}3 \times R}{\emptyset_0} - 17{,}4 \times f_{cd}\right)}{\left(\frac{\emptyset_0}{2}\right)} \qquad (5.23)$$

Introduzindo o valor de k obtido pela equação (5.23) na equação (5.22) consegue-se estimar o período de propagação da corrosão. A intensidade da corrente de corrosão, necessária à determinação do período de propagação é relacionada com níveis de corrosão, conforme apresenta o Quadro 5.10.

Quadro 5.10 – Níveis de corrosão.

Intensidade da corrente de corrosão (μA/cm2)	Nível de corrosão
< 0.1	desprezável
0.1 - 0.5	baixo
0.5 - 1	moderado
> 1	elevado

Associando estes níveis de corrosão com a humidade relativa das classes de exposição apresentadas no Quadro 5.3, obtêm-se os níveis de corrosão verificados em cada classe. O Quadro 5.11 apresenta a associação das classes de exposição aos níveis de corrosão.

Quadro 5.11 – Classes de exposição e níveis de corrosão das armaduras.

XC1	XC2	XC3	XC4	XS1	XS2	XS3
Desprezável	Baixo	Desprezável	Baixo	Moderado	Desprezável	Elevado
Desprezável			Moderado			

5.4. CÁLCULO DAS PROPRIEDADES DE DESEMPENHO DO BETÃO RELACIONADAS COM A CORROSÃO DAS ARMADURAS

Conforme a metodologia apresentada, verifica-se que antes de determinar os valores das propriedades de desempenho do betão a especificar no projeto de uma estrutura de betão, será necessário estabelecer alguns parâmetros da estrutura, nomeadamente;

- o tempo de vida útil pretendido, t_g, da estrutura;
- a classe de fiabilidade da estrutura;
- a(s) classes(s) de exposição ambiental XC1 a XC4 ou XS1 a XS3 (ou v.g., a combinação XS1+XC4), a que o betão armado ou pré-esforçado de cada elemento estrutural fica submetido;
- os valores do recobrimento mínimo, R, em cada peça estrutural.

Tendo todos estes parâmetros bem definidos é possível estimar as propriedades de desempenho, através da atribuição de valores mínimos ao período de propagação, t_P, possibilitando uma maximização do período de iniciação ($t_I = t_g - t_P$), concentrando-se neste último a aleatoriedade da vida útil.

A abordagem através do fator de segurança da vida útil, γ, possibilita a determinação do valor das propriedades de desempenho relacionadas com a durabilidade do betão armado, obtidas pelo período de iniciação de cálculo, $t_{IC} = \gamma * t_I$, dado por:

$$t_{IC} = \gamma \times \left(t_g - t_P\right) \quad (5.24)$$

Sendo o tempo de vida útil de cálculo obtido pela equação (5.25)

$$t_d = \gamma \times t_g = \gamma \times (t_I + t_P) \quad (5.25)$$

5.5. CRITÉRIOS DE CONFORMIDADE PARA AS PROPRIEDADES DO DESEMPENHO

A conformidade com os modelos de cálculo apresentados fica verificada desde que o valor médio dos parâmetros que avaliam as propriedades de desempenho do betão relacionadas com a durabilidade, nomeadamente, resistência à carbonatação, R_{C65}, coeficiente de permeabilidade ao oxigénio, K_{60}, e coeficiente de difusão dos cloretos, D_0, satisfaça, pelo menos, o requerido pelos respetivos modelos de cálculo, ou seja, deve apresentar valores iguais ou inferiores ao valor médio de K_{60} ou de D_0 e iguais ou superiores ao de R_{C65}.

Relativamente ao referido valor médio, a especificação expõe que é conveniente que este seja estabelecido em ensaios iniciais sobre, pelo menos, 9 provetes de betão, obtidos em 3 amassaduras diferentes, com os desvios máximos obtidos dentro de uma dessas amassaduras inferiores a 50%.

A especificação refere ainda que estas propriedades devem ser alvo de um controlo contínuo durante o processo construtivo, conforme o estabelecido no projeto da obra.

5.6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A metodologia baseada na estimativa de propriedades de desempenho do betão implica alguns pressupostos, nomeadamente:

- não sendo introduzidos limites à composição o especificador deve definir a par do tempo de vida útil pretendido, a classe de exposição ambiental, a classe de fiabilidade, assim como outros parâmetros iniciais como a espessura do recobrimento, a razão água/cimento, o tipo de cimento, o tipo de cura, etc.;
- a escolha de analisar a durabilidade por esta abordagem implica que sejam elevados os procedimentos de execução das obras, com uma gestão apoiada em inspeções contínuas rigorosas, tal como previstas na NP ENV 13670-1 [7]. A utilização desta abordagem é recomendável que implique a obrigação de aplicar a classe de inspeção 3 daquela Norma, embora o Decreto-Lei n.º 301/2007, de 23 de Agosto, apenas o exija expressamente para estruturas em que se pretende uma vida útil de 100 anos;
- pela sua contribuição determinante para a durabilidade das obras em betão armado e pré-esforçado deverão ser ainda verificadas as disposições construtivas estabelecidas na NP ENV 13670-1 [7], nomeadamente, as referentes à cura dos betões, ao recobrimento das armaduras;
- apesar de esta Especificação não se referir diretamente à combinação de classes de exposição, a Especificação LNEC E 464 [12], estabelece que em caso de combinação, para a determinação das propriedades de desempenho, deve ser alvo de análise a classe mais desfavorável para a durabilidade da estrutura.

Através da atribuição de valores aos parâmetros iniciais da estrutura, como o recobrimento dos elementos (de acordo com o mínimo estabelecido na EN 1992-1-1 [6]), diâmetro de armaduras passivas ou tipo de cura, a Especificação apresenta a aplicação da metodologia descrita às classes de exposição em causa. Assim, pelo cálculo do período de propagação mínimo e correspondente maximização do período de iniciação, são apresentados valores para as propriedades de desempenho para diferentes combinações de parâmetros das estruturas (tipo de cimento, classe de exposição, diâmetro das armaduras, tipo de cura, etc.). O Anexo A da especificação apresenta quadros com os valores das diferentes propriedades de desempenho exemplificadas.

A partir do modelo desses quadros procedeu-se à sistematização da metodologia baseada no desempenho da Especificação LNEC E 465, conforme ilustra a Figura 5.1.

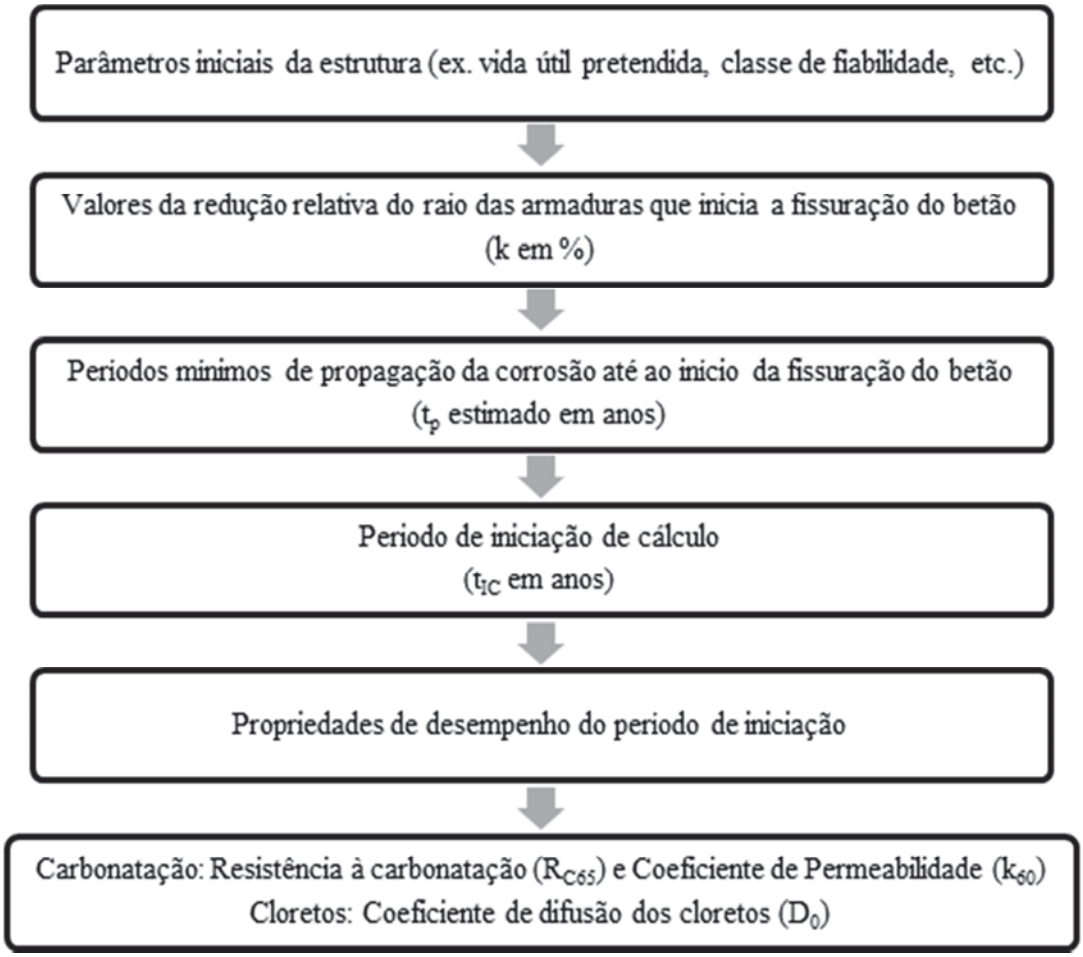


Fig. 5.1 – Sistematização da metodologia baseada no desempenho da Especificação LNEC E 465.

6
DESENVOLVIMENTO DE APLICAÇÕES DE CÁLCULO AUTOMÁTICO PARA AS METODOLOGIAS APRESENTADAS

6.1. INTRODUÇÃO

Nos Capítulos 4 e 5 além de se discutir as metodologias das Especificações LNEC E 464 e LNEC E 465, apresentaram-se procedimentos de cálculo que permitem sistematizar a aplicação de ambas as especificações. Com base nestas sistematizações foram desenvolvidas aplicações de cálculo que permitem ao especificador (projetista) implementar estas metodologias de forma automática, desde que para isso disponha dos parâmetros iniciais da estrutura e tenha conhecimento das metodologias presentes nas especificações.

Estas aplicações surgem, assim, numa tentativa de servir como importantes ferramentas de apoio ao especificador, seja ele projetista ou dono de obra, na aplicação das metodologias apresentadas nas Especificações LNEC E 464 e LNEC E465. As aplicações de cálculo baseiam-se na aplicação direta dos requisitos dessas especificações através dos dados iniciais disponibilizados pelo utilizador.

As aplicações de cálculo foram desenvolvidas no ambiente amigável do *Microsoft Visual Basic for Applications*® incorporado no *Microsoft Excel*®. A opção por este desenvolvimento tem por base o facto de o Microsoft Excel ser uma ferramenta amplamente utilizada no âmbito do projeto de estruturas, sendo as suas fórmulas, gráficos e ferramentas do conhecimento geral dos intervenientes no projeto. A incorporação das aplicações neste aplicativo é portanto vantajosa para estes intervenientes uma vez que não obriga a aprender a dominar novas ferramentas de cálculo.

Do ponto de vista do utilizador o processo desenvolvido pelas aplicações é o indicado na Figura 6.1.

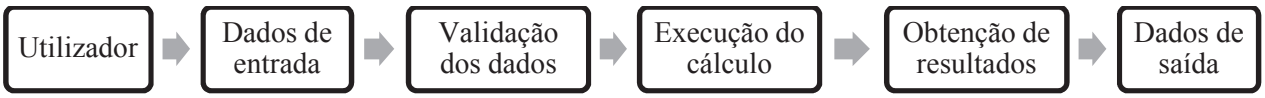


Figura 6.1 – Organigrama de resumo do funcionamento das aplicações.

As aplicações são apresentadas apenas visualmente neste Capítulo, não sendo apresentadas questões relativas à programação em si. As instruções de utilização mais detalhadas, assim como a apresentação de todo o processo por extenso, podem ser encontradas no guia do utilizador disponível no Anexo A4.

6.2. OBJETIVOS

Em termos da Especificação LNEC E 464, a aplicação Excel desenvolvida pretende:

- Auxiliar na definição das prescrições quanto à composição e classe de resistência do betão para considerar a durabilidade;
- Auxiliar na identificação das influências da vida útil e máxima dimensão do agregado nas prescrições gerais;
- Auxiliar na identificação do tipo de cimento mais adequado a utilizar na estrutura através das comparações nas prescrições impostas por cada um;
- Auxiliar na situação de combinações de classes de exposição e na identificação da mais condicionante;
- Auxiliar nas metodologias de aplicação de misturas de cimentos e adições, nomeadamente:
    - verificação da composição de misturas;
    - formulação de misturas.

Em termos da Especificação LNEC E465, a aplicação Excel desenvolvida pretende:

- Auxiliar na estimativa das propriedades de desempenho do betão armado ou pré-esforçado, sujeito à ação do dióxido de carbono ou dos cloretos, que permitam satisfazer a vida útil pretendida;
- Permitir a análise da influência de diferentes parâmetros da estrutura, como a espessura do recobrimento ou o tipo de cimento, na definição das propriedades de desempenho;
- Estimar a vida útil das estruturas com base em parâmetros iniciais e propriedades do desempenho definidas em laboratório.

6.3. DEFINIÇÃO DE PRESCRIÇÕES E/OU TRABALHAR MISTURAS COM BASE NA ESPECIFICAÇÃO LNEC E 464

O Capítulo 4 apresenta o enquadramento teórico relativo à metodologia prescritiva descrita na Especificação LNEC E 464. Neste enquadramento foi apresentada a ideia de sistematizar esta abordagem, sendo ilustrado o encadeamento dos processos desta metodologia em sequências de cálculo (ver Figuras 4.1, 4.2 e 4.3).

Foi seguindo estas sistematizações que se desenvolveu esta aplicação de cálculo, sendo aqui apresentado de acordo com as funcionalidades que lhe estão associadas, nomeadamente

- Definição expedita de prescrições;
- Consulta das prescrições por tipo de cimento;
- Consulta das prescrições por classes, no caso das combinações;
- Misturas e adições:
    - Verificação da composição de misturas;
    - Formulação de misturas.

6.3.1. DEFINIÇÃO EXPEDITA DE PRESCRIÇÕES

A janela inicial da aplicação relativa à Especificação LNEC E 464 corresponde também à janela da sua primeira funcionalidade, a definição das medidas prescritivas para uma determinada estrutura mediante a introdução pelo utilizador dos parâmetros iniciais da estrutura, conforme ilustra a Figura 6.2.

Quando foi discutida a Especificação LNEC E 464, ficou claro que a definição das medidas prescritivas é algo direto bastando para isso conhecer as condições ambientais onde a estrutura se insere e os parâmetros relativos à composição do betão, nomeadamente, o tipo de cimento e a máxima dimensão do agregado mais grosso. Tendo disponíveis estes dados é relativamente fácil atribuir prescrições à estrutura pois estas já se encontram definidas na Especificação. Ora a primeira funcionalidade desenvolvida para aplicação reflete exatamente este aspeto. Introduzindo os dados de entrada da estrutura, aplicação recorre a uma base de dados incorporada e apresenta as prescrições que permitem satisfazer tais condições. A interação programa-utilizador é realizada através da janela ilustrada pela Figura 6.2.

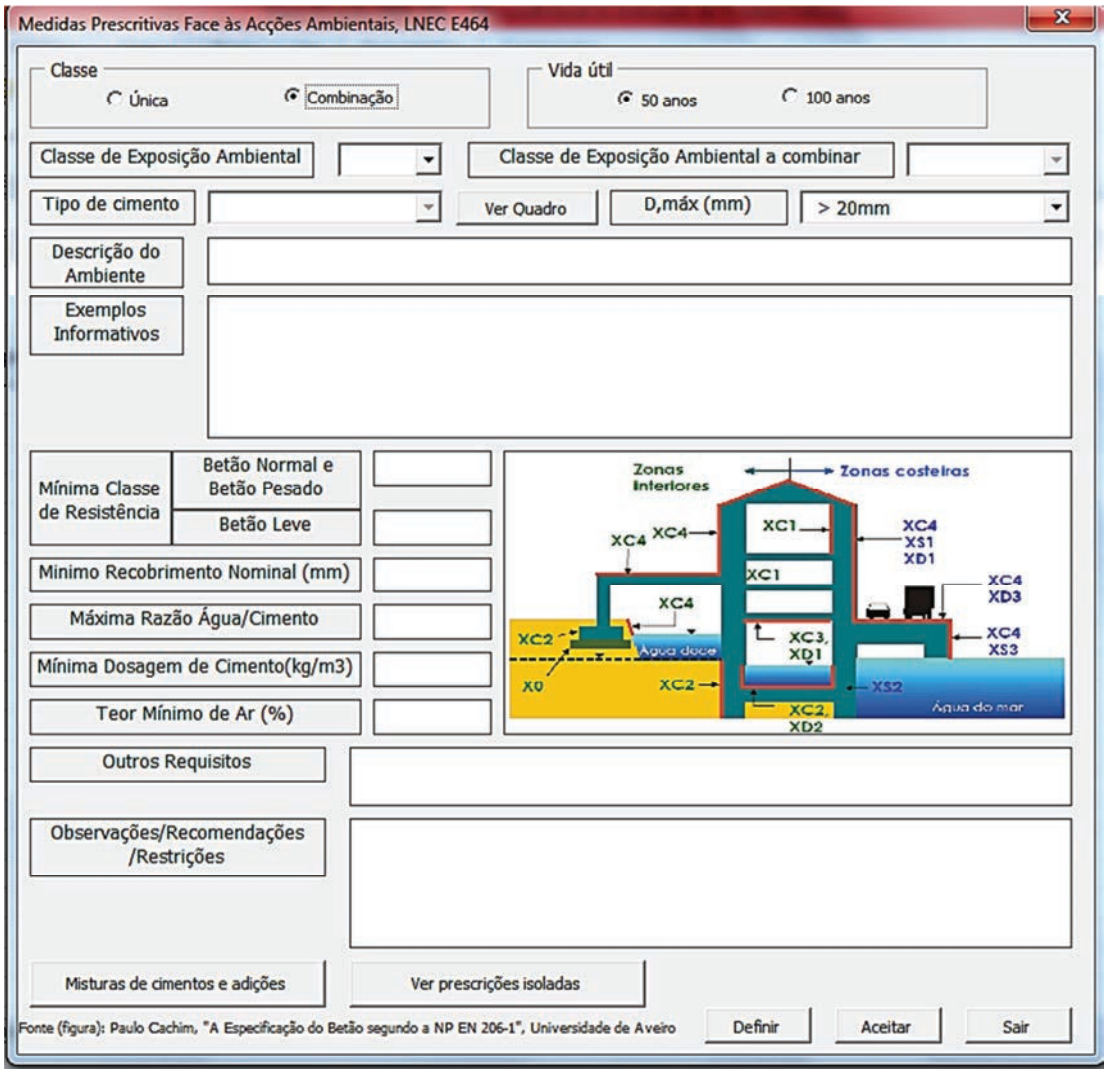


Figura 6.2 – Janela inicial da aplicação para a Especificação LNEC E 464.

6.3.2. CONSULTA DAS PRESCRIÇÕES POR TIPO DE CIMENTO

A definição direta de prescrições funciona bem e de forma rápida quando o especificador já tem bem definida a composição do betão e as condições da estrutura. Entretanto este pode também não ter ainda

definido o tipo de cimento a aplicar como constituinte do betão, querendo analisar a influência do tipo de cimento na definição das prescrições, isto é, na durabilidade das estruturas.

A Especificação atribui medidas prescritivas diferentes consoante o tipo de cimento. Assim a segunda funcionalidade da aplicação permite analisar as medidas prescritivas a aplicar à estrutura para cada um dos 27 tipos de cimento presentes no Quadro 1 da NP EN 197-1 [4]. Ao disponibilizar esta informação ao utilizador, a aplicação está a permitir que este verifique quais os tipos de cimento mais condicionantes para a estrutura, podendo assim escolher o que melhor se enquadra na exposição ambiental em causa. Esta funcionalidade é apresentada ao utilizador conforme ilustrado na Figura 6.3.

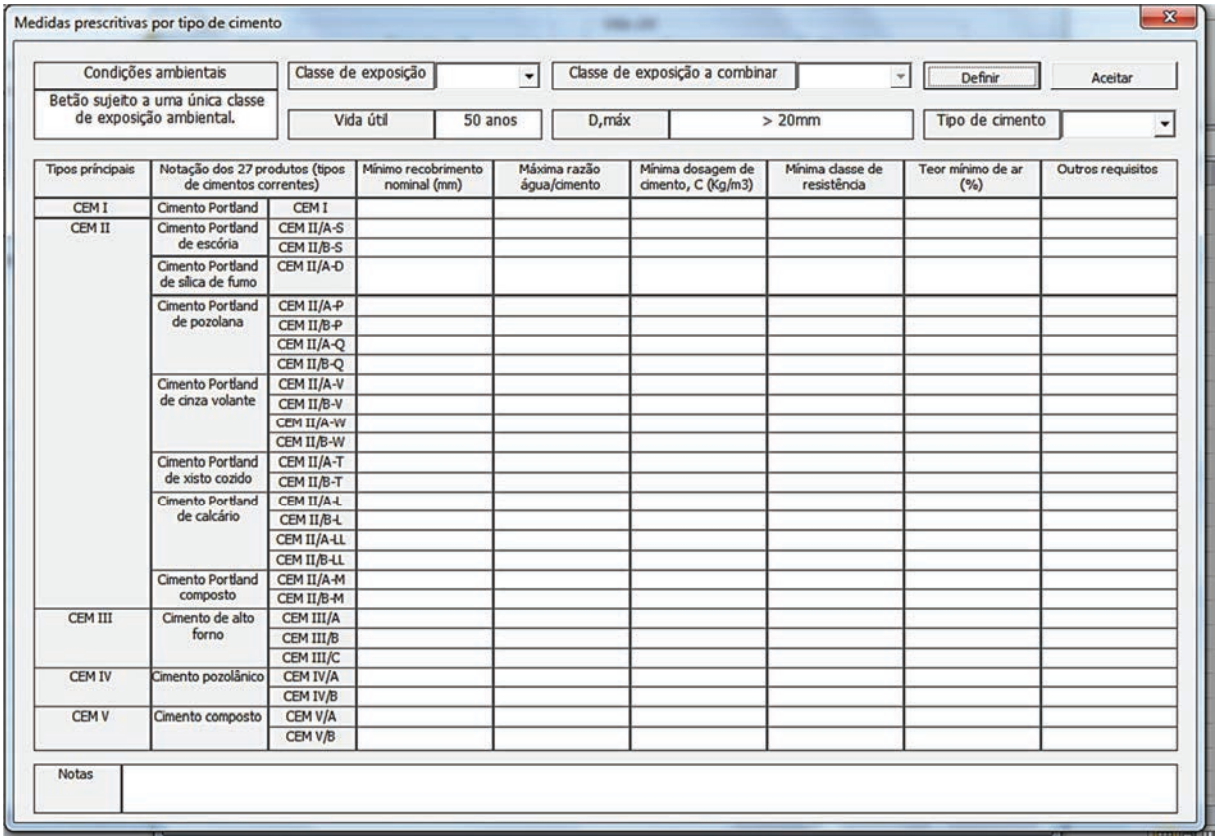


Figura 6.3 – Janela de apresentação das prescrições por tipo de cimento.

6.3.3. CONSULTA DAS PRESCRIÇÕES POR CLASSES NO CASO DAS COMBINAÇÕES

Esta funcionalidade surge do já exposto no Capítulo 4 acerca das combinações de classes de exposição ambiental. Foi visto então que nestes casos o especificador deve analisar as medidas prescritivas, para cada caso isoladamente e, posteriormente, especificar no projeto as que se mostrarem mais severas, relacionadas às classes de exposição mais gravosas.

A aplicação emprega esta metodologia de forma automática, apresentando ao utilizador as prescrições isoladas de cada classe envolvida na combinação e a classe de exposição condicionante, isto é, a classe de exposição cujas medidas prescritivas por serem mais exigentes (maior dosagem de cimento mínima, menor razão água/cimento máximo, maior classe de resistência mínima, etc.) condicionam a estrutura. Esta funcionalidade apresenta-se ao utilizador numa nova janela conforme o ilustrado na Figura 6.4. O exemplo ilustrado nesta figura é o mesmo apresentado no Quadro 4.5.

Prescrições de cada classe da combinação

Classes de Exposição	XC4	XD1	XF2	Condicionantes
Mínimo recobrimento nominal (mm)	40	45	-	45
Máxima razão água/cimento	0.60	0.45	0.55	0.45
Mínima dosagem de cimento, C (Kg/m3)	280	360	280	360.0
Mínima classe de resistência	C30/37 ; LC30/33	C40/50 ; LC40/44	C30/37 ; LC30/33	C40/50 ; LC40/44
Teor mínimo de ar (%)	-	-	4.0	4
Observações	-	-	Agregados conformes com a EN 12620:2002 com suficiente resistência ao gelo/degelo.	Ver notas individuais das classes.

Classe de Exposição Condicionante	XD1

OK

Figura 6.4 – Janela de apresentação das medidas prescritivas de cada classe da combinação

Assim, tal como as outras duas funcionalidades descritas anteriormente, também esta funcionalidade só é possível de ser executada quando as condições ambientais e outros parâmetros relevantes da estrutura estejam definidos.

6.3.4. MISTURAS E ADIÇÕES

Quando foi abordada a Especificação LNEC E 464, fez-se referência a que a sua importância ultrapassa a simples definição de medidas prescritivas para as estruturas, fornecendo também as metodologias de análise das misturas de cimentos e adições. De modo a refletir essa importância e expandir a utilização da aplicação desenvolvida, associou-se-lhe essas metodologias de análise das misturas. A aplicação auxilia o utilizador a comprovar a aptidão das misturas na medida em que sistematiza o processo descrito na especificação tanto para a verificação da composição de uma determinada mistura como para a formulação de uma nova mistura. As funcionalidades relativas a estas metodologias são apresentadas adiante.

6.3.4.1. Verificação da composição de misturas

A verificação da composição de misturas segue o processo de cálculo por etapas/fases como apresentado no Anexo A da especificação LNEC E 464 e discutido no Capítulo 4. Estas etapas do cálculo são apresentadas ao utilizador sob a forma de separadores/abas no objeto gráfico, de modo a que este possa, em qualquer altura do processo, visualizar o desenvolvimento do mesmo. Assim esta funcionalidade é composta por uma janela com diferentes separadores/abas, que fazem o encadeamento do processo de cálculo conforme a metodologia apresentada na Especificação. O processo desenvolvido por esta funcionalidade está presente no guia do Anexo A4, sendo apenas apresentado neste Capítulo as janelas inicial (Figuras 6.5), de introdução dos dados, e a final (Figura 6.11), de apresentação dos resultados.

Para o funcionamento do processo será necessário introduzir de início a composição da mistura a verificar (ver Figura 6.5).

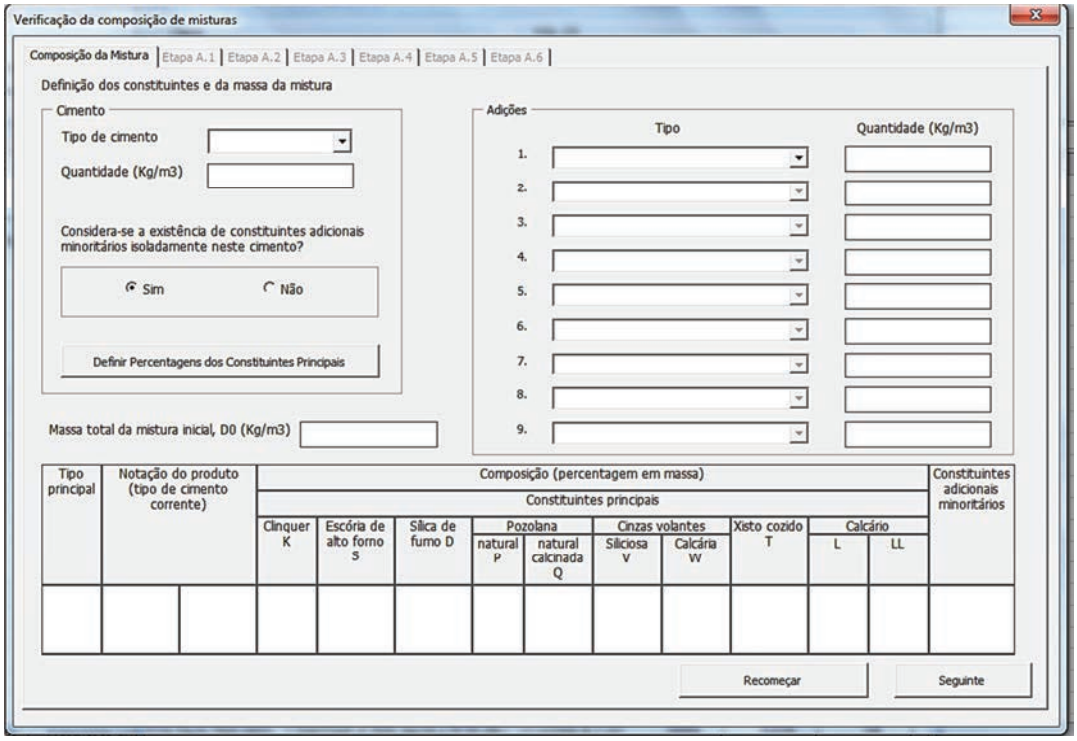


Figura 6.5 – Janela de início da verificação da composição de misturas.

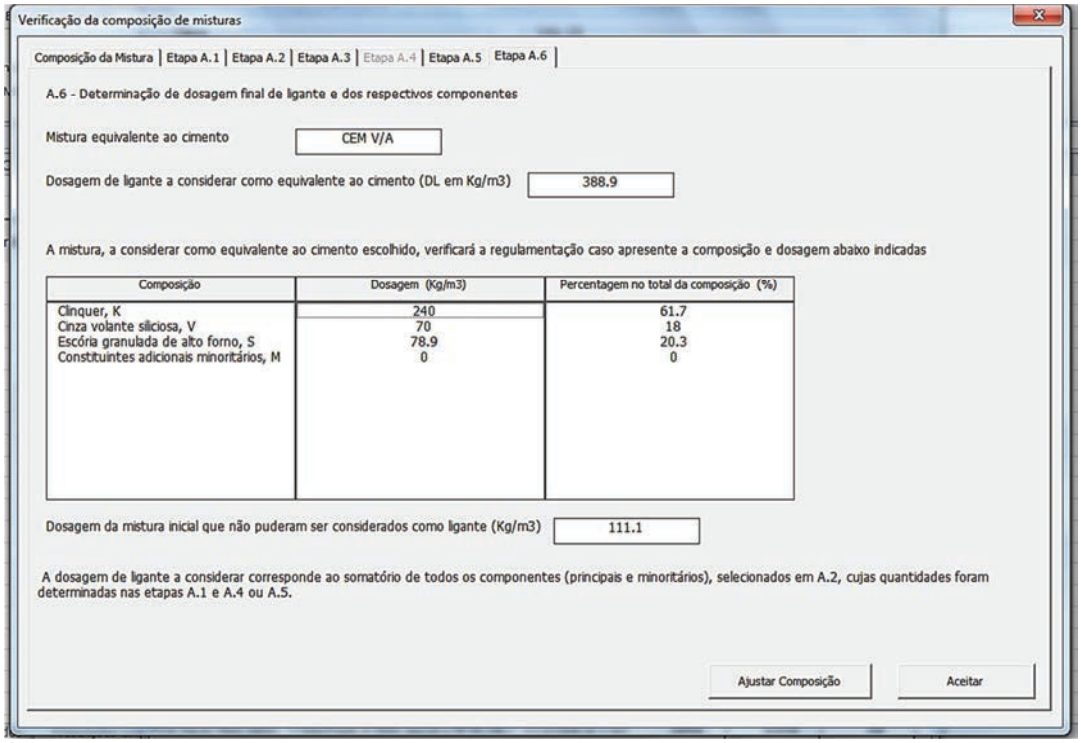


Figura 6.6 – Etapa A.6: Apresentação da dosagem final de ligante e respetivos componentes.

Ao fim deste processo a aplicação deverá apresentar ao utilizador a conclusão sobre a verificação da aptidão da mistura para ser constituinte do betão, de acordo com os componentes inicialmente definidos.

Os processos de cálculo são assim automáticos e realizados pela aplicação, contudo em alguns pontos do mesmo será requerido que o utilizador tome algumas opções de cálculo para que realmente o resultado final esteja de acordo com o que ele pretenda. Isto também permite que a aplicação não seja de todo extremamente "rígida", dando alguma flexibilidade ao utilizador

6.3.4.2. Formulação de misturas

A funcionalidade de "Formulação de misturas" está organizada de forma semelhante ao apresentado anteriormente para a parte da "Verificação da composição de misturas". O utilizador interage com uma nova janela onde o processo é exibido em abas, ou separadores, conforme a etapa onde este se encontrar.

Tanto esta funcionalidade como a verificação de misturas exposta na secção anterior, não requerem definições de outros parâmetros que não estejam relacionados com a composição do ligante em si. Isto quer dizer que achou-se conveniente que estas funcionalidades fossem possíveis de ser executadas mesmo não tendo definidos os restantes parâmetros da estrutura (como a classe de exposição), sendo requerida apenas a constituição, isto é, os materiais da mistura. Assim para que a metodologia da Especificação seja corretamente aplicada, após verificação ou formulação de misturas neste caso, o utilizador deve introduzir os resultados na análise das medidas prescritivas a adotar.

Este processo também se encontra detalhado no Anexo A.4 sendo apenas ilustrados, nas Figuras 6.7 e 6.8, respetivamente, as etapas de introdução dos dados e obtenção dos resultados.

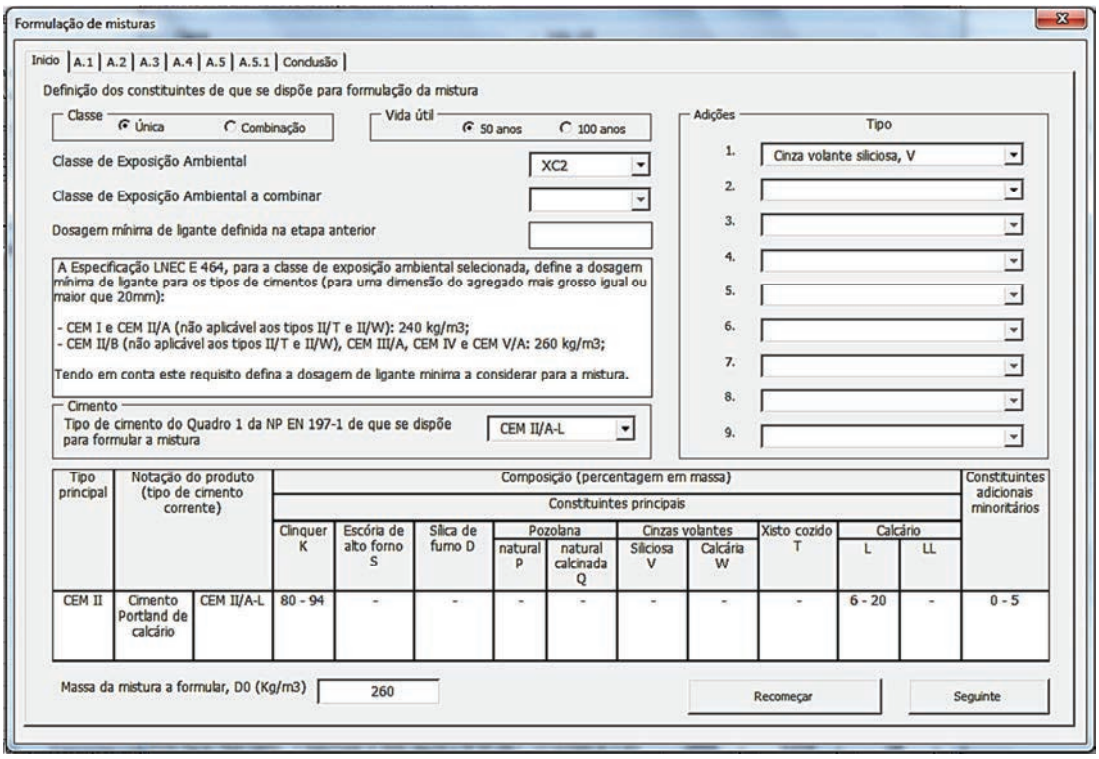


Figura 6.7 – Janela de início da formulação de misturas.

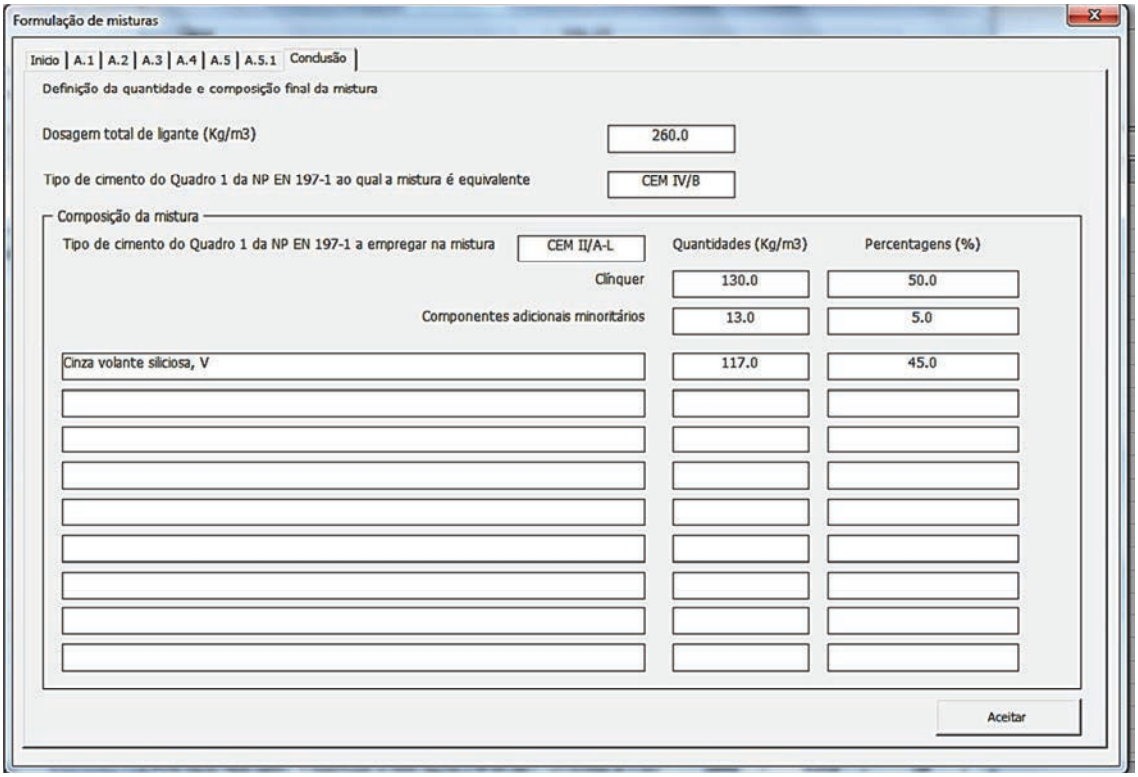


Figura 6.8 – Etapa Final: Definição da quantidade e composição final da mistura.

6.4. METODOLOGIA BASEADA NO DESEMPENHO DA ESPECIFICAÇÃO LNEC E 465

A outra aplicação desenvolvida representa o procedimento a ser seguido para estimar as propriedades de desempenho do betão armado ou pré-esforçado, sujeito à ação do dióxido de carbono ou dos cloretos, que permitem satisfazer a vida útil pretendida, de acordo com a Especificação LNEC E 465, assim como incluir também a funcionalidade de, utilizando a metodologia presente na especificação, estimar o tempo de vida útil da estrutura com base em propriedades do desempenho obtidas em ensaios laboratoriais. Esta última funcionalidade foi desenvolvida utilizando o processo inverso ao ilustrado na Figura 4.3.

Para seguir a Especificação, a aplicação apresenta as mesmas simplificações e considerações de cálculo presentes nesta e já apresentadas no Capítulo 5.

6.4.1. ESTIMATIVA DE PROPRIEDADES DE DESEMPENHO QUE PERMITEM SATISFAZER A VIDA ÚTIL DE PROJETO PARA ESTRUTURAS DE BETÃO ARMADO E PRÉ-ESFORÇADO

Na estimativa das propriedades de desempenho que permitem satisfazer a vida útil de projeto para estruturas de betão armado e pré-esforçado são requeridos alguns parâmetros iniciais para o procedimento de cálculo, destacando-se desde logo a classe de exposição ambiental (condicionante das propriedades de desempenho a serem estimadas) e a classe de fiabilidade (parâmetro de influência nas estimativas devido ao fator de segurança que lhe está associado), sem descuidar o recobrimento adotado, a razão água/cimento ou o tipo de cura, entre outros parâmetros. Assim sendo, a aplicação desenvolvida recolhe as informações respeitantes a estes parâmetros iniciais e de forma automática

apresenta a estimativa das propriedades de desempenho e outros resultados relevantes, como sejam a estimativa dos períodos de iniciação e de propagação da corrosão.

Semelhante aos processos de verificação e formulação de misturas da aplicação referente à Especificação LNEC E 464 já apresentados, para a aplicação de cálculo relativa à Especificação LNEC E 465, o processo desenvolve-se em janelas apresentando abas/separadores que permitem controlar o avanço do mesmo. Esta organização mostra ser a mais adequada, pois visto a metodologia adotada não ser direta, progredindo por cálculos separados de determinados parâmetros, esta divisão por abas/separadores representando o processo continuo até ao objetivo final, permite acompanhar de melhor forma a metodologia. Assim o utilizador não será confrontado por janelas diferentes, mas apenas uma janela com diferentes abas/separadores transitáveis.

A aplicação apresenta então, abas/separadores de recolha de informação sobre a estrutura, ou seja, dados de entrada, fornecidos pelo utilizador, e outras abas/separadores onde serão apresentados apenas os resultados do processo de cálculo para análise do utilizador. O procedimento desenvolvido pela aplicação é resumido nas Figuras 6.9 a 6.11, para as etapas introdução dos dados e de obtenção dos resultados, sendo a apresentação do processo, com todas as etapas de cálculo executadas pela aplicação, realizada no Anexo A.4.

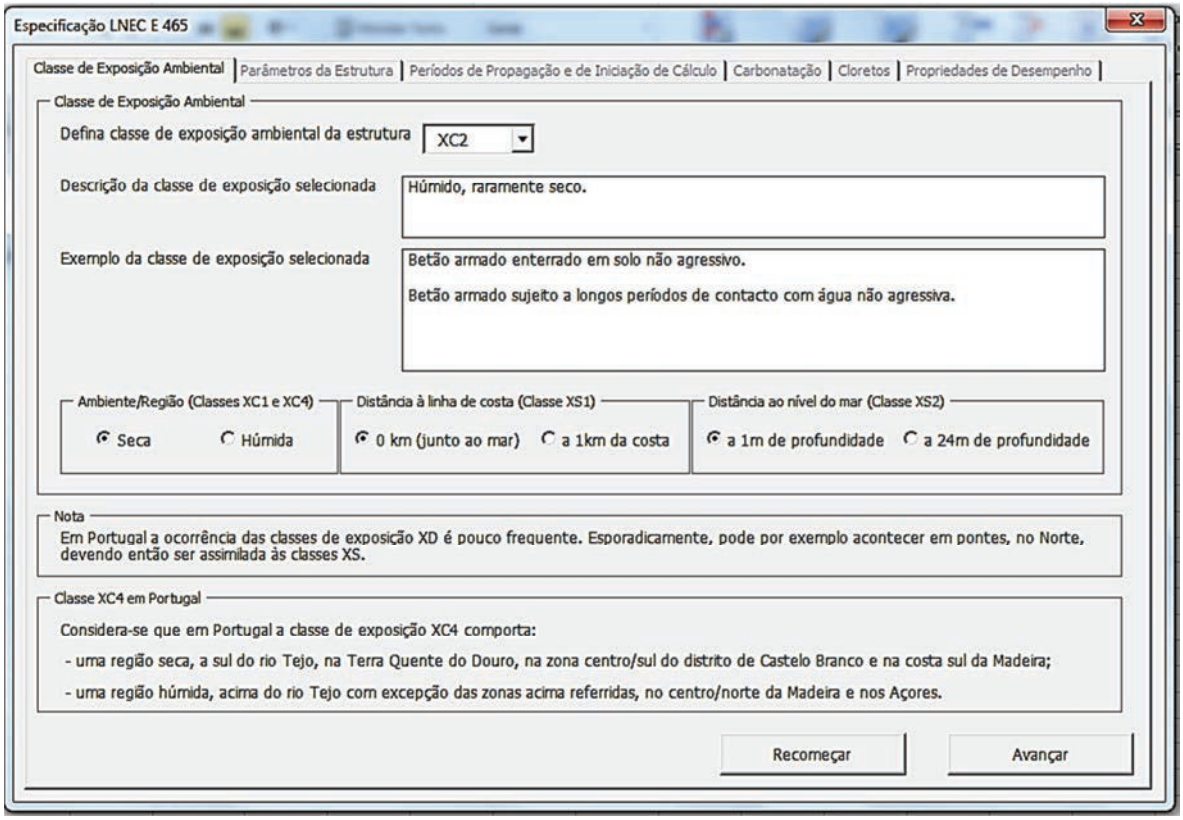


Figura 6.9 – Etapa inicial do procedimento, definição da classe de exposição ambiental.

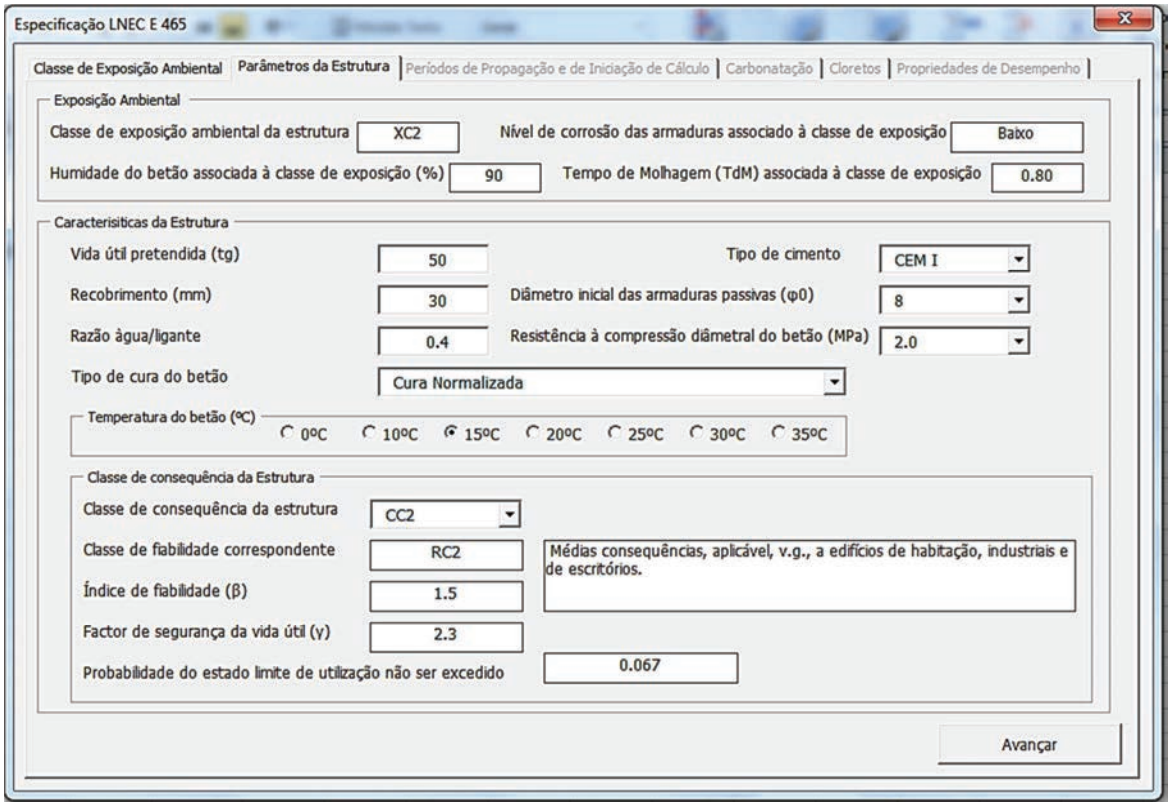


Figura 6.10 – Definição dos parâmetros da estrutura.

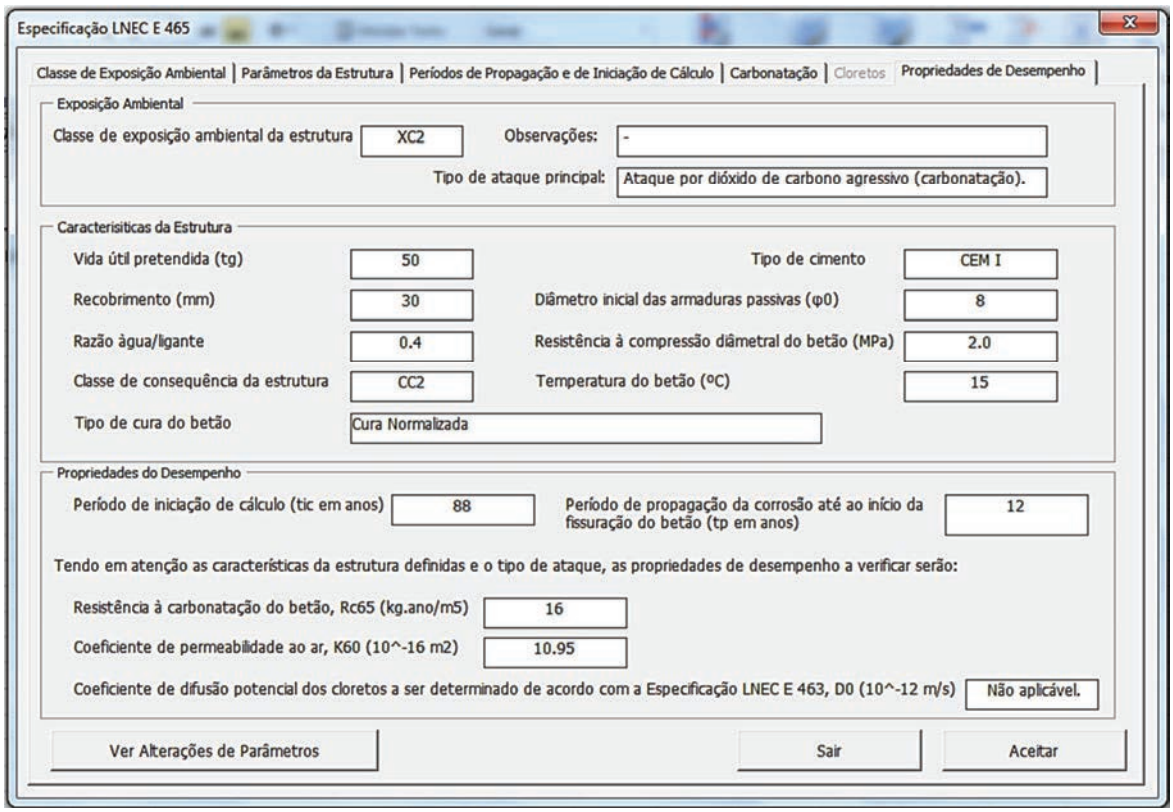


Figura 6.11 – Etapa final do processo com apresentação dos resultados.

A aplicação desenvolvida, para este processo de cálculo, apresenta ainda outra funcionalidade. Suponha-se que o especificador quer analisar como é que a alteração dos parâmetros iniciais da estrutura alteram as propriedades de desempenho a verificar. Para isso ele deveria aplicar a metodologia repetitivamente para cada alteração que queira introduzir até conseguir ter dados suficientes que permitam realizar esta análise. É de forma a facilitar este processo que a aplicação permite ter acesso a uma funcionalidade que possibilita a análise simultânea de diferentes variações das propriedades do desempenho, conforme algumas alterações dos parâmetros iniciais da estrutura.

Para as diferentes propriedades de desempenho calculadas são apresentadas em forma de gráficos as variações que uma mudança no tipo de cimento, na espessura do recobrimento, ou na razão água/cimento introduzem. A Figura 6.14 ilustra uma dessas variações dos parâmetros nas propriedades do desempenho. Esta funcionalidade mostra-se muito útil na otimização da composição do betão, permitindo maior sustentabilidade de materiais e mais economia.

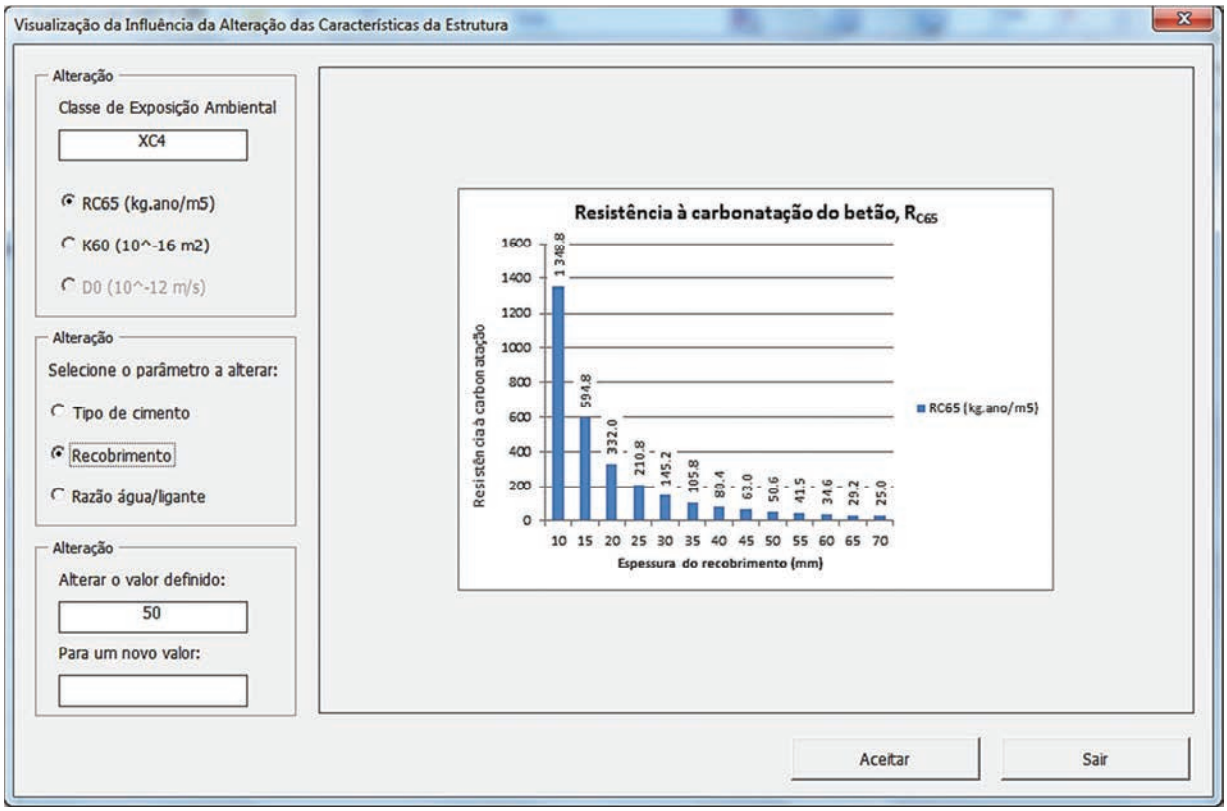


Figura 6.12 – Análise da influência da espessura de recobrimento na resistência à carbonatação

6.4.2. ESTIMATIVA DA VIDA ÚTIL DE PROJETO DE ESTRUTURAS DE BETÃO ARMADO E PRÉ-ESFORÇADO COM BASE EM PROPRIEDADES DE DESEMPENHO ENSAIADAS

Esta funcionalidade da aplicação foi desenvolvida utilizando o processo inverso ao apresentado na secção anterior, para estimar a vida útil de projeto de estruturas de betão armado e pré-esforçado com base em propriedades do desempenho de uma dada composição.

O processo é desenvolvido por etapas de cálculo, apresentadas em abas/separadores da janela da aplicação pelas razões já enunciadas. As duas primeiras etapas do cálculo, relativas à definição dos parâmetros iniciais da estrutura, são iguais tanto para esta funcionalidade como para a outra anteriormente descrita, não sendo por isso transcritos nesta secção. As Figuras 6.15 a 6.17 ilustram, respetivamente, as etapas relativas à entrada da informação sobre as propriedades do desempenho ensaiadas no programa, e a apresentação das estimativas do tempo de vida útil. O Anexo A.4 expõe de forma extensiva todo o processo desenvolvido por esta funcionalidade.

O procedimento de cálculo, mais uma vez, será iniciado com a definição dos dados de entrada, relativos à estrutura. No desenvolvimento considerou-se que, a par dos cálculos relativos à metodologia, seria conveniente a aplicação interagir com o especificador dando informações acerca do cumprimento ou não da vida útil pretendida em comparação com a vida útil estimada. Isto auxilia o especificador na definição de propriedades de desempenho que satisfaçam este requisito.

Uma nota final para esclarecer que apesar das aplicações interagirem com o especificador através de janelas desenvolvidas no Visual Basic, nos seus desenvolvimentos foram pensados para que os resultados finais, de qualquer uma das metodologias (prescritiva ou baseada no desempenho), possam ser sempre exportados para uma folha de cálculo do Excel, onde o especificador beneficiará de maior liberdade para tratamento dos dados da forma que melhor servir os seus objetivos.

No Capítulo seguinte é apresentada a utilização das aplicações desenvolvidas num caso prático, abordando as duas metodologias discutidas.

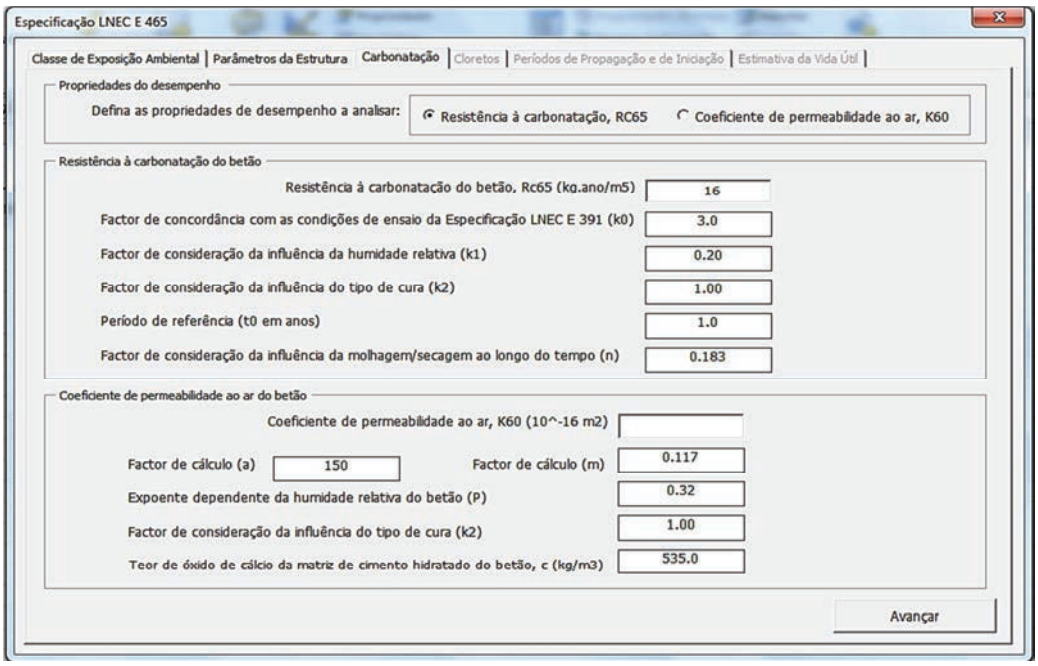


Figura 6.13 – Definição de propriedades do desempenho para a carbonatação.

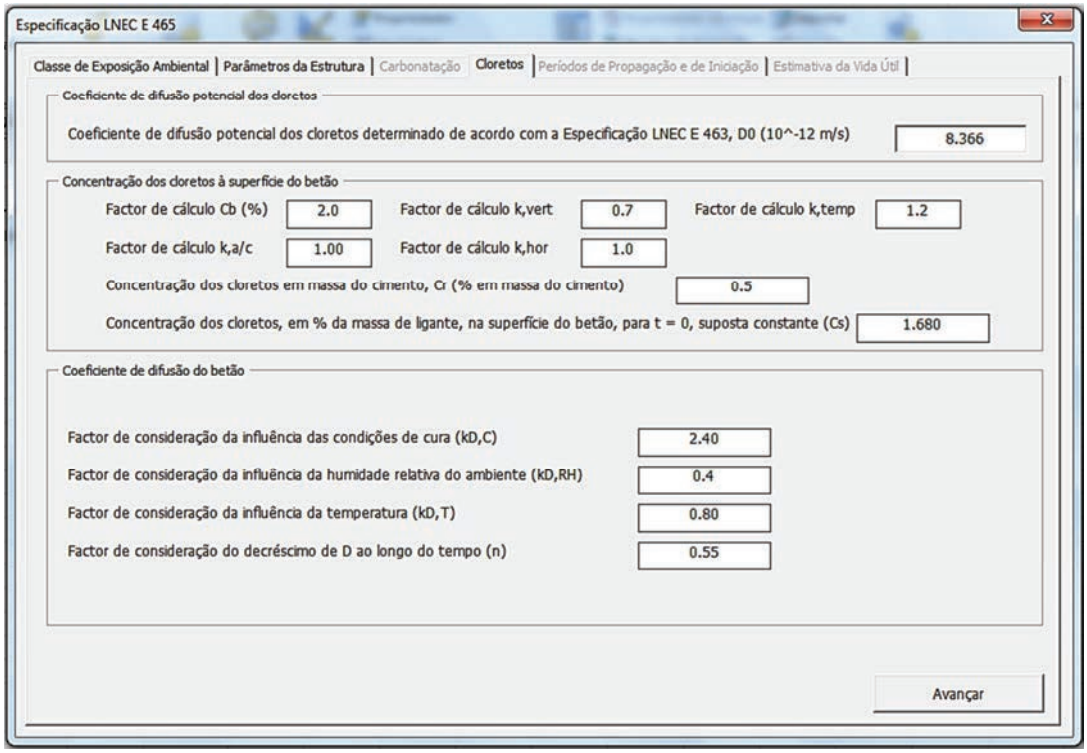


Figura 6.14 – Definição de propriedades do desempenho para os cloretos.

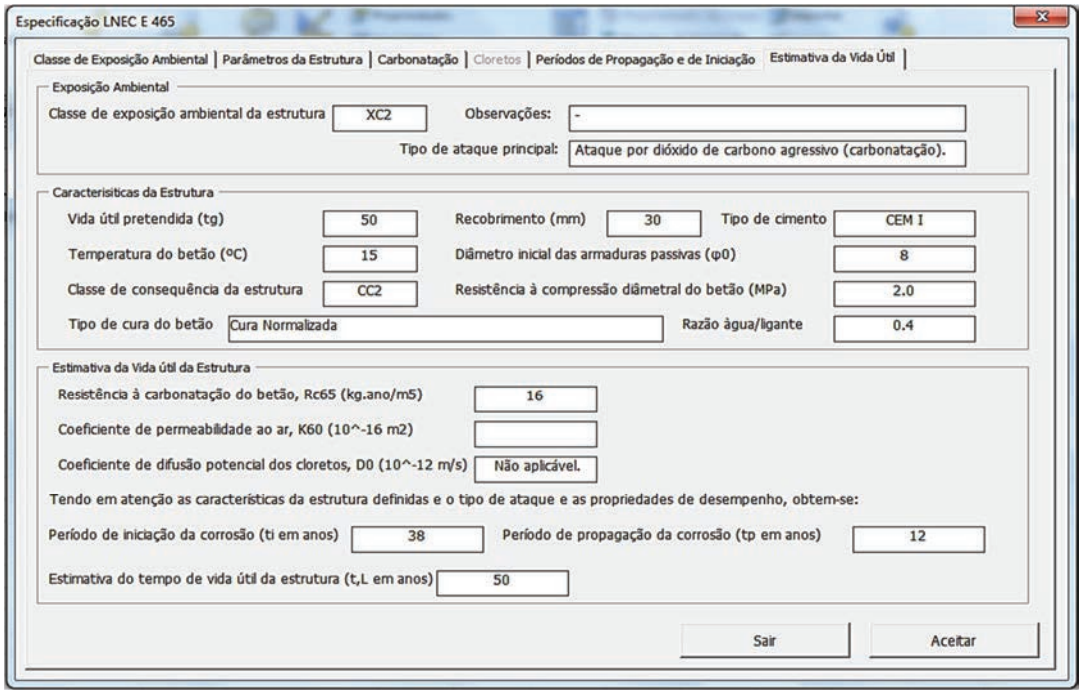


Figura 6.15 – Apresentação final dos resultados do processo de cálculo.

7
CASO DE APLICAÇÃO AO BETÃO AUTO-COMPACTÁVEL DESTINADO AO NOVO TERMINAL DE CRUZEIROS DO PORTO DE LEIXÕES

7.1. INTRODUÇÃO

A aposta na dinamização da indústria de cruzeiros na região Norte de Portugal definiu o projeto de construção de um novo Terminal de Cruzeiros de Leixões como uma prioridade. Assim foi desenvolvido o projeto para a execução deste Terminal de Cruzeiros, no qual se destaca como elemento mais emblemático e peculiar de todo o projeto, o edifício central do complexo correspondente ao terminal de passageiros e a outras funcionalidades, tais como a localização dos Departamentos de Produção de Ciência (gabinetes e laboratórios experimentais) e de Divulgação Científica do futuro Parque de Ciência e Tecnologias do Mar da Universidade do Porto.

Na tentativa de tornar a obra não só um espaço funcional como também um ponto de interesse e quiçá um ícone da região em que se insere, a par de outras obras emblemáticas como as pontes do rio Douro, o projeto selecionado apresenta uma arquitetura arrojada e singular, conforme ilustra a Figura 7.1.

Figura 7.1 – Modelo Computorizado do Novo edifício do Terminal de Cruzeiros do Porto de Leixões.

Ao estabelecer o projeto para a estrutura implementou-se um desafio à engenharia civil de modo a cumprir tal projeto, através de técnicas inovadoras e arrojadas que acompanhem o arrojo apresentado na arquitetura. Este projeto faz assim valer a máxima de que às grandes obras de arquitetura estão associadas grandes obras de engenharia [44].

A estrutura do edifício é envolta num elemento laminar de betão, com um desenvolvimento em espiral, constituindo este a parte exterior do edifício. Além do seu desenvolvimento numa forma pouco comum, a lâmina de betão apresentará uma densidade de armaduras elevada apontando-se inicialmente para uma solução de betão arquitetónico branco para este elemento. Considerando estas condicionantes, a solução mais adequada para esta aplicação foi apontada como sendo o betão auto-compactável (BAC), pois este betão apresenta vantagens relativamente ao betão convencional, nomeadamente, maior homogeneidade do betão eliminando os problemas de durabilidade decorrentes de uma vibração deficiente, maior flexibilidade de conceção estrutural e arquitetónica, ao permitir maior densidade de armaduras, maior flexibilidade ao nível da sua disposição, elementos mais esbeltos e com formas mais complexas, que permitem superar os desafios apresentados [44]. Além disso, a qualidade superficial deste betão é por norma superior à do betão convencional.

Contudo o projeto de arquitetura não é o único desafio a ser ultrapassado pela engenharia. A localização do edifício, em Matosinhos, no extremo do molhe sul do Porto de Leixões, a cerca de 800 m da costa, faz com que este seja classificado como estrutura marítima. Esta classificação implica grandes condicionalismos não só no projeto estrutural do edifício, mas também no processo construtivo, destacando-se as considerações a ter com a durabilidade dos materiais a utilizar. Os requisitos de durabilidade implicam simultaneamente um betão com baixo calor de hidratação e baixa retração, para evitar a ocorrência de fendilhação durante as primeiras idades, e elevada resistência à penetração de cloretos.

Verificou-se portanto que a execução do edifício impõe várias exigências de diferentes índoles, relacionadas com a auto-compactabilidade, a cor a apresentar (branco), a qualidade do acabamento da superfície do betão e os requisitos de composição acima referidos. De modo a cumprir estas exigências surgiu a colaboração do LABEST/FEUP na otimização de uma composição de BAC branco para ser aplicada neste edifício.

A formulação desta composição ficou a cargo de membros do LABEST/FEUP com elevada experiência no betão auto-compactável [45]. A referência aos métodos utilizados, para obtenção desta composição, não é apresentada neste trabalho, por ser complexa e fora do âmbito proposto. Refere-se apenas que a composição foi sujeita a ensaios para verificar se esta correspondia às exigências definidas pelo projeto, com definição das propriedades do betão no estado fresco, durante o endurecimento e no estado endurecido.

A composição otimizada em laboratório foi aplicada numa parede curva da "Ilha Ecológica" do Porto de Recreio, em Leixões (ver Figura 7.2), permitindo controlar o seu desempenho à escala real, em ambiente de obra. Assim, o presente capítulo apresenta a análise da durabilidade deste último elemento, através das duas metodologias descritas nos Capítulos 4 e 5, com o auxílio da aplicação de cálculo desenvolvido. No âmbito deste trabalho, não foram realizados novos ensaios ao betão, sendo antes o cálculo desenvolvido sobre os resultados dos ensaios efetuados pela equipa do LABEST/FEUP e as condições iniciais definidas para a estrutura [45].

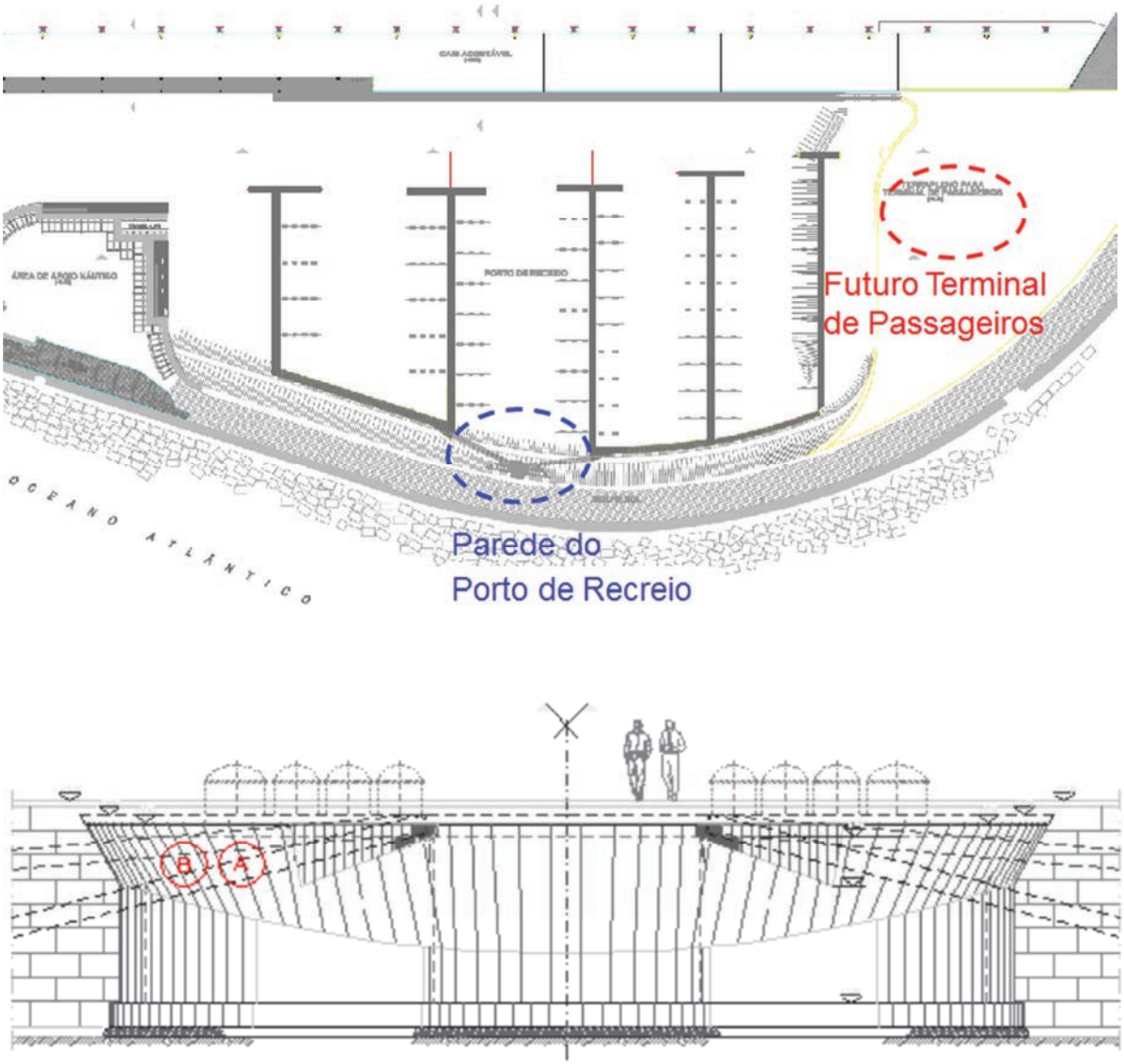


Figura 7.2 – Representação em planta e em alçado da "Ilha Ecológica" do Porto de Recreio, em Leixões.

7.2. CLASSIFICAÇÃO AMBIENTAL DA OBRA

A localização em zona costeira implicará o contacto com a água do mar tanto nos pisos subterrâneos, devido à presença de água no solo, como na superstrutura, provenientes de salpicos de rebentação e transporte pelo ar. Este contacto continuo com a água do mar facilita o ataque por cloretos provenientes da água do mar.

Recorrendo á classificação ambiental presente na Especificação LNEC E 464, e através da descrição das classes apresentada, conclui-se que o elemento encontra-se numa zona de marés, de rebentação e de salpicos, conforme ilustram as Figuras 7.3 e 7.4, correspondente assim à classe de exposição XS3.

Contudo verifica-se também que não estando o elemento submerso na água do mar, a sua superfície exterior estará exposta ao ar atmosférico e à mercê do ataque pelo dióxido de carbono presente. Assim uma classe de exposição que considere também a corrosão induzida por carbonatação também é possível de ser estabelecida, quanto mais não seja para ter em atenção a devida segurança a todos os

condicionalismos ambientais. Pela descrição das classes de exposição relacionadas com a carbonatação observa-se que a classe onde o elemento melhor se enquadra será a XC4 por estar exposto a ciclos de molhagem/secagem.

Estabelece-se assim para o elemento em estudo uma combinação de classes de exposição, que para estar em concordância com as combinações definidas na Especificação LNEC E 464 será a combinação da classe XC4 com a XS3 e ataque da água do mar (XA1).

Fazendo uma analogia com o edifício do Terminal de Cruzeiros, este provavelmente não se encontra totalmente inserido nesta combinação, mas para uma maior uniformidade do material a aplicar, o dimensionamento teria de satisfazer as condições para a classe mais severa, acabando por se adotar igualmente a combinação XC4 + XS3 + ataque da água do mar (XA1).

Figura 7.3 e 7.4 – Elemento em BAC branco da "Ilha Ecológica" do Porto de Recreio, em Leixões.

Estabelece-se então que, para os procedimentos deste capítulo, o elemento está sujeito à combinação XC4 + XS3 + ataque da água do mar (XA1) sendo a verificação calculada para esta combinação.

7.3. COMPOSIÇÃO E RESULTADOS DE ENSAIOS

Para a verificação da concordância das características da estrutura com as metodologias prescritivas (Especificação LNEC E 464) e baseada no desempenho (Especificação LNEC E465) são precisos além da classificação ambiental, dados acerca da composição do betão, resultados de ensaios, nomeadamente, do coeficiente de difusão dos cloretos, e outros parâmetros de projeto (p.e., recobrimento adotado). A composição final otimizada é constituída pelos materiais e dosagens apresentados no Quadro 7.1.

A utilização do CEM II/A-L na composição justifica-se por ser pretendido um betão branco e a gama de cimentos brancos produzidos em Portugal ser mais restrita que a gama dos cimentos cinzentos assim como pela maior garantia de uniformidade de características, de um fornecimento para outro, dada pelo produtor do cimento.

Quadro 7.1 – Materiais e dosagens da composição otimizada do betão [45].

Materiais constituintes	Dosagens (kg/m^3)
Cimento (do tipo CEM II/A-L 52,5R (Br))	416
Fíler calcário	151
Metacaulino	44
Água	184
Superplastificante	6,10
Areia fina	324
Areia grossa	487
Brita	744

Observa-se que a composição do betão apresenta um tipo de cimento corrente (CEM II/A-L) e adições (fíler calcário e metacaulino). Para as verificações pretendidas, poderia ser considerado como ligante hidráulico do betão apenas o cimento CEM II/A-L, mas tal consideração não se mostrava muito correta, uma vez que estaria a se desprezar a influência das adições presentes na composição.

Assim, estabeleceu-se que o ligante a ser considerado nos cálculos, seria composto por uma mistura de cimento CEM II/A-L e adições, nomeadamente fíler calcário e metacaulino. O fíler calcário é uma adição normalizada, considerada como "Calcário, L" na regulamentação relativa à especificação dos cimentos (NP EN 197-1 [4]). O metacaulino é obtido por tratamento térmico e eventual moagem a partir de caulino [55]. Trata-se de uma pozolana natural calcinada, estando portanto normalizada enquadrando-se na designação "Pozolana Natural Calcinada, Q". Estando os dois materiais normalizados não existe impedimento para que possam ser considerados como adições no cimento.

Sendo o cimento do tipo II/A-L da classe de resistência 52,5, as adições do tipo I de origem calcária satisfazendo a Especificação LNEC E 466 (fíler calcário) e do tipo II (metacaulino) e não existindo sílica de fumo na composição, estão satisfeitas assim três das condições impostas pela Especificação LNEC E 464 para que a mistura possa ser considerada como constituinte do betão. A última condição a verificar é se a mistura satisfaz os limites estabelecidos para a composição de um dos cimentos do Quadro 1 da NP EN 197-1.

Para confirmar a aptidão da mistura procedeu-se então à sua verificação segundo a metodologia expressa no Anexo A da Especificação LNEC E 464, verificando assim a dosagem que pode efetivamente ser considerada como ligante hidráulico no betão em estudo. Estabeleceu-se como cimento a equivaler pela mistura o cimento Portland composto EN 197-1 – CEM II/B-M (Q-L) 52,5 R uma vez que este cimento apresenta possibilidade de inclusão de até 35% de outros constituintes principais além do clínquer na sua composição (percentagem em massa), maximizando a quantidade de adições na mistura.

Recorrendo à aplicação de cálculo desenvolvida, introduzindo as dosagens de cimento e adições do Quadro 7.1 (ver Figura 7.5), efetuou-se a verificação da mistura. A Figura 7.6 apresenta os resultados obtidos dessa verificação.

Uma vez que o CEM II/A-L, utilizado como cimento de base na mistura, já possui calcário na sua composição, optou-se por tentar manter a dosagem inicial de cimento (CEM II/A-L) e de metacaulino, diminuindo, caso necessário, a dosagem de fíler calcário de modo a satisfazer os limites impostos pela especificação para um CEM II/B-M (Q-L).

Observa-se que de uma dosagem inicial da mistura de 611 kg/m^3, apenas 512 kg/m^3 podem ser efetivamente considerados como dosagem de ligante, equivalente ao CEM II/B-M (Q-L). Quer isto dizer que 99 kg/m^3 da dosagem inicial de fíler calcário não puderam ser considerados como constituintes do ligante, mantendo-se a dosagem inicial de cimento CEM II/A-L (416 kg/m^3) e de metacaulino (44 kg/m^3).

Com esta dosagem de ligante e a dosagem de água considerada no betão, determina-se a razão água/ligante da composição a estabelecer nas análises posteriores como sendo igual a 0,36.

Quanto aos resultados de ensaios, realizados sobre provetes recolhidos em laboratório e em obra, são apresentados no Quadro 7.2 os mais relevantes para o âmbito deste trabalho.

Quadro 7.2 – Resultados de ensaios (laboratório e obra) para a composição otimizada [45].

	Laboratório	Obra	
Propriedade	28 dias	28 dias	90 dias
f_{cm} (MPa)	80,4 (cubos)	74,9 (cilindros)	79,2 (cilindros)
E_{cm} (GPa)	--	44,1	44,9
f_{ctm} (MPa)	--	5,8	5,6
D_{cl} [$\times 10^{-12}$ (m/s)]	3,54	2,88	2,90
$K_{oxigénio}$ [$x10^{-18}$ (m^2)]	--	7,03	2,13

Onde

f_{cm} – valor médio da tensão de rotura do betão á compressão;

E_{cm} – Módulo de elasticidade secante do betão;

f_{ctm} – valor médio da tensão de rotura do betão á tração simples;

D_{cl} – coeficiente de difusão dos cloretos (ou coeficiente de penetração aos cloretos);

$K_{oxigénio}$ – é o coeficiente de permeabilidade ao ar do betão.

A vida útil pretendida para o edifício do Terminal de Cruzeiros, de classe estrutural 4, foi estabelecida como sendo de 75 anos. Assim, para o elemento em estudo admitiu-se esta mesma vida útil de projeto e uma espessura de recobrimento de 50 mm. Os agregados são provenientes de granitos, calcários ou seixos com dimensão máxima 15 mm e de granulometria o mais extensa possível [44].

Verificação da composição de misturas

Composição da Mistura | Etapa A.1 | Etapa A.2 | Etapa A.3 | Etapa A.4 | Etapa A.5 | Etapa A.6

Definição dos constituintes e da massa da mistura

Cimento

Tipo de cimento: CEM II/A-L

Quantidade (Kg/m3): 416

Considera-se a existência de constituintes adicionais minoritários isoladamente neste cimento?

Sim — Não

Definir Percentagens dos Constituintes Principais

Massa total da mistura inicial, D0 (Kg/m3): 611

Adições

	Tipo	Quantidade (Kg/m3)
1.	Pozolana natural calcinada, Q	44
2.	Calcário, L	151
3.		
4.		
5.		
6.		
7.		
8.		
9.		

Tipo principal	Notação do produto (tipo de cimento corrente)		Composição (percentagem em massa) – Constituintes principais: Clinquer K	Escória de alto forno S	Silica de fumo D	Pozolana natural P	Pozolana natural calcinada Q	Cinzas volantes Siliciosa V	Cinzas volantes Calcária W	Xisto cozido T	Calcário L	Calcário LL	Constituintes adicionais minoritários
CEM II	Cimento Portland de calcário	CEM II/A-L	80	0	0	0	0	0	0	0	20	0	0

Recomeçar — Seguinte

Figura 7.5 – Introdução dos dados sobre a composição do ligante na aplicação para verificação da mistura.

Verificação da composição de misturas

Composição da Mistura | Etapa A.1 | Etapa A.2 | Etapa A.3 | Etapa A.4 | Etapa A.5 | Etapa A.6

A.6 - Determinação de dosagem final de ligante e dos respectivos componentes

Mistura equivalente ao cimento: CEM II/B-M

Dosagem de ligante a considerar como equivalente ao cimento (DL em Kg/m3): 512

A mistura, a considerar como equivalente ao cimento escolhido, verificará a regulamentação caso apresente a composição e dosagem abaixo indicadas

Composição	Dosagem (Kg/m3)	Percentagem no total da composição (%)
Clinquer, K	332.8	65.0
Pozolana natural calcinada, Q	44.0	8.6
Calcário, L	135.2	26.4

Dosagem da mistura inicial que não puderam ser considerados como ligante (Kg/m3): 99

A dosagem de ligante a considerar corresponde ao somatório de todos os componentes (principais e minoritários), selecionados em A.2, cujas quantidades foram determinadas nas etapas A.1 e A.4 ou A.5.

Ajustar Composição — Aceitar

Figura 7.6 – Resultados da verificação da mistura pela aplicação.

7.4. APLICAÇÃO DAS MEDIDAS PRESCRITIVAS DA ESPECIFICAÇÃO LNEC E 464

Apesar do elemento em estudo já se encontrar executado, apresenta-se uma análise através das medidas prescritivas da Especificação LNEC E 464 de forma a comparar estas com as características existentes no elemento.

A metodologia prescritiva desta especificação apenas é aplicável a estruturas cuja vida útil pretendida seja de 50 ou 100 anos. Estabelecida a vida útil de projeto em 75 anos, situada entre os dois valores abrangidos pela especificação, isto implica que sejam aplicadas as disposições prescritivas correspondentes a 100 anos, quer para o betão quer ao recobrimento das armaduras.

Introduzindo os parâmetros relativos à vida útil, classe de exposição, tipo de cimento e diâmetro máximo do agregado na aplicação de cálculo, definem-se as medidas prescritivas aplicáveis à estrutura segundo a Especificação LNEC E 464, conforme ilustra a Figura 7.7.

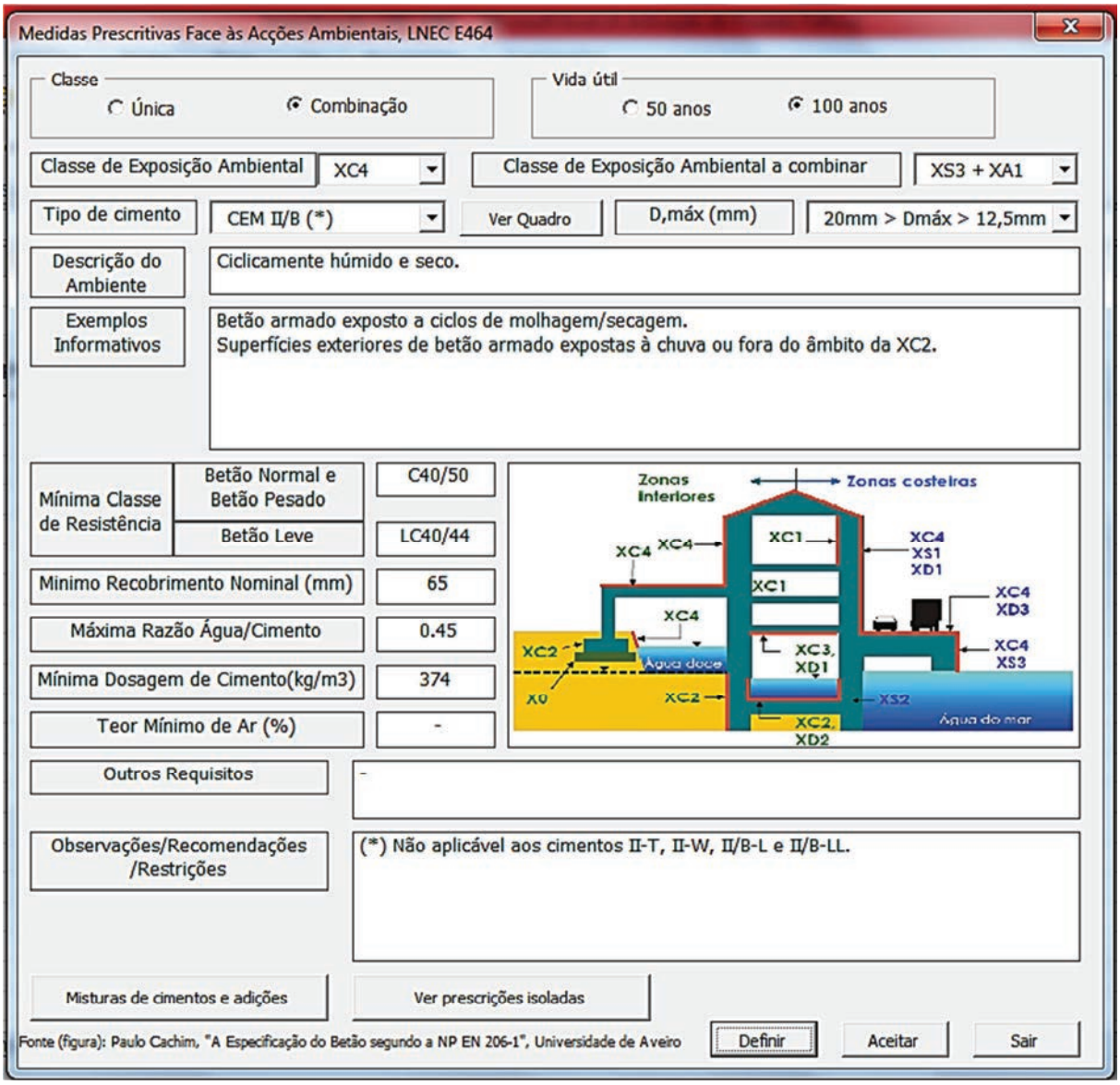


Figura 7.7 – Medidas prescritivas aplicáveis ao elemento em estudo.

A par das medidas prescritivas, a aplicação apresenta a descrição do ambiente e os exemplos informativos que permitem confirmar a combinação de classes de exposição estabelecida. Entretanto, estando o elemento sujeito a uma combinação de classes de exposição e este primeiro resultado da aplicação apresentar somente as medidas prescritivas mais condicionantes na combinação, surge o interesse em analisar as prescrições isoladamente para cada uma das classes e assim verificar qual a classe que condiciona mais a definição das medidas prescritivas. Esta análise individualizada para cada uma das classes de exposição presentes na combinação é ilustrada na Figura 7.8, de acordo com os resultados da aplicação de cálculo.

Observa-se que a classe XS3 é a que apresenta valores mais condicionantes para o mínimo recobrimento nominal e a máxima razão água/ligante, sendo a dosagem mínima de ligante condicionada tanto por esta classe como pela classe XA1 (ataque da água do mar). Já a mínima classe de resistência do betão é condicionada pela classe XA1, exigindo esta um betão mais resistente. Condicionando a classe XS3 três parâmetros diferentes da estrutura, estabelece-se esta como a classe mais desfavorável para a combinação, em detrimento da XA1 que apenas condiciona dois parâmetros.

Prescrições de cada classe da combinação

Classes de Exposição	XC4	XS3	XA1	Condicionantes
Mínimo recobrimento nominal (mm)	50	65	-	65
Máxima razão água/ligante	0.55	0.45	0.50	0.45
Mínima dosagem de cimento, C (Kg/m3)	330	374	374	374.0
Mínima classe de resistência	C30/37 ; LC30/33	C35/45 ; LC35/38	C40/50 ; LC40/44	C40/50 ; LC40/44
Teor mínimo de ar (%)	-	-	-	0
Observações	-	-	-	Ver notas individuais das classes.

Classe de Exposição Condicionante	XS3

OK

Figura 7.8 – Medidas prescritivas aplicáveis ao elemento em estudo para todos os tipos de cimentos do Quadro 1 da NP EN 197-1.

Analisando os resultados apresentados pela aplicação verifica-se que para a metodologia prescritiva:

- a composição satisfaz a mínima classe de resistência exigida, apresentando uma *fcm* maior que o estabelecido pela Especificação (48 MPa para o C35/45) tanto nos resultados de laboratório como em obra;
- o mínimo recobrimento nominal não é verificado, apresentando o elemento um recobrimento menor que o estabelecido (50 mm < 65 mm);
- a razão água/cimento máxima prescrita é cumprida (0,36 < 0,45);
- a dosagem de cimento mínima é verificada por completo, apresentando a composição um valor bastante superior a esse mínimo (512 > 374 kg/m^3).

A composição utilizada verifica a generalidade das medidas prescritas, sendo o recobrimento adotado o único parâmetro que não verifica essas medidas, conforme demonstra o Quadro 7.3.

Quadro 7.3 – Quadro comparativo entre valores prescritos e valores reais.

Parâmetro	Valores prescritos	Valores existentes na composição
Recobrimento nominal (mm)	55	50
Razão água/cimento	0,45	0,36
Dosagem de cimento (kg/m^3)	374	512
f_{cm} (MPa)	48(1)	75(2)

Notas:

(1) f_{cm} para o betão da classe de resistência C40/50 prescrita na Especificação;
(2) Valor referente ao ensaio do betão em obra aos 28 dias.

No caso do recobrimento nominal aplica-se entretanto o disposto no Anexo B da Especificação LNEC E 464 sobre a redução do mínimo recobrimento a exigir para estruturas de betão armado e pré-esforçado. Este anexo expõe que os recobrimentos em cada classe de exposição podem ser reduzidos se as armaduras de aço, prontas a serem colocadas nas cofragens, forem previamente revestidas com uma pintura de proteção ou se a peça estrutural de betão for laminar, sendo esta redução de 5 mm para ambos os casos. Verificando-se estas duas situações no elemento em estudo é possível assim aplicar uma redução de 10 mm ao valor mínimo estabelecido, passando este a ser de 55 mm.

Observa-se que mesmo com a aplicação das reduções, o mínimo recobrimento nominal prescrito pela Especificação é ainda superior ao estabelecido para a estrutura para 100 anos de vida útil. Na impossibilidade de definir o valor do recobrimento nominal mínimo para o valor específico da vida útil pretendida, 75 anos, este deveria satisfazer os 55 mm definidos para os 100 anos, ou seja, o recobrimento adotado teria necessariamente de ser aumentado, caso a metodologia de abordagem fosse esta.

A razão água/ligante máxima é verificada, demonstrando os benefícios de se considerar parte do fíler calcário e do metacaulino como ligante (aumento da dosagem em relação à água da composição).

Utilizou-se também outra funcionalidade do programa para verificar as prescrições que seriam estabelecidas para a estrutura de acordo com todos os tipos de cimentos do Quadro 1 da NP EN 197-1 [4], realçando-se o tipo de cimento efetivamente escolhido. Estas prescrições são apresentadas na Figura 7.9.

Observa-se desta última análise que o tipo de cimento definido para a composição, o CEM II/B-M (Q-L) 52,5R, pertence ao grupo que apresenta medidas prescritivas menos severas de entre todos os tipos de cimentos aplicáveis. Caso contrário ao observado para o cimento tipo CEM II/A-L. Se fosse seguido a metodologia prescritiva e apenas este fosse considerado como ligante no betão, as medidas que tinham de ser adotadas seriam mais restritivas.

Assim mais uma vez verifica-se o benefício que a consideração de um ligante constituído por cimento e adições traz para a composição.

Medidas prescritivas por tipo de cimento

Condições ambientais	Classe de exposição	XC4	Classe de exposição a combinar	XS3 + XA1	Definir	Aceitar
Betão sujeito a uma combinação de classes de exposição ambiental.	Vida útil	100 anos	D,máx	20mm > Dmáx > 12,5mm	Tipo de cimento	CEM II/B-M

Tipos principais	Notação dos 27 produtos (tipos de cimentos correntes)		Mínimo recobrimento nominal (mm)	Máxima razão água/cimento	Mínima dosagem de cimento, C (Kg/m3)	Mínima classe de resistência	Teor mínimo de ar (%)	Outros requisitos
CEM I	Cimento Portland	CEM I	65	0,40	418	C50/60 ; LC50/55	-	-
CEM II	Cimento Portland de escória	CEM II/A-S	65	0,40	418	C50/60 ; LC50/55	-	-
		CEM II/B-S	65	0,45	374	C40/50 ; LC40/44	-	-
	Cimento Portland de sílica de fumo	CEM II/A-D	65	0,45	374	C40/50 ; LC40/44	-	-
	Cimento Portland de pozolana	CEM II/A-P	65	0,40	418	C50/60 ; LC50/55	-	-
		CEM II/B-P	65	0,45	374	C40/50 ; LC40/44	-	-
		CEM II/A-Q	65	0,40	418	C50/60 ; LC50/55	-	-
		CEM II/B-Q	65	0,45	374	C40/50 ; LC40/44	-	-
	Cimento Portland de cinza volante	CEM II/A-V	65	0,40	418	C50/60 ; LC50/55	-	-
		CEM II/B-V	65	0,45	374	C40/50 ; LC40/44	-	-
		CEM II/A-W	Não se aplica.	Não se aplica.	Não se aplica.	Não se aplica.	Não se aplica.	Não se aplica.
		CEM II/B-W	Não se aplica.	Não se aplica.	Não se aplica.	Não se aplica.	Não se aplica.	Não se aplica.
	Cimento Portland de xisto cozido	CEM II/A-T	Não se aplica.	Não se aplica.	Não se aplica.	Não se aplica.	Não se aplica.	Não se aplica.
		CEM II/B-T	Não se aplica.	Não se aplica.	Não se aplica.	Não se aplica.	Não se aplica.	Não se aplica.
	Cimento Portland de calcário	CEM II/A-L	65	0,40	418	C50/60 ; LC50/55	-	-
		CEM II/B-L	Não se aplica.	Não se aplica.	0	Não se aplica.	Não se aplica.	Não se aplica.
		CEM II/A-LL	65	0,40	418	C50/60 ; LC50/55	-	-
		CEM II/B-LL	Não se aplica.	Não se aplica.	0	Não se aplica.	Não se aplica.	Não se aplica.
	Cimento Portland composto	CEM II/A-M	65	0,40	418	C50/60 ; LC50/55	-	-
		CEM II/B-M	65	0,45	374	C40/50 ; LC40/44	-	-
CEM III	Cimento de alto forno	CEM III/A	65	0,45	374	C40/50 ; LC40/44	-	-
		CEM III/B	65	0,45	374	C40/50 ; LC40/44	-	-
		CEM III/C	Não se aplica.	Não se aplica.	Não se aplica.	Não se aplica.	Não se aplica.	Não se aplica.
CEM IV	Cimento pozolânico	CEM IV/A	65	0,45	374	C40/50 ; LC40/44	-	-
		CEM IV/B	65	0,45	374	C40/50 ; LC40/44	-	-
CEM V	Cimento composto	CEM V/A	65	0,45	374	C40/50 ; LC40/44	-	-
		CEM V/B	65	0,45	374	C40/50 ; LC40/44	-	-

Notas -

Figura 7.9 – Medidas prescritivas aplicáveis ao elemento em estudo para todos os tipos de cimentos do Quadro 1 da NP EN 197-1.

7.5. APLICAÇÃO DAS MEDIDAS BASEADAS NO DESEMPENHO DA ESPECIFICAÇÃO LNEC E 465

A análise que melhor se adequa ao elemento em causa é a resultante da metodologia baseada em propriedades do desempenho da Especificação LNEC E 465. Isto deve-se ao facto da classe de exposição condicionante possibilitar essa análise (classe XS3) e da vida útil pretendida ser de 75 anos. Outra característica desta metodologia que se enquadra bem no caso em estudo é que esta não impõe limites à composição do betão, trabalhando com características do desempenho da composição que se pretende utilizar. Assim, quando se pretende otimizar uma composição esta metodologia é a que melhor se adequa, uma vez que que dá liberdade quanto à escolha dos constituintes e dosagens.

No presente caso, a aplicação da metodologia foi mais uma vez feita com recurso à aplicação desenvolvida para o efeito. Através da definição das condições iniciais da estrutura, a aplicação apresenta as propriedades do desempenho que permitem satisfazer a vida útil de 75 anos.

A Figura 7.10 ilustra a definição na aplicação das características da estrutura.

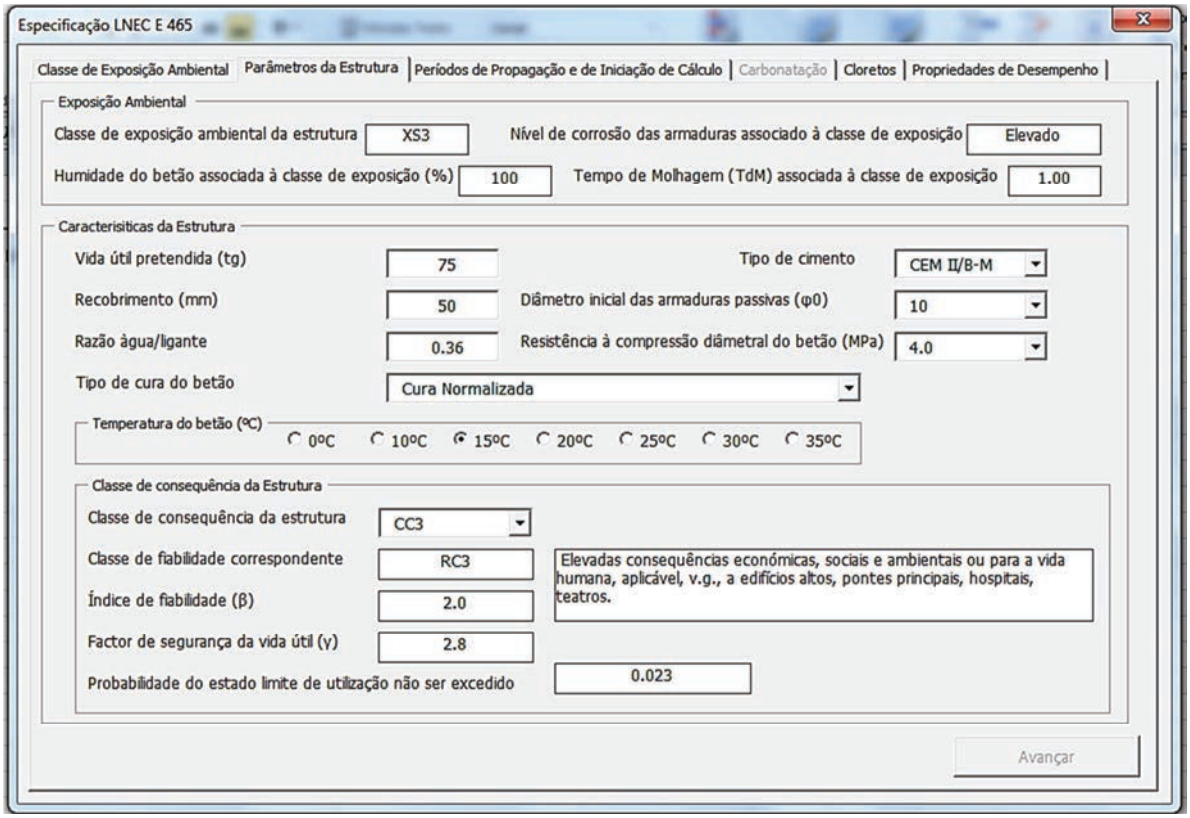


Figura 7.10 – Definição dos parâmetros na aplicação relativa à Especificação LNEC E 465.

Para as condições iniciais considerou-se, além das estabelecidas no ponto 7.3, que o diâmetro (mínimo) das armaduras passivas da estrutura é de 10 mm, que a classe de consequência seria a CC3 (consequências elevadas), que a resistência à compressão diametral do betão seria igual a 4,0 MPa e que a cura do betão se processaria da forma normalizada. Ainda foi admitida a temperatura do betão como sendo 15ºC.

O diâmetro das armaduras verifica-se da aplicação da metodologia, para a classe de exposição em causa, que não influencia em grande parte o resultado das propriedades de desempenho pois o período de propagação estimado é reduzido. De facto, verificou-se que mesmo com o aumento do diâmetro para valores superiores tal não alteraria de forma notável os resultados da análise. Assim, mesmo que a estrutura apresente diâmetros maiores, tal não deverá influenciar em muito o resultado do programa.

A classe de consequência definida, resulta da analogia do elemento em estudo com o edifício do Terminal de Cruzeiros. Considerou-se que o eventual colapso deste edifício corresponderia a elevados danos tanto a nível económico como social, ambiental ou para a vida humana, devido à sua envergadura e função. Sendo a composição do betão do elemento um modelo de comportamento do betão do edifício, admitiu-se para este a mesma classe de consequência do edifício.

A cura normalizada foi admitida por não haver informação acerca da aplicação de cofragem de permeabilidade controlada com cura de 3 dias, no elemento em estudo.

Por fim a resistência por compressão diametral do betão, como para a classe de exposição do elemento, a Especificação estabelece apenas dois valores para este parâmetro, 3 e 4 MPa respetivamente, considerou-se que o elemento em função dos resultados de ensaios realizados corresponderia ao maior valor deste parâmetro.

7.5.1. ESTIMATIVA DAS PROPRIEDADES DO DESEMPENHO COM BASE NAS CARACTERÍSTICAS DA ESTRUTURA

Os resultados calculados pela aplicação (ver Figura 7.11) indicam, para as características definidas inicialmente, uma vida útil do elemento bastante superior à vida útil pretendida, função de um período de iniciação de cálculo bastante elevado (estimado em 208 anos). A mesma aplicação estima que o coeficiente de difusão dos cloretos deve ser igual ou inferior a $3{,}245*10^{-12}$ m/s para que a vida útil seja satisfeita.

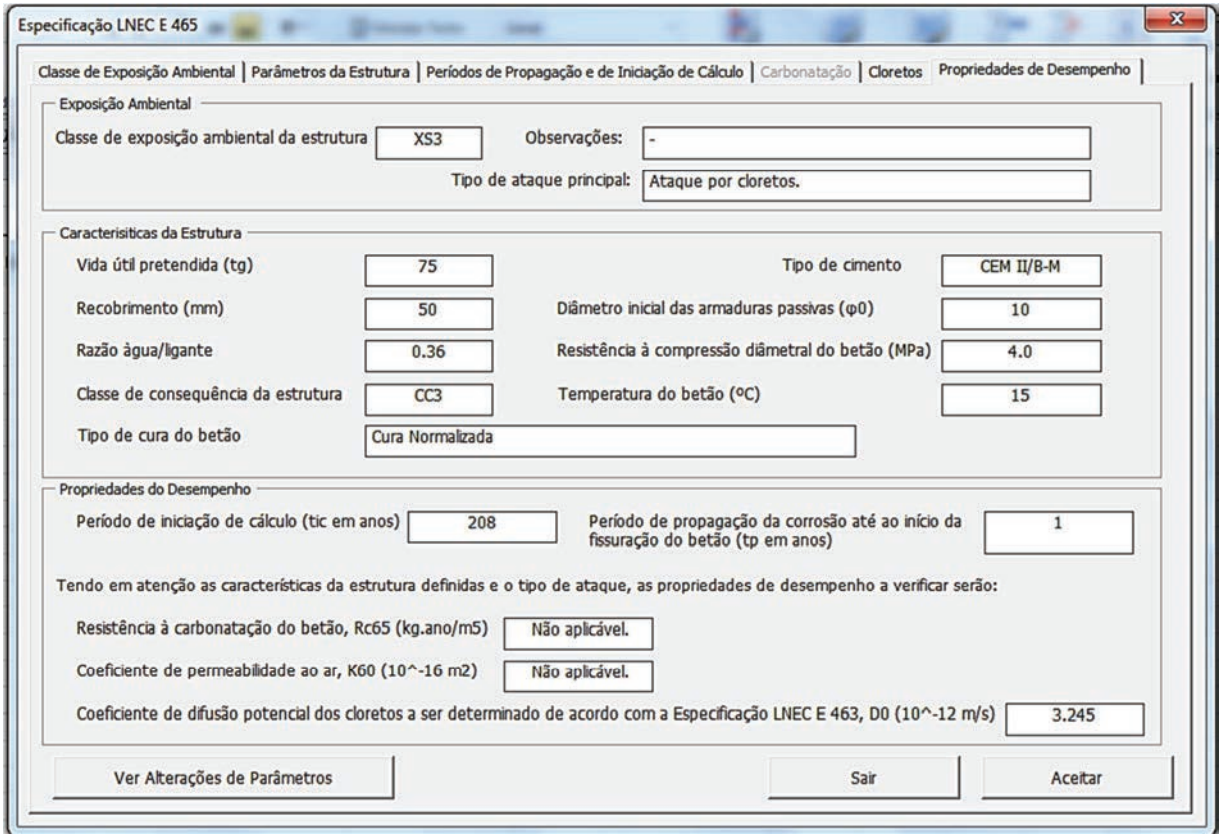


Figura 7.11 – Resultados das propriedades do desempenho para a classe XS3 na aplicação utilizada.

Os valores medidos em laboratório e em obra para este coeficiente foram de $3{,}54*10^{-12}$ m/s e de $2{,}88*10^{-12}$ m/s, respetivamente. Assim verifica-se que para o ensaio em obra o valor determinado cumpre o valor limite estimado enquanto o determinado em laboratório ultrapassa esse limite. Isto vai de acordo com a observação feita pelos técnicos do LABEST/FEUP de que há evidências de um comportamento ligeiramente melhorado no betão produzido industrialmente, tanto em termos de resistência como nos indicadores de durabilidade. No entanto, é de referir que a variação nos resultados dos ensaios com os provetes colhidos em obra foi maior.

As Figuras 7.12 a 7.14 apresentam as variações no coeficiente de difusão aos cloretos resultantes da alteração de alguns parâmetros da composição, nomeadamente, o tipo de cimento, a espessura de recobrimento e a razão água/ligante, conforme calculados pela aplicação. A análise dos gráficos das Figuras 7.13 e 7.14 permite observar, de forma clara, a variação inversa do coeficiente de difusão dos cloretos com a razão água/ligante e o recobrimento. No caso de aumento da razão água/ligante na composição o coeficiente de difusão é mais exigente, isto é, apresenta valores menores, enquanto no

caso de aumento apenas da espessura do recobrimento este coeficiente é menos exigente, apresentando valores maiores.

Na Figura 7.12 observa-se que a utilização dos cimentos tipo CEM I e CEM II é mais exigente em comparação com os tipos CEM III, CEM IV e CEM V, apresentando estes últimos valores maiores que o dobro dos primeiros.

De notar que o uso desta metodologia implica um controlo contínuo das propriedades de desempenho, conforme o estabelecido no projeto da obra.

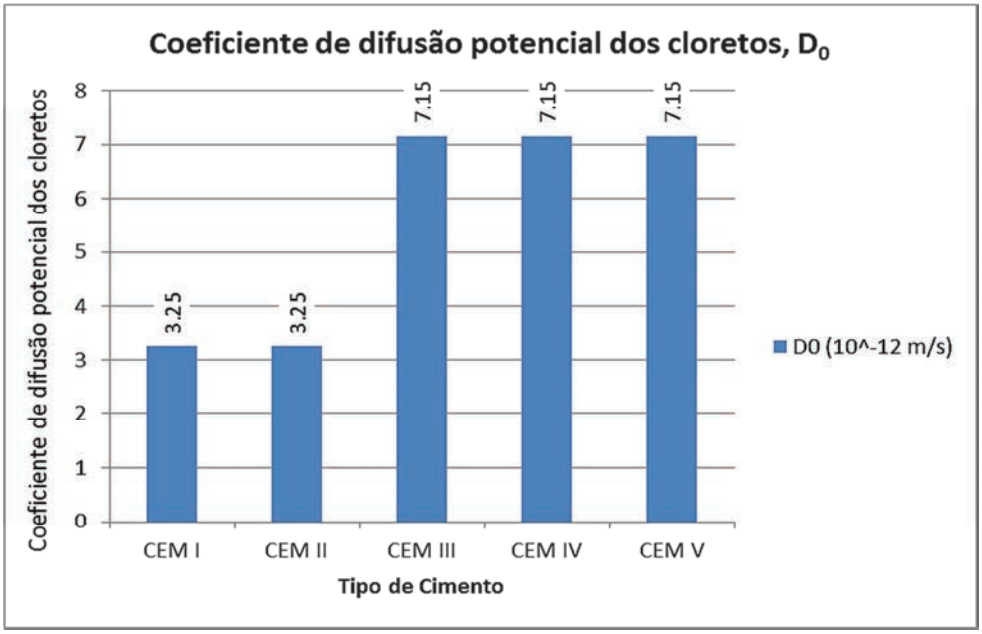


Figura 7.12 – Variações do coeficiente de difusão potencial dos cloretos com o tipo de cimento.

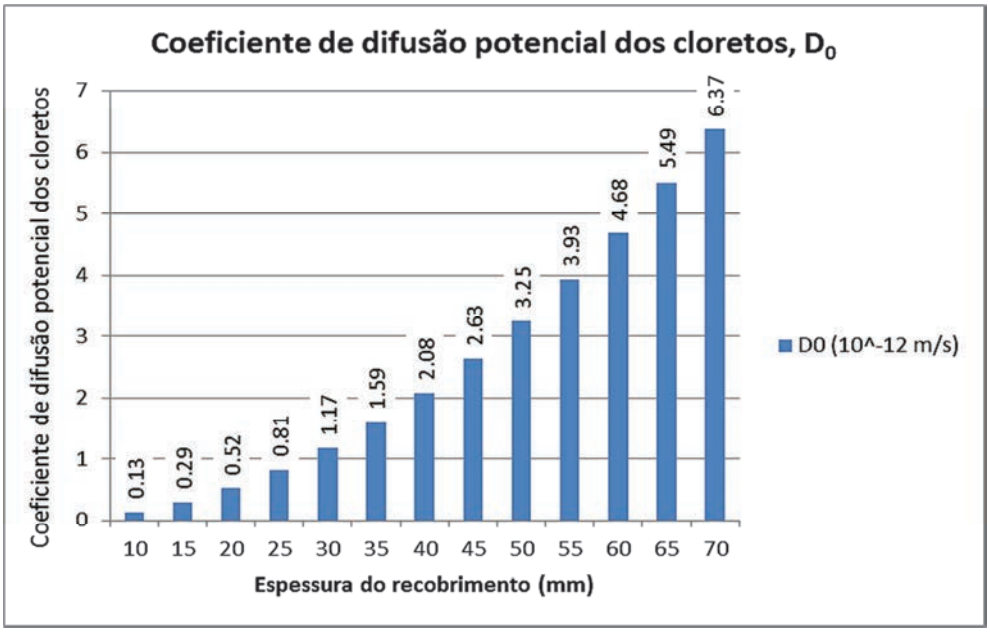


Figura 7.13 – Variações do coeficiente de difusão potencial dos cloretos com a espessura do recobrimento.

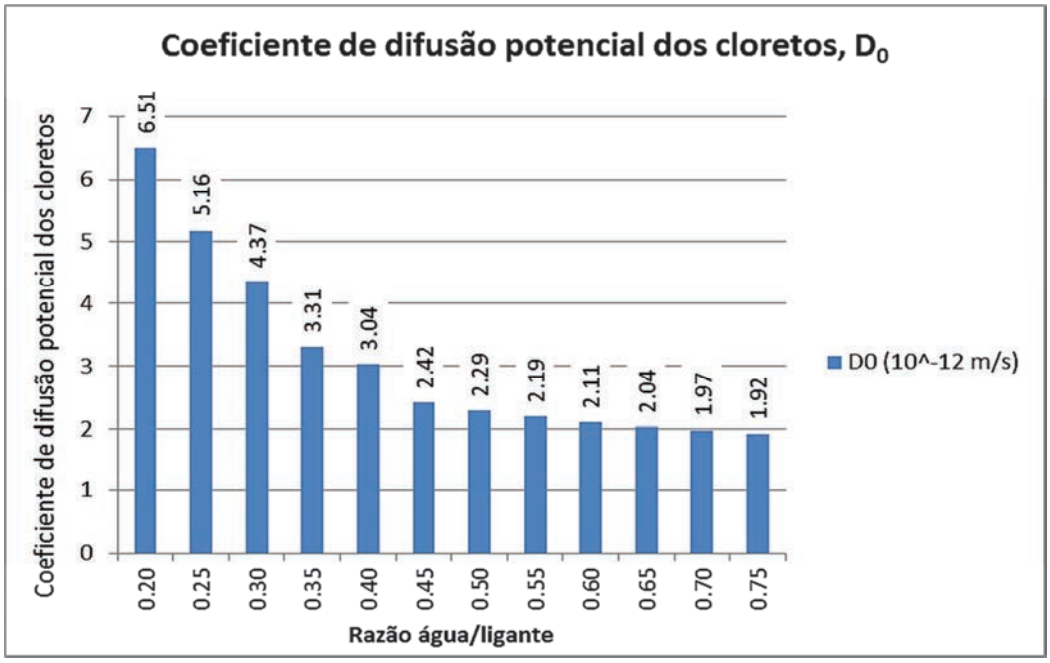


Figura 7.14 – Variações do coeficiente de difusão potencial dos cloretos com a razão água/ligante.

Apesar da Especificação LNEC E 464 estabelecer que a recorrência aos métodos de especificação do betão baseados no desempenho relacionado com a durabilidade da Especificação LNEC E 465, seja aplicável à classe de exposição ambiental mais desfavorável no caso de haver combinação, dispondo-se de resultados de ensaios relativos ao coeficiente de permeabilidade ao ar do betão, analisa-se também a composição para esta propriedade de desempenho, servindo assim como uma medida de segurança ambiental adicional.

Então, para as características da estrutura definidas inicialmente, alterando-se a classe de exposição ambiental para a XC4 (região húmida) e a resistência à compressão diametral do betão para os 2,5 MPa estimam-se as propriedades de desempenho aplicáveis a esta classe. Os resultados do procedimento de cálculo apresentam-se na Figura 7.15.

Do cálculo efetuado obtêm-se os valores estimados para as duas propriedades de desempenho que podem ser controladas quando a estrutura esta sujeita ao ataque por dióxido de carbono, resultantes das duas metodologias de cálculo estabelecidas na Especificação LNEC E 465 para a carbonatação.

A resistência à carbonatação não é verificada por não haver disponibilidade de valores relativos ao ensaio dessa propriedade tanto em obra como em laboratório. Assim a primeira metodologia não é verificada, utilizando-se somente o coeficiente de permeabilidade ao ar, resultante da aplicação da segunda metodologia como fator de verificação.

Dos ensaios realizados em obra, para os 28 dias, o coeficiente de permeabilidade ao ar obtido foi de $0{,}0703*10^{-16}$ m^2. Comparativamente o valor para este mesmo coeficiente estimado de modo a que a vida útil pretendida fosse satisfeita foi de $1{,}74*10^{-16}$ m^2.

Estabelecendo-se como critério de conformidade para as propriedades de desempenho que os valores medidos devem satisfazer, pelo menos, o requerido pelos modelos de cálculo, mais concretamente para o coeficiente de permeabilidade ao ar que os valores medidos devem ser iguais ou inferiores ao valor estimado, conclui-se que nas condições iniciais definidas para a estrutura, esta verifica a conformidade com o modelo de estimativa da propriedade de desempenho analisada.

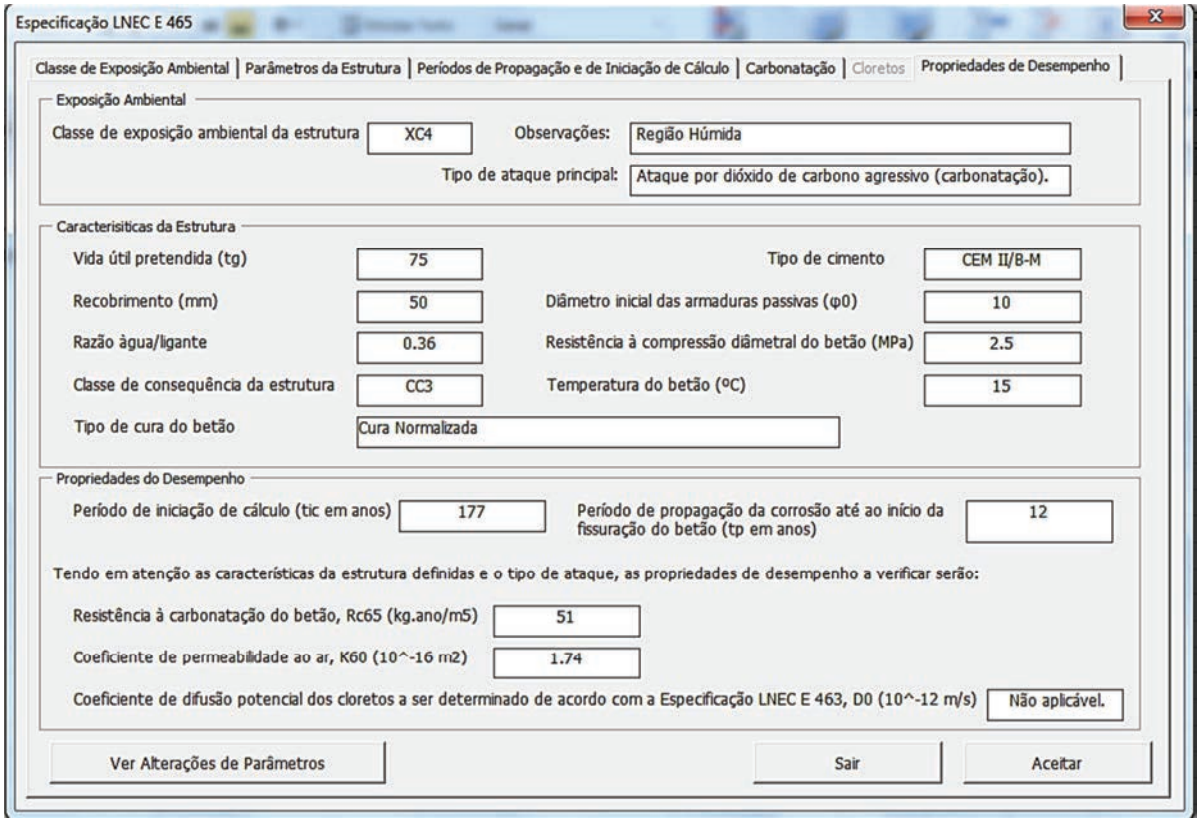


Figura 7.15 – Resultados d as propriedades do desempenho para a classe XC4 no programa utilizado.

Em semelhança à análise efetuada para o coeficiente de difusão dos cloretos na classe XS3, as Figuras 7.16 a 7.18 ilustram, de forma gráfica, a variação do coeficiente de permeabilidade ao ar com os tipos de cimentos, espessura de recobrimento e razão água/ligante, respetivamente.

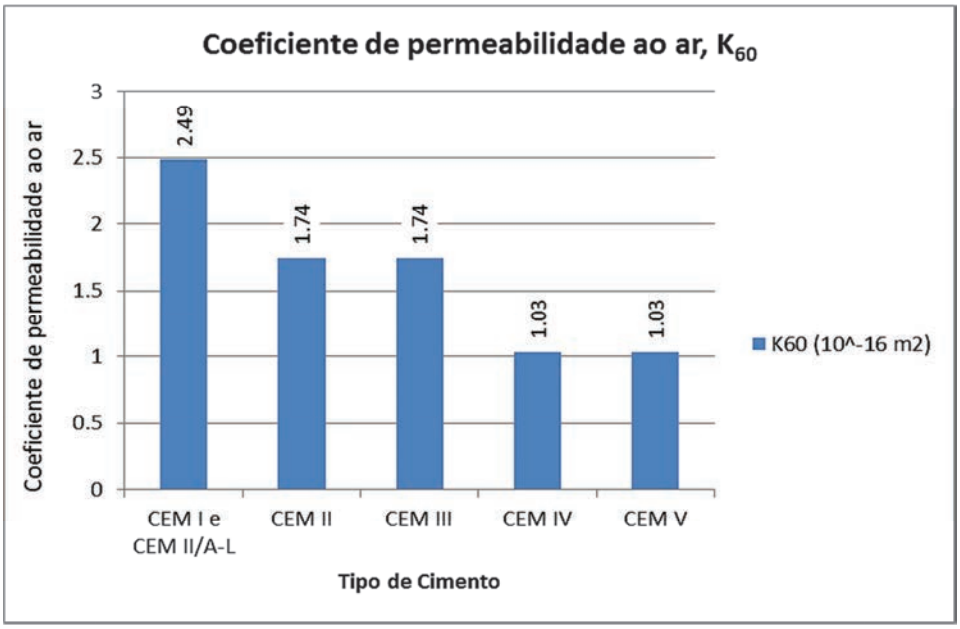


Figura 7.16 – Variações do coeficiente de permeabilidade ao ar com o tipo de cimento.

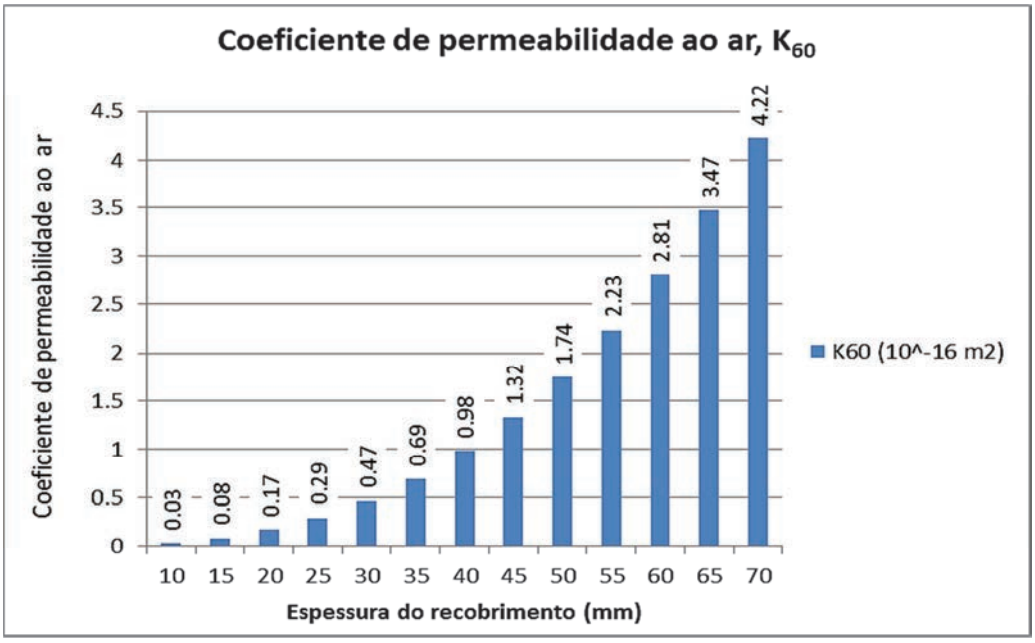


Figura 7.17 – Variações do coeficiente de permeabilidade ao ar com a espessura do recobrimento.

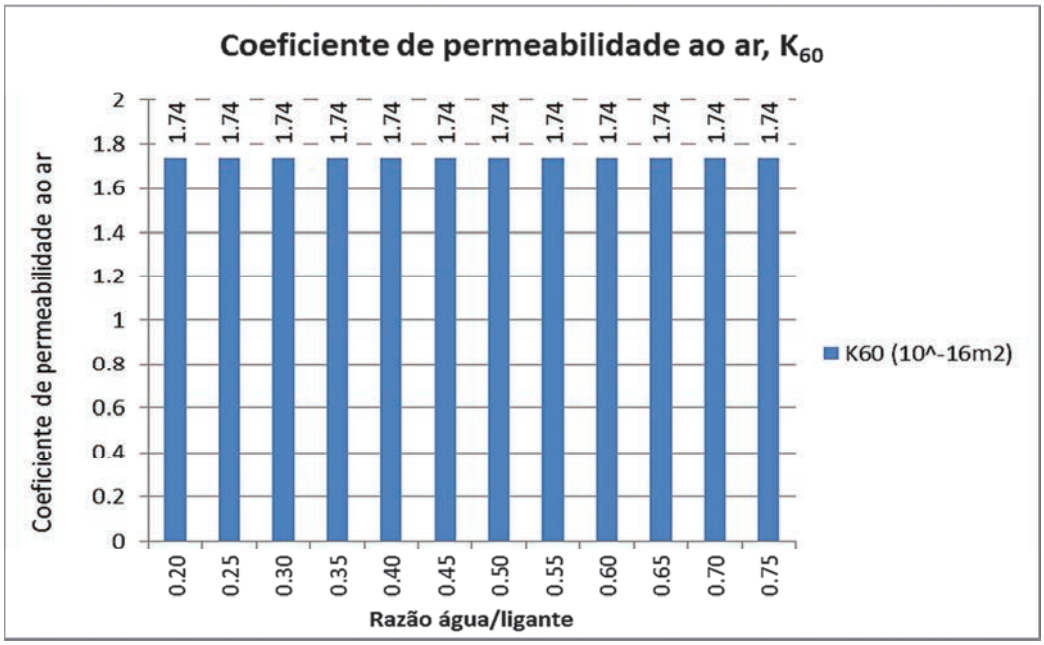


Figura 7.18 – Variações do coeficiente de permeabilidade ao ar com a razão água/ligante.

A análise da Figura 7.16 permite observar que o tipo de cimento selecionado influência o coeficiente de permeabilidade, sendo mais limitado nos cimentos tipo CEM IV e CEM V e menos restritivo para cimentos tipo CEM I e CEM II/A-L. O cimento definido para a estrutura (CEM II/B-M (Q-L) 52,5 R), a par dos cimentos tipo III, situa-se numa situação intermédia a estes casos.

Semelhante ao coeficiente de difusão dos cloretos, o coeficiente de permeabilidade ao ar também é mais limitado para espessuras de recobrimento baixas, aumentando para limites maiores com o aumento dessa espessura, conforme ilustra a Figura 7.17.

A variação da razão água/ligante, apresentada na Figura 7.18, segundo o modelo de cálculo adotado não influi na determinação do coeficiente de permeabilidade ao ar.

Verifica-se assim que tanto para as propriedades de desempenho de consideração da ação dos cloretos como para a carbonatação, os resultados dos ensaios satisfazem os limites estimados, permitindo garantir a vida útil pretendida.

7.5.2. ESTIMATIVA DA VIDA ÚTIL DE PROJETO COM BASE NAS PROPRIEDADES DE DESEMPENHO ENSAIADAS

Com recurso à funcionalidade da aplicação que utiliza o processo inverso à metodologia utilizada na secção anterior, estimou-se a vida útil que é possível esperar da estrutura com os resultados dos ensaios obtidos. As características da estrutura introduzidas na aplicação são as mesmas discutidas na secção 7.5.1, sendo a única diferença que para este caso foi introduzido na aplicação o valor do coeficiente de difusão dos cloretos medido em obra, e obteve-se como resultado a estimativa da vida útil da estrutura.

Para a carbonatação visto os resultados dos ensaios cumprirem com bastante margem os resultados da análise anterior, esta não foi considerada, realizando-se antes a análise para a ação dos cloretos por esta ser mais condicionante. Assim, esta funcionalidade apenas foi utilizada para a classe condicionante da combinação, classe XS3, por esta apresentar-se como a classe mais desfavorável.

Os resultados da metodologia permitem estimar, com base nos resultados dos ensaios, a vida útil da estrutura como sendo de 98 anos, superando assim a vida útil pretendida de 75 anos. Os resultados do cálculo da aplicação e as condições iniciais definidas são ilustrados na Figura 7.19.

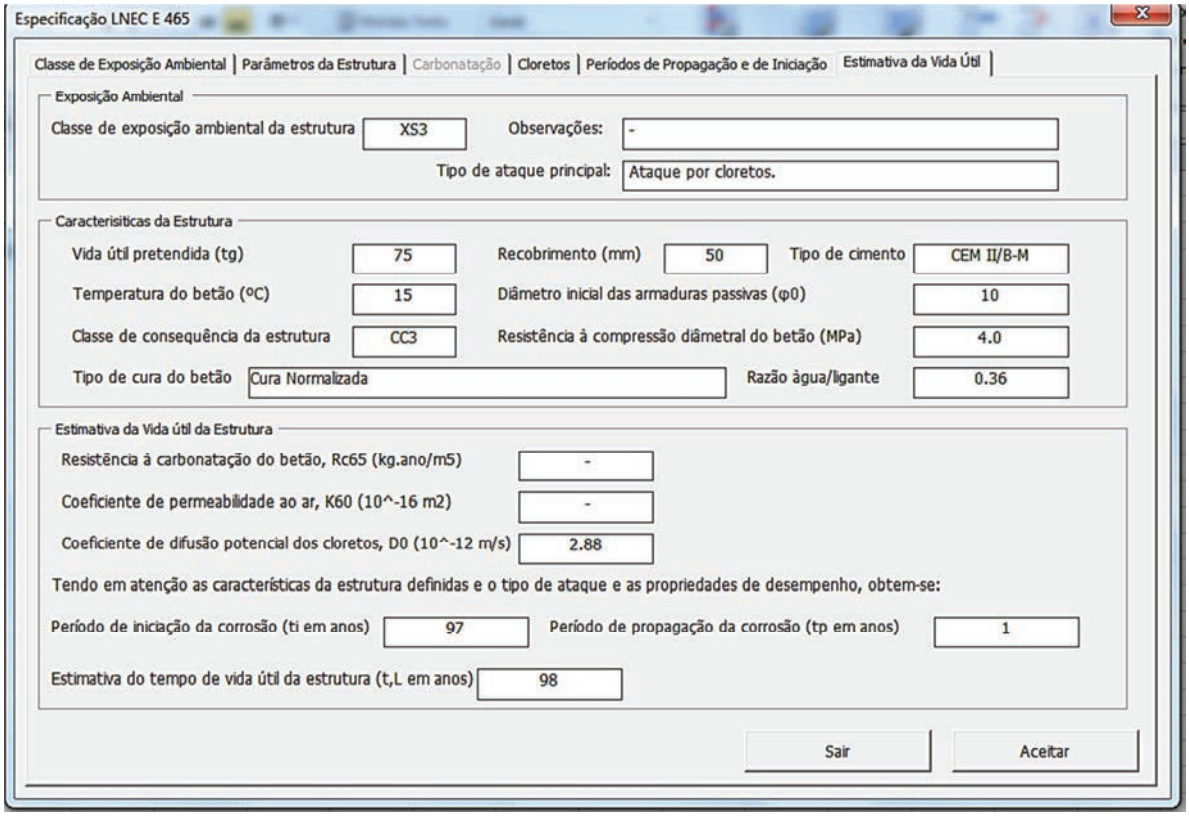


Figura 7.19 – Vida útil estimada para a estrutura com base nas propriedades do desempenho ensaiadas.

7.6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Conclui-se com a análise a este caso prático que:

- De um modo geral o elemento realizado com a composição otimizada descrita na secção 7.3 cumpre os requisitos relacionados com condições de exposição ambiental;
- Para a metodologia prescritiva verifica-se que mesmo sendo a estrutura concebida para 75 anos de vida útil, a composição cumpre satisfatoriamente as prescrições para os 100 anos de vida útil, mesmo tratando-se de um caso de combinações de classes de exposição;
- Na metodologia baseada no desempenho, as propriedades do desempenho ensaiadas verificaram os limites estimados tanto para ação dos cloretos como para a carbonatação. A vida útil estimada com base na propriedade do desempenho mais desfavorável, é superior à vida útil pretendida;
- Verificou-se que a consideração de uma mistura de cimento e adições (CEM II/A-L, fíler calcário e metacaulino equivalente ao CEM II/B-M (Q-L) 52,5 R) é benéfica para a estrutura. Assim mesmo com as limitações relativamente aos tipos de cimento produzidos em Portugal e outras razões de ordem técnica que conduziram à escolha do cimento CEM II/A-L, a adição do fíler calcário e do metacaulino mostra-se vantajosa para a consideração das exigências em relação à durabilidade, para ambas as metodologias de cálculo analisadas;
- A correta definição das características da estrutura é de extrema importância, pois variações nestes parâmetros podem implicar alterações profundas nos resultados das metodologias, principalmente na baseada em propriedades do desempenho;
- Nos casos em que a vida útil seja diferente dos 50 e dos 100 anos é vantajoso utilizar a metodologia baseada no desempenho, nas classes onde tal é possível, pois esta, apesar de exigir maior controlo do processo, apresenta resultados próprios para o caso em estudo, ao contrário da metodologia prescritiva onde os casos devem ser sempre ajustados aos 50 ou 100 anos de vida útil;
- Em relação à aplicação de cálculo, observa-se que esta apresenta resultados calibrados, não variando muito da ordem de grandeza dos resultados ensaiados.

8
CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

8.1. Conclusões

A avaliação das condições de exposição ambiental no local em que a estrutura será inserida é um aspeto fundamental a ser considerado em fase de projeto. A não consideração do efeito das ações ambientais em fase de projeto pode gerar, posteriormente, dificuldades em obra e, eventualmente, no respetivo licenciamento.

Os agentes agressivos responsáveis pela deterioração das estruturas de betão armado são diversos, e provenientes de naturezas diferentes, como sejam, o dióxido de carbono, os cloretos, os sulfatos, os ciclos gelo/degelo, os ácidos, as bactérias, etc.

A atual classificação ambiental das estruturas por classes de exposição, conforme o tipo de agentes agressivos a que estas estarão sujeitas, adequa-se bem aos ambientes observados em Portugal, apresentando a legislação em vigor o enquadramento necessário; excluindo as classes que não são aplicáveis ao país (classes XF3 e XF4) e fornecendo explicações que permitem diferenciar as características que a mesma classe poderá apresentar em diferentes regiões (por exemplo, variações da humidade para a classe XC4 dependendo das regiões seca ou húmida).

A atual Norma NP EN 206-1 e as especificações que lhe estão associadas mostram concordância com algumas das principais Normas internacionais no que respeita à consideração dos condicionalismos ambientais no projeto de estruturas. Assim verifica-se a nível global que a resistência do betão deixou de ser o único parâmetro caraterizador deste material, sendo este também classificado de acordo com a sua capacidade de resistir aos agentes agressivos e garantir a vida útil de projeto pretendida.

Quanto às metodologias de abordagem que permitem lidar com a ação ambiental no projeto de betão armado e pré-esforçado, verifica-se que ambas apresentam vantagens e desvantagens na sua aplicação. A metodologia prescritiva, que limita os valores para a composição e as propriedades do betão, apresenta-se como sendo de mais fácil e direta aplicação no projeto mas apresenta limitações quanto à vida útil pretendida e poderá em alguns casos, se a vida útil diferenciar muito dos 50 ou 100 anos, conduzir a um sobredimensionamento da estrutura. As limitações quanto à influência de recobrimentos diferentes dos estabelecidos e de outras composições de betão são também aspetos restritivos da aplicabilidade desta metodologia, assim como o facto de na classe XS1, não considerar a influência da diminuição da ação agressiva com a distância à linha de costa e, na classe XS2, do aumento da ação agressiva com a profundidade.

A metodologia baseada na estimativa de propriedades do desempenho aparenta ser mais adequada, pois, em vez de apresentar valores generalistas para um grande grupo de casos, aplica-se à composição do betão do caso em estudo, permitindo uma avaliação rigorosa da influência dos parâmetros da composição do betão e do projeto. Contudo esta metodologia ainda não se aplica a todas as classes de

exposição, existindo assim casos onde a metodologia prescritiva será a única abordagem possível (p.e., ataque gelo/degelo).

Ainda em relação à metodologia baseada no desempenho, para que esta se mostre efetivamente útil para a prática, alguns dos parâmetros envolvidos têm ainda de ser discutidos, em certa medida, no que respeita a sua relação com o meio ambiente. Tendo em conta a redução da taxa de penetração de cloretos no betão ao longo do tempo e a dificuldade da sua quantificação, devem ser realizados mais ensaios de campo e de laboratório [20].

Outro aspeto a observar nesta metodologia é apontado por Costa, A. e Appleton, J. [54]: "Embora se verifique que a 2ª lei de Fick da difusão traduz com uma boa aproximação os perfis de cloretos no betão, para cada intervalo de tempo de exposição, não é possível utilizá-la na previsão da penetração a longo prazo, considerando coeficientes de difusão e teores de cloretos à superfície constantes no tempo. Para evitar cometer erros elevados na avaliação da penetração é essencial considerar a variação no tempo dos parâmetros atrás referidos".

Verificou-se que nos casos em que a vida útil seja diferente dos 50 e dos 100 anos é vantajoso utilizar a metodologia baseada no desempenho, nas classes onde tal é possível, pois esta, apesar de exigir maior controlo do processo, apresenta resultados próprios para o caso em estudo, ao contrário da metodologia prescritiva onde os casos devem ser sempre ajustados aos 50 ou 100 anos de vida útil.

Para ambas as metodologias foi possível sistematizar os procedimentos envolvidos em etapas de cálculo. A automatização destes procedimentos foi assim estabelecida, com base nessas sistematizações, em aplicações de cálculo. A correta calibração destas aplicações possibilitou a obtenção de resultados dos procedimentos, tanto por medidas prescritivas como por propriedades do desempenho, de forma mais rápida, apresentando precisão igual ou, por vezes superior, ao procedimento manual.

A junção de funcionalidades relativas às misturas de cimento e adições às aplicações de cálculo, fez com que estas aplicações desenvolvidas se tenham convertido numa ferramenta bastante abrangente no que respeita às metodologias de análise da durabilidade das estruturas, no que respeita aos condicionalismos ambientais.

Assim a automatização das regras apresentadas nas especificações mostrou-se vantajosa oferecendo um maior leque de dados e de possibilidades de análise ao especificador para que este consiga projetar a sua estrutura de forma a satisfazer a vida útil pretendida.

Por fim, observa-se que somente com a mudança de mentalidade dos responsáveis pela produção das estruturas de betão armado e pré-esforçado, nomeadamente, os proprietários, projetistas, construtores, trabalhadores e utilizadores, é que poderá ser melhorada a durabilidade das obras a serem construídas, de modo a não se reproduzir os erros do passado.

8.2. Desenvolvimentos Futuros

É possível observar que, no que respeita à análise da durabilidade das estruturas de forma a considerar os condicionalismos ambientais, esta é desenvolvida pela maior parte dos projetistas através da metodologia prescritiva, isto é, apresentando valores limites da composição e resistência do betão consoante a classe de exposição ambiental definida para a estrutura. O recurso à engenharia dos materiais, com desenvolvimento de novos modelos temporais de deterioração tem permitido um maior desenvolvimento das metodologias baseadas na estimativa de propriedades do desempenho, contrariando a simplificação e o conservadorismo verificados na metodologia prescritiva.

Um maior desenvolvimento da indústria dos materiais de construção, apresentando materiais inovadores que beneficiam a garantia da durabilidade, associada a novos modelos matemáticos e probabilísticos do comportamento dos fenómenos de deterioração do betão e da degradação das estruturas, permitem ponderar que no futuro a análise da durabilidade se procederá de uma forma mais individualizada para a estrutura e composição do betão em si, em vez da atribuição de valores generalistas. Esta é uma tendência patente nos trabalhos recentes relacionados com este tema, estando já disponível em alguns documentos normativos.

Destes documentos normativos destaca-se o Model Code 2010, pois continuando este com o legado dos Model Codes anteriores, deverá influenciar em grande medida as futuras regulamentações internacionais. Este documento apresenta diferentes possibilidades de consideração do ataque dos agentes agressivos (p.e., abordagem probabilística, abordagem por fator de segurança, etc.) disponibilizando assim as bases para o desenvolvimento de outras formas de análise por parte das restantes normas internacionais. Entretanto este desenvolvimento ainda não se aplica a todos os tipos de ataque, só sendo possível de generalização a todos com o progresso da engenharia dos materiais e avanço nos modelos matemáticos e probabilísticos do comportamento dos fenómenos de deterioração do betão.

Em termos da aplicação desenvolvida, o futuro poderá passar pela incorporação de novas funcionalidades, como a verificação da possibilidade de redução do recobrimento mínimo definida no Anexo B da Especificação LNEC E 464, a adaptação a novas metodologias a serem estabelecidas, assim como o acompanhamento de eventuais atualizações a serem introduzidas nas metodologias atuais.

BIBLIOGRAFIA

[1]. Decreto-Lei nº 301/2007, de 23 de Agosto, Diário da República, Lisboa.
[2]. NP EN 206-1 (2007), *Betão. Parte 1: Especificação, desempenho, produção e conformidade*. Instituto Português da Qualidade, Lisboa.
[3]. NP EN 206-1:2007/Emenda 1 (2008), *Betão. Parte 1: Especificação, desempenho, produção e conformidade*. Instituto Português da Qualidade, Lisboa.
[4]. NP EN 197-1 (2001), *Cimento. Parte 1: Composição, especificação e critérios de conformidade para cimentos correntes*. Instituto Português da Qualidade, Lisboa
[5]. NP EN 1990 (2009), *Eurocódigo 0 – Bases para o projecto de estruturas*. Instituto Português da Qualidade, Lisboa.
[6]. NP EN 1992-1-1 (2010), *Eurocódigo 2 - Projecto de estruturas de betão*. Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios. Instituto Português da Qualidade, Lisboa.
[7]. NP ENV 13670-1:2007/Emenda 1 (2008), *Execução de estruturas em betão*. Parte 1: Regras gerais. Instituto Português da Qualidade, Lisboa.
[8]. Especificação LNEC E 391 (1993), *Betões. Determinação da resistência à carbonatação*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.
[9]. Especificação LNEC E 392 (1993), *Betões. Determinação da permeabilidade ao oxigénio*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.
[10]. Especificação LNEC E 461 (2007), *Betões. Metodologia para prevenir reacções expansivas internas*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.
[11]. Especificação LNEC E 463 (2004), *Betões. Determinação do coeficiente de difusão dos cloretos por ensaio de migração em regime não estacionário.* Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.
[12]. Especificação LNEC E 464 (2007*), Betões. Metodologia prescritiva para uma vida útil de projecto de 50 e 100 anos face às acções ambientais*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.
[13]. Especificação LNEC E 465 (2007), *Betões. Metodologia para estimar as propriedades de desempenho do betão que permitem satisfazer a vida útil de projecto de estruturas de betão armado ou pré-esforçado sob as exposições ambientais XC e XS*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.
[14]. Especificação LNEC E 466 (2005), *Fíleres calcários para ligantes hidráulicos.* Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.
[15]. Especificação LNEC E 467 (2005), *Guia para utilização de agregados em betões de ligantes hidráulicos.* Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.
[16]. Especificação LNEC E 468 (2005), *Revestimentos por pintura para protecção do betão armado contra penetração de cloretos. Método de Ensaio e Requisitos.* Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.
[17]. Especificação LNEC E 469 (2006), *Espaçadores para armaduras de betão armado.* Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.
[18]. Especificação LNEC E 471 (2006), *Guia para utilização de agregados reciclados grossos em betões de ligantes hidráulicos.* Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.
[19]. Especificação LNEC E 477 (2007), *Guia para especificação do betão de ligantes hidráulicos conforme com a NP EN 206-1.* Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.
[20]. Marques, P.F., Costa A., Lanata F., *Service life of RC structures: chloride induced corrosion: prescriptive versus performance-based methodologies*, Materials and Structures volume 45, 2012, p. 277–296, SpringerLink.

[21]. Coutinho, J. S. (1998), *Melhoria da Durabilidade dos Betões por Tratamento da Cofragem*, Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.
[22]. Isaia, G.C., *Questões de ensino e pesquisa na durabilidade das estruturas do concreto*, e-Mat - Revista de Ciência e Tecnologia de Materiais de Construção Civil volume 2, Novembro 2005. p. 92-104.
[23]. Brandão, A.M. (1998), *Qualidade e Durabilidade das Estruturas de Concreto Armado - Aspectos Relativos ao Projecto*, Tese de Mestrado em Engenharia Civil, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
[24]. Grochoski, M., Helene P., *Sistemas de reparo para estruturas de concreto com corrosão de armaduras*, Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, 2008.
[25]. Salta, M.M., *Prevenção da corrosão no betão armado*, Seminário Materiais em Ambiente Marítimo, Outubro de 2007, Funchal.
[26]. Folic, R., *Durability design of concrete structures - Part 1: Analysis Fundamentals*, Architecture and Civil Engineering, 2009, Facta Universitatis. p. 1-18.
[27]. Mehta, P.K., Langley S.L., *Monolitic foundation: built to last a 1000 Years*, Concrete International volume 22, 1/07/2000, p. 27-32.
[28]. Bartholomew, M., *Design for Service Life, Bridge Birth Certificate & Concrete Structures Management Concepts*, AASHTO Bridge Sub-Committee Meeting T-9 – Technical Committee for Bridge Preservation, 2009, New Orleans.
[29]. Costa, A, *Durabilidade. Estruturas de betão*, Apontamentos da Cadeira de Reabilitação e Reforço Estrutural, Instituto Superior Técnico, Lisboa.
[30]. Baker, A.F., Structural investigations, In *Durability of Concrete Structures*, Capítulo 3, G.C. Mays, 1991
[31]. Helene, P. (1993), *Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado*, Tese (Livre Docência), Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo
[32]. Sato, N. (1998), *Análise da porosidade e de propriedades de transporte de massa em concretos*, Tese de Doutoramento, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.
[33]. Lança P., *Durabilidade de estruturas de betão armado*, Apontamentos da Cadeira de Materiais de Construção, Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Beja.
[34]. Amorim, A. (2010), *Durabilidade das estruturas de concreto armado*, Tese de especialização em construção civil, Escola de Engenharia, Universidade de Minas Gerais.
[35]. Ferreira, R. (2004), *Probability-based durability analysis of concrete structures in marine environment*, Tese de Doutoramento, Escola de Engenharia, Universidade do Minho.
[36]. Ferreira, R. (2000), *Avaliação de ensaios de durabilidade do betão*, Tese de Mestrado, Escola de Engenharia, Universidade do Minho.
[37]. Monteiro, I. (2010), *Modelação da evolução da carbonatação em elementos de betão armado*, Tese de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa.
[38]. Camelo, A., *Durabilidade e vida útil das estruturas hidráulicas de betão e de betão armado*, 1as Jornadas de Materiais na Construção, 2011, Porto.
[39]. Appleton, J., (2011), *Durabilidade de estruturas de betão armado e pré-esforçado*, Módulo 6, Folhas de Apoio às aulas, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa.
[40]. Cachim, P.,(2012), *A especificação do betão segundo a NP EN 206-1*, Seminári A Nova Regulamentação de Estruturas em Betão Armado, Aveiro.
[41]. Vilasboas, J. (2004), *Durabilidade das Edificações de Concreto Armado em Salvador: Uma Contribuição para a Implantação da NBR 6118:2003*, Tese de Mestrado, Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia.

[42]. APEB, *Guia para a utilização da norma NP EN 206-1*. A Especificação do betão. 2008. 4.ª Edição.
[43]. Torgal, F.P., S. Jalali, *A durabilidade do betão de acordo com a norma NP EN 206-1:2007*, magazine betão N.º 20, 2008, p. 45-53, APEB.
[44]. Rodrigues, L. (2009), *Projecto de Estruturas do Terminal de Cruzeiros de Leixões*, Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto.
[45]. Nunes, S., *Dimensionamento de composições de betão à medida das exigências de desempenho*, 1ª Jornadas Técnicas sobre Betão Pronto, 2012, Viseu.
[46]. ACI 318M-08, *Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary*, American Concrete Society. 2008.
[47]. NBR 6118 (2003), *Projecto de Estruturas de Concreto – Procedimento*, Associação Brasileira de Normas Técnicas.
[48]. fib (2010) Bulletins 55 e 56. Model Code 2010 - First complete draft, Volume 1 e 2, Lausanne, Suíça.
[49]. DuraCrete (1999), *Models for Environmental Actions on Concrete Structures*, The European Union – Brite EuRam III, Project No. BE95-1347, *Probabilistic performance based durability design of concrete structures*, N.º R3, Março 1999.
[50]. Kulkarni, V., *Exposure classes for designing durable concrete*, The Indian Concrete Journal, Março 2009, p. 23-43.
[51]. Duarte, J., Pato, J., *Condicionantes de projecto impostas pela exposição ambiental das estruturas de betão*, Encontro Nacional Betão Estrutural BE2010, Novembro de 2010, Lisboa.
[52]. Especificação LNEC E 415 (1993), Inertes para argamassas e betões. Determinação da reactividade potencial com os álcalis. Análise petrográfica. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.
[53]. Especificação LNEC E 462 (2004), *Cimentos. Resistência dos cimentos ao ataque por sulfatos*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.
[54]. Costa, A., Appleton, J., *Análise da Penetração de Cloretos em Estruturas de Betão Armado Expostas ao Ambiente Marítimo*, Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas, N.º 46, 1999, p. 3-13, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.
[55]. Sampaio, J, Sousa Coutinho, J. e Sampaio, M.N., *Melhoria do desempenho de betões pelo metacaulino*, IBRACON, 43º Congresso brasileiro do concreto, p. 244 – resumo, Foz do Iguaçu, Brasil, 18-23 Agosto, 2001.

ANEXOS

ANEXO A1

NORMAS DOS CONSTITUINTES DO BETÃO E ESPECIFICAÇÕES LNEC RELACIONADAS COM A DURABILIDADE DO BETÃO E COM OS SEUS CONSTITUINTES

Os documentos normativos dos constituintes do betão conformes com a NP EN 206-1, tendo em conta a DPC e o DL 4/2007, de 8 de Janeiro, e as especificações LNEC envolvidas são as seguintes:

Quadro A.1 – Normas de ensaios do betão fresco.

Normas	
NP EN 197-1	Cimentos – Parte 1: Composição, especificações e critérios de conformidade para cimentos correntes
NP EN 197-1/A1	(inclui a propriedade calor de hidratação dos cimentos correntes)
EN 197-1/prA2	(incluirá a propriedade resistência aos sulfatos dos cimentos correntes)
NP EN 197-4	Cimento – Parte 4: Composição, especificações e critérios de conformidade para cimentos de alto-forno de baixas resistências iniciais
EN 197-4/prA1	(incluirá a propriedade resistência aos sulfatos dos cimentos de alto-forno de baixas resistências iniciais)
NP EN 14216	Cimento. Composição, especificações e critérios de conformidade para cimentos especiais de muito baixo calor de hidratação
NP 4220	Pozolanas para betão. Definições, especificações e verificação da conformidade
NP EN 450-1	Cinzas volantes para betão – Parte 1: Definição, especificações e critérios de conformidade
NP EN- 13263-1	Sílica de fumo – Parte 1: Definições, requisitos e critérios de conformidade
NP EN 15167-1	Escória granulada de alto-forno moída para betão, argamassa e caldas de injecção – Parte 1: Definições, especificações e critérios de conformidade
EN 12878	Pigments for colouring of building materials based on cement and/or lime. Specifications and methods of test
NP EN 12620	Agregados para betão
NP EN 13055-1	Agregados leves – Parte 1: Agregados leves para betão, argamassas e caldas de injecção
NP EN 934-2	Adjuvantes para betão, argamassa e caldas de injecção – Parte 2: Adjuvantes para betão. Definições, requisitos, conformidade, marcação e rotulagem
NP EN 14889-1	Fibras para betão – Parte 1: Fibras de aço. Definições, especificações e conformidade
NP EN 14889-2	Fibras para betão – Parte 2: Fibras poliméricas. Definições, especificações e conformidade
NP EN 1504-2	Produtos e sistemas para a protecção e reparação de estruturas de betão. Definições, requisitos, controlo da qualidade e avaliação da conformidade. Parte 2: Sistemas de protecção superficial do betão

Quadro A.2 – Especificações LNEC.

Especificações LNEC	
LNEC E 461	Betões. Metodologias para prevenir reacções expansivas internas
LNEC E 464	Betões. Metodologia prescritiva para uma vida útil de projecto de 50 e de 100 anos face às acções ambientais
LNEC E 465	Betões. Metodologia para estimar as propriedades de desempenho do betão que permitem satisfazer a vida útil de projecto de estruturas de betão armado ou pré-esforçado sob as exposições ambientais XC e XS
LNEC E 466	Fíleres calcários para ligantes hidráulicos
LNEC E 467	Guia para a utilização de agregados em betões de ligantes hidráulicos
LNEC E 469	Espaçadores para betão armado. Especificações e aplicação
LNEC E 471	Guia para a utilização de agregados reciclados grossos em betões de ligantes hidráulicos

ANEXO A2

NORMAS E ESPECIFICAÇÕES LNEC DE ENSAIO DO BETÃO

Quadro A.3 – Normas de ensaios do betão fresco.

Ensaios do betão fresco	
NP EN 12350-1	Ensaios de betão fresco. Parte 1: Amostragem
NP EN 12350-2	Ensaios de betão fresco. Parte 2: Ensaio de abaixamento
NP EN 12350-3	Ensaios de betão fresco. Parte 3: Ensaio Vêbê
NP EN 12350-4	Ensaios de betão fresco. Parte 4: Grau de compactabilidade
NP EN 12350-5	Ensaios de betão fresco. Parte 5: Ensaio de mesa de espalhamento
NP EN 12350-6	Ensaios de betão fresco. Parte 6: Massa volúmica
NP EN 12350-7	Ensaios de betão fresco. Parte 7: Determinação do teor de ar. Métodos pressiométricos
prEN 12350-8	Testing fresh concrete. Part 8: Self-compacting concrete. Slump flow test
prEN 12350-9	Testing fresh concrete. Part 9: Self-compacting concrete. V-Funnel test
prEN 12350-10	Testing fresh concrete. Part 10: Self-compacting concrete. L-Box test
prEN 12350-11	Testing fresh concrete. Part 11: Self-compacting concrete. Sieve segregation test
prEN 12350-12	Testing fresh concrete. Part 12: Self-compacting concrete. J-ring test

Quadro A.4 – Normas de ensaios do betão endurecido.

Ensaios do betão endurecido	
NP EN 12390-1	Ensaios de betão endurecido. Parte 1: Forma dimensões e outros requisitos para o ensaio de provetes e para os moldes
NP EN 12390-2	Ensaios de betão endurecido. Parte 2: Execução e cura dos provetes para ensaios de resistência mecânica
NP EN 12390-3	Ensaios de betão endurecido. Parte 3: Resistência à compressão dos provetes de ensaio
NP EN 12390-4	Ensaios de betão endurecido. Parte 4: Resistência à compressão. Características das máquinas de ensaio
NP EN 12390-5	Ensaios de betão endurecido. Parte 5: Resistência à flexão de provetes
NP EN 12390-6	Ensaios de betão endurecido. Parte 6: Resistência à tracção por compressão de provetes
NP EN 12390-7	Ensaios de betão endurecido. Parte 7: Massa volúmica do betão endurecido
NP EN 12390-8	Ensaios de betão endurecido. Parte 8: Profundidade de penetração da água sob pressão
CEN/TS 12390-9	Testing hardened concrete. Part 9: Freeze-thaw resistance – Scaling
CEN/TS 12390-10	Testing hardened concrete. Part 10: Determination of the relative carbonation resistance of concrete

Quadro A.5 – Normas de ensaios do betão nas estruturas.

Ensaios do betão nas estruturas	
NP EN 12504-1	Ensaios de betão nas estruturas. Parte 1: Carotes. Extracção, exame e ensaio à compressão
NP EN 12504-2	Ensaios de betão nas estruturas. Parte 2: Ensaio não destrutivo. Determinação do índice esclerométrico
NP EN 12504-3	Ensaios de betão nas estruturas. Parte 3: Determinação da força de arranque
NP EN 12504-4	Ensaios de betão nas estruturas. Parte 4: Determinação da velocidade de propagação dos ultra-sons
NP EN 13791	Avaliação da resistência à compressão do betão nas estruturas ou em produtos prefabricados

Quadro A.6 – Especificações LNEC.

Especificações LNEC	
LNEC E 396	Betões. Determinação da resistência à abrasão
LNEC E 391	Betões. Determinação da resistência à carbonatação
LNEC E 392	Betões. Determinação da permeabilidade ao oxigénio
LNEC E 393	Betões. Determinação da absorção de água por capilaridade
LNEC E 397	Betões. Determinação do módulo de elasticidade à compressão
LNEC E 398	Betões. Determinação da retracção e expansão
LNEC E 399	Betões. Determinação da fluência em compressão
LNEC E 462	Betões. Resistência dos cimentos ao ataque por sulfatos
LNEC E 463	Betões. Determinação do coeficiente de difusão dos cloretos por ensaio de migração em regime não estacionário

ANEXO A3

NORMAS E ESPECIFICAÇÕES LNEC RELACIONADAS COM BETÕES OU COM A EXECUÇÃO DE OBRAS EM BETÃO

Quadro A.7 – Normas.

Normas	
NP EN 14487-1	Betão projectado. Parte 1: Definições, especificações e conformidade
NP EN 14487-2	Betão projectado. Parte 2: Execução
NP EN 14488-1	Ensaios do betão projectado. Parte 1: Amostragem do betão fresco e endurecido
NP EN 14488-2	Ensaios do betão projectado. Parte 2: Resistência à compressão do betão projectado jovem
NP EN 14488-3	Ensaios do betão projectado. Parte 3: Resistência à flexão (máxima, última e residual) de vigas reforçadas com fibras
NP EN 14488-4	Ensaios do betão projectado. Parte 4: Resistência de aderência em carotes à tracção simples
NP EN 14488-5	Ensaios do betão projectado. Parte 5: Determinação da capacidade de absorção de energia de provetes de lajes reforçadas com fibras
NP EN 14488-6	Ensaios do betão projectado. Parte 6: Espessura de betão sobre um substrato
NP EN 14488-7	Ensaios do betão projectado. Parte 7: Dosagem de fibras no betão reforçado com fibras
prEN 206-9	Concrete. Part 9: Additional rules for self-compacting concrete
NP EN 523	Bainhas de aço para armaduras de pré-esforço. Terminologia, requisitos e controlo da qualidade
NP EN 524-1	Bainhas de aço para armaduras de pré-esforço. Métodos de ensaio. Parte 1: Determinação da forma e das dimensões
NP EN 524-2	Bainhas de aço para armaduras de pré-esforço. Métodos de ensaio. Parte 2: Determinação do comportamento à flexão
NP EN 524-3	Bainhas de aço para armaduras de pré-esforço. Métodos de ensaio. Parte 3: Ensaios de dobragem alternada
NP EN 524-4	Bainhas de aço para armaduras de pré-esforço. Métodos de ensaio. Parte 4: Determinação da resistência à carga lateral
NP EN 524-5	Bainhas de aço para armaduras de pré-esforço. Métodos de ensaio. Parte 5: Determinação da resistência à carga de tracção
NP EN 524-6	Bainhas de aço para armaduras de pré-esforço. Métodos de ensaio. Parte 6: Determinação da estanquidade (determinação da perda de água)
NP EN 445	Caldas de injecção para armaduras de pré-esforço. Métodos de ensaio
NP EN 446	Caldas de injecção para armaduras de pré-esforço. Procedimentos para injecção
NP EN 447	Caldas de injecção para armaduras de pré-esforço. Especificações para caldas correntes

Quadro A.8 – Especificações LNEC.

Especificações LNEC	
LNEC E 468	Revestimentos por pintura para a protecção do betão armado contra a penetração de cloretos. Métodos de ensaio e requisitos

ANEXO A4

GUIA DE UTILIZAÇÃO DAS APLICAÇÕES DE CÁLCULO AUTOMÁTICO

Guia de Utilização da Aplicação de Cálculo Automático

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

Especificação LNEC E 465 – 2007: Metodologia para estimar as propriedades de desempenho do betão que permitem satisfazer a vida útil de projecto de estruturas de betão armado ou pré-esforçado sob as exposições ambientais XC e XS.

Versão 1.0 Junho 2012

INFORMAÇÃO INICIAL

Este guia destina-se a apresentar e demonstrar o funcionamento das folhas de cálculo e correspondentes aplicações de auxílio à implementação da Norma NP 206-1, através das suas Especificações LNEC E 464-2007 (Metodologia prescritiva para uma vida útil de projeto de 50 e de 100 anos face às ações ambientais) e LNEC E 465-2007 (Metodologia para estimar as propriedades de desempenho do betão que permitem satisfazer a vida útil de projeto de estruturas de betão armado ou pré-esforçado sob as exposições ambientais XC e XS).

O programa de cálculo é destinado ao uso por profissionais competentes, que saibam avaliar a sua importância e limitações, e que sejam responsáveis pela aplicação do material que ele contém. O autor responsável pelo desenvolvimento dos aplicativos não poderá ser responsabilizado por qualquer perda ou dano decorrente da mesma. Os usuários destes aplicativos devem observar que as especificações contidas nestes podem ser objeto de mudanças fruto de futuras revisões das normas.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO ... 7
1.1. Objetivos ... 7
2. MODELOS DE CÁLCULO ... 8
2.1. Considerações gerais ... 8
2.2. Modelo para a Especificação LNEC E 464 ... 9
2.2.1. Verificação da composição de misturas ... 10
2.2.2. Formulação de misturas ... 13
2.3. Modelo para a Especificação LNEC E 465 ... 15
2.3.1. Modelação da deterioração do betão armado por corrosão do aço ... 16
2.3.1.1. Modelação da humidade do betão nas classes de exposição XC e XS ... 16
2.3.1.2. Modelos para cálculo do período de iniciação da corrosão ... 17
2.3.1.3. Modelo para estima do período de propagação ... 24
2.3.2. Cálculo das propriedades de desempenho do betão relacionadas com a corrosão das armaduras ... 26
3. APRESENTAÇÃO DAS APLICAÇÕES ... 27
3.1. Código e programação ... 27
3.2. Apresentação Geral ... 28
4. FUNCIONAMENTO ... 30
4.1. Definir prescrições e/ou trabalhar Misturas com base na Especificação LNEC E 464 ... 30
4.1.1. Início ... 30
4.1.2. Definição expedita de prescrições ... 31
4.1.3. Consulta das prescrições por tipo de cimento ... 32
4.1.4. Consulta das prescrições por classes no caso das combinações ... 34
4.1.5. Misturas e adições ... 34
4.1.5.1. Verificação da composição de misturas ... 36
4.1.5.2. Formulação de misturas ... 42
4.2. Especificação LNEC E 465 ... 49
4.2.1. Início ... 49
4.2.2. Estimativa de propriedades de desempenho que permitem satisfazer a vida útil de projeto para estruturas de betão armado e pré-esforçado ... 50
4.2.3. Estimativa da vida útil de projeto de estruturas de betão armado e pré-esforçado com base em propriedades de desempenho ensaiadas ... 56
5. OBSERVAÇÕES E RESTRIÇÕES DE CÁLCULO ... 59
6. BIBLIOGRAFIA ... 60

Índice de Quadros

Quadro A.1 – Fatores de segurança da vida útil. 16

Quadro A.2 – Modelação da humidade relativa e tempo de molhagem do betão nas classes de exposição 16

Quadro A.3 – Valores dos parâmetros k1 e n. 17

Quadro A.4 – Valores dos parâmetros m, p e c para cálculo de k60. 20

Quadro A.5 – Concentração dos cloretos, C_R (% em massa do cimento). 21

Quadro A.6 – Valores do parâmetro k_{temp}. 22

Quadro A.7 – Valores dos parâmetros k_{vert} e k_{hor} para cálculo de CS. 22

Quadro A.8 – Valores dos parâmetros $k_{D,C}$, $k_{D,RH}$, $k_{D,T}$ e n para cálculo de $D_a(t)$. 23

Quadro A.9 – Níveis de corrosão. 25

Quadro A.10 – Classes de exposição e níveis de corrosão das armaduras. 25

Índice de Figuras

Fig. 2.1 – Sistematização da metodologia baseada no desempenho da Especificação LNEC E 465.... 26

Figura 3.1 – Exemplo de linhas de código (VBA do MS Excel). 27

Figura 3.2 – Organigrama de resumo do funcionamento dos programas..... 27

Figura 3.3 – Ficheiros de identificação e utilização dos aplicativos. 28

Figura 3.4 – Folha genérica do arranque inicial dos aplicativos, ... 29

Figura 3.5 – Folha de cálculo dos resultados genérica. 29

Figura 4.1 – Botões de arranque dos aplicativos para as respetivas especificações..... 30

Figura 4.2 – Janela inicial da aplicação para a Especificação LNEC E 464 e divisão por secções. 31

Figura 4.3 – Folha de resultados preenchida com dados. 32

Figura 4.4 – Janela de apresentação das prescrições por tipo de cimento. 33

Figura 4.5 – Janela de apresentação das medidas prescritivas de cada classe da combinação..... 34

Figura 4.6 – Janela de notificação das condições gerais a serem cumpridas pelas misturas..... 35

Figura 4.7 – Janela de seleção do estudo a efetuar. 35

Figura 4.8 – Janela de início da verificação da composição de misturas. 36

Figura 4.9 – Definição da composição do tipo de cimento existente na mistura. 37

Figura 4.10 – Etapa A.1: determinação dos componentes e teores da mistura. 37

Figura 4.11 – Etapa A.2: Correspondência da mistura com os cimentos da NP EN 197-1. 38

Figura 4.12 – Etapa A.3: Determinação da dosagem de ligante preliminar. 39

Figura 4.13 – Etapa A.4: Determinação da nova dosagem dos componentes alterados. 39

Figura 4.14 – Etapa A.4: Determinação da nova dosagem dos componentes alterados. 40

Figura 4.15 – Etapa A.6: Apresentação da dosagem final de ligante e respetivos componentes..... 41

Figura 4.16 – Ajustamento da composição do cimento equivalente. 41

Figura 4.17 – Janela de início da formulação de misturas. 42

Figura 4.18 – Etapa A.1: Seleção do tipo de cimento a equivaler..... 43

Figura 4.19 – Etapa A.2: Seleção da percentagem de clínquer que se pretende na mistura. 44

Figura 4.20 – Etapa A.3: Cálculo da dosagem de clínquer. 44

Figura 4.21 – Etapa A.4: Determinação da quantidade de cimento a utilizador. 45

Figura 4.22 – Etapa A.5: Determinação da dosagem total de adições a utilizar. 46

Figura 4.23 – Etapa A.5.1: Determinação da dosagem parcial de cada adição a utilizar. 47

Figura 4.24 – Etapa Final: Definição da quantidade e composição final da mistura..... 48

Figura 4.25 – Resultados na folha de cálculo "Formulação de Misturas"..... 48

Figura 4.26 – Seleção da opção de cálculo a efetuar. 49

Figura 4.27 – Etapa inicial do procedimento, definição da classe de exposição ambiental. 50

Figura 4.28 – Definição dos parâmetros da estrutura. 51

Figura 4.29 – Estimativa do período de iniciação e de propagação da corrosão. 52

Figura 4.30 – Propriedades de desempenho para a carbonatação. 53

Figura 4.31 – Propriedades de desempenho para o ataque por cloretos. 53

Figura 4.31 – Etapa final do processo com apresentação do resultados. 54

Figura 4.32 – Análise das variações nas propriedades do desempenho. 55

Figura 4.33 – Folha de cálculo das propriedades do desempenho..... 55

Figura 4.34 – Definição de propriedades do desempenho para a carbonatação. 56

Figura 4.35 – Definição de propriedades do desempenho para os cloretos..... 57

Figura 4.36 – Estimativa da vida útil com base nas propriedades do desempenho definidas. 57

Figura 4.37 – Apresentação final dos resultados do processo de cálculo. 58

Figura 4.38 – Folha de cálculo da estimativa do tempo de vida útil da estrutura..... 58

1. INTRODUÇÃO

A entrada em vigor do Decreto-Lei n.º 301/2007 de 23 de Agosto declara que para a sua colocação em obra, o betão destinado a ser colocado no mercado nacional deve ser especificado e produzido de acordo com as disposições presentes na Norma NP EN 206-1 – "Betão. Parte 1: Especificação, desempenho, produção e conformidade".

A norma NP EN 206-1, por sua vez, define a figura do especificador do betão como responsável pela especificação do betão fresco e endurecido, isto é, o responsável pela compilação final de requisitos técnicos documentados dados ao produtor em termos de desempenho ou de composição. Esta norma, entre outros requisitos, define as classes de exposição relacionadas com as ações ambientais no local de utilização do betão e introduz as especificações LNEC E 464 e LNEC E 465 como regulamentação a ser seguida para assegurar a vida útil pretendida face a essas ações.

As presentes aplicações do Excel surgem na tentativa de servir como importantes ferramentas de apoio ao especificador, seja ele projetista ou dono de obra, na aplicação das metodologias apresentadas nas Especificações LNEC E 464 e LNEC E465. Os programas baseiam-se na aplicação direta dos requisitos dessas especificações através dos dados iniciais disponibilizados pelo utilizador, sendo desenvolvido no ambiente do Microsoft Visual Basic for Applications® incorporado ao Microsoft Excel®.

1.1. OBJETIVOS

Em termos da Especificação LNEC E 464, a aplicação Excel desenvolvida pretende:

- Auxiliar na definição das prescrições quanto à composição e classe de resistência do betão para considerar a durabilidade;
- Auxiliar na identificação das influências da vida útil e máxima dimensão do agregado nas prescrições gerais;
- Auxiliar na identificação do tipo de cimento mais adequado a utilizar na estrutura através das comparações nas prescrições impostas por cada um;
- Auxiliar na situação de combinações de classes de exposição e na identificação da mais condicionante;
- Auxiliar nas metodologias de aplicação de misturas de cimentos e adições, nomeadamente:
    - verificação da composição de misturas;
    - formulação de misturas.

Em termos da Especificação LNEC E465, a aplicação Excel desenvolvida pretende:

- Auxiliar na estimativa das propriedades de desempenho do betão armado ou pré-esforçado, sujeito à ação do dióxido de carbono ou dos cloretos, que permitam satisfazer a vida útil pretendida;
- Permitir a análise da influência de diferentes parâmetros da estrutura, como a espessura do recobrimento ou o tipo de cimento, na definição das propriedades de desempenho;
- Estimar a vida útil das estruturas com base em parâmetros iniciais e propriedades do desempenho definidas em laboratório.

2. MODELOS DE CÁLCULO

2.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

Sendo os programas resultantes da aplicação das disposições presentes nas Especificações LNEC E 464 e LNEC E 465, o modelo adotado no desenvolvimento destes é reflexo dos modelos apresentados nestas especificações.

O processo de desenvolvimento adotado foi o seguinte:

- Numa primeira fase, fez-se uma análise à norma NP EN 206-1, às suas especificações e à relação entre estas e outras normas, donde se ressalva a relação com a NP EN 197-1 – "Cimentos. Parte 1: Composição, especificações e critérios de conformidade para cimentos correntes".
- Identificada a interação existente entre as normas e especificações, aplicaram-se as metodologias presentes nas Especificações LNEC E 464 e LNEC E 465, inicialmente nas situações e exemplos apresentados nestas, para servir de base de confirmação da correta implementação dos modelos, e posteriormente, a outros casos de estudo reais;
- Entendidos os modelos e as suas limitações, a definição do procedimento geral a adotar pelo programa resultou do alargamento do campo de aplicação das metodologias a casos e situações mais abrangentes dando liberdade ao utilizador para modificar parâmetros e comparar diferentes soluções.

2.2. MODELO PARA A ESPECIFICAÇÃO LNEC E 464

A metodologia prescritiva apresentada na Especificação LNEC E 464 resulta da definição de valores limites da composição e da classe de resistência do betão para as diferentes classes de exposição apresentadas e para diferentes tipos de cimentos.

Os valores apresentados nos Quadros 6 a 9 desta especificação dizem respeito a prescrições para estruturas cuja vida útil pretendida seja de 50 anos e a máxima dimensão do agregado mais grosso seja igual ou superior a 20 mm. Para situações de estruturas de vida útil pretendida de 100 anos e/ou com máxima dimensão do agregado mais grosso inferior a 20 mm a especificação define a metodologia a aplicar para que os valores apresentados sejam convertidos de modo a satisfazer tais condições. O programa segue esta mesma sequência, ou seja, consoante as condições iniciais definidas pelo utilizador é apresentado o conjunto das prescrições gerais que satisfazem tais condições consoante o estabelecido na especificação. Recorrendo a uma base de dados incorporada o programa permite ao utilizador combinar diferentes condições (tipo de cimento, classe de exposição ambiental, vida útil, etc.) apresentando para cada caso as respetivas prescrições segundo a especificação.

A avaliação das combinações de classes de exposição é realizada segundo o princípio presente na norma: "*Em cada combinação de classes de exposição ambiental devem ser satisfeitos, para o cimento (ou para a correspondente mistura) a utilizar e como requisitos de combinação, os valores prescritivos mais exigentes da mínima dosagem de cimento, da máxima razão água/cimento (e do teor de ar se for o caso) e da classe de resistência entre os valores de cada uma das classes de exposição ambiental da combinação. No caso do cimento não ser comum às diferentes classes de exposição prevalece aquele que satisfizer a classe com os requisitos mais exigentes.*" Este princípio associado ao facto de que a especificação apresenta as combinações de classes de exposição mais frequentes (Quadro 11) define a abordagem utilizada, isto é, a partir das prescrições individuais das classes, analisaram-se os valores mais condicionantes e estabeleceu-se a classe mais exigente, a qual determina as prescrições a cumprir na combinação em estudo. Apesar de não estar claramente referido na especificação, o mínimo recobrimento nominal foi também definido, por ser um dos requisitos a considerar.

A Especificação LNEC E 464 estabelece ainda que o ligante pode ser um cimento ou uma mistura (ligante hidráulico constituído por amassadura na betoneira de cimento corrente e adições tipo I ou II) cuja aptidão esteja conforme com a mesma especificação. A conformidade das misturas para serem consideradas como ligantes é abordada pelo programa nas duas partes em que é apresentada na especificação, isto é, na verificação da composição de misturas e na formulação de misturas. Para ambos os casos o procedimento adotado pelo programa é idêntico ao proposto pela especificação, permitindo ao utilizador avanços por etapas (A.1 a A.6 para a verificação de misturas e A.1 a A.5 para a formulação de misturas) para que este possa acompanhar o processo de cálculo e saber correlacionar este diretamente com o Anexo A da especificação.

2.2.1. VERIFICAÇÃO DA COMPOSIÇÃO DE MISTURAS

A formulação utilizada na E464 para a verificação da composição de misturas de um cimento corrente com adições tipo I ou II, baseia-se no seguinte conjunto de símbolos:

CM_{mist} – Quantidade de componentes minoritários na mistura;

CS_i – Quantidade do componente i da mistura;

CSi_{alt} – Quantidade alterada do componente i da mistura;

D_0 – Massa da mistura inicial a verificar;

DL- Dosagem de ligante;

$DL,_P$ – Dosagem preliminar de ligante;

D_{max_i} – Quantidade d ligante máxima para o componente i considerando o lim_{inf_i};

D_{min_i} – Quantidade de ligante mínima para o componente i considerando o lim_{sup_i};

lim_{inf_i} – Limite inferior admissível para o componente i no cimento ou no ligante equivalente.

As etapas para este procedimento subdividem-se em:

- **A.0** - Definição dos constituintes e da massa da mistura

O utilizador define os dados de entrada a serem trabalhados, neste caso a composição da mistura a ser verificada e a massa inicial da mistura (D_0).

- **A.1** - Determinação dos componentes e teores da mistura

"Determinam-se as dosagens, CS_I, e as percentagens preliminares de cada um dos diferentes componentes no total da mistura de massa D0. No cimento utilizado devem considerar-se os seus constituintes separadamente, admitindo a percentagem mínima de clínquer prevista na NP EN 197-1 ou a declarada pelo fabricante."

- **A.2** - Correspondência da mistura com os cimentos do Quadro 1 da NP EN 197-1

"Seleciona-se do Quadro 1 da NP EN 197-1 o cimento que se pretende equivaler, de modo a que os seus constituintes tenham correspondência na mistura considerada. Se percentagem de cada um dos componentes da mistura satisfazer os limites de composição do cimento selecionado, toma-se como dosagem de ligante, DL, o valor de D0, considerando o ligante equivalente ao cimento selecionado. Caso contrário, segue-se o estipulado na seção A.3."

Esta etapa corresponde assim à primeira verificação, a da conformidade da mistura inicialmente definida pelo utilizador com os limites do cimento a equivaler ou de outro cimento do Quadro 1 da NP EN 197-1. Em caso afirmativo a composição inicial da mistura verifica a especificação e pode ser adotada como ligante. Caso a mistura inicial não verifique o cálculo procede para a etapa seguinte de modo a tornar a mistura equivalente ao cimento selecionado.

- **A.3** - Determinação da dosagem de ligante preliminar (DL,P)

"*Para cada componente i da mistura que faça parte dos constituintes principais do cimento selecionado no ponto anterior, determina-se a quantidade de ligante máxima ($D_{máx_i}$) e mínima (D_{min_i}), considerando os limites superior lim_{sup_i} e inferior lim_{inf_i} de cada constituinte no cimento*

selecionado, conforme estipulado no Quadro 1 da NP EN 197-1. Assim, a partir das dosagens CSI dos componentes, determinadas na secção A.1, estabelece-se um conjunto de n intervalos [D_{min_i}; $D_{máx_i}$], em que:

$$D_{máx_i} = \frac{CS_i}{lim_{\inf_i}} \qquad (1)$$

$$D_{min_i} = \frac{CS_i}{lim_{\sup_i}} \qquad (2)$$

A dosagem de ligante preliminar DL_P será o menor de todos os $D_{máx_i}$ determinados pela equação (1).

Se $DL_P \geq D_0$ segue-se o estabelecido nas secções A.4 e A.6; se $DL_P < D0$, deve verificar-se o estabelecido nas secções A.5 e A.6."

Visto que a mistura inicial não cumpre os requisitos para ser considerada como equivalente ao cimento escolhido, é necessário determinar como ajustar a mistura de forma que tal seja possível.

Consoante o valor da dosagem de ligante preliminar avança-se para a etapa A.4, ou para a etapa A.5.

- **A.4** - <u>Determinação de nova dosagem dos componentes alterados</u>

"*Para cada componente i cujo D_{min_i} seja superior a D0, será necessário considerar uma menor dosagem CSi_{alt} que verifique simultaneamente as seguintes condições:*

$$CSi_{alt} = lim_{\sup_i} \times [(\sum_i^{n-1} restantesCS_i) + CS_i + CM_{mist}] \qquad (3)$$

$$CM_{mist} \leq \frac{(\sum_i^{n-1} restantesCS_i) + CSi_{alt}}{0{,}95} \times 0.05 \qquad (4)$$

$$CM_{mist} \leq D_0 - [(\sum_i^{n-1} restantesCS_i) + CSi_{alt}] \qquad (5)$$

Assim tem-se que CSialt é o menor valor das seguintes determinações:

$$CSi_{alt} = \frac{lim_{\sup_i} \times (\sum_i^{n-1} restantesCS_i)}{0{,}95 - lim_{\sup_i}} \qquad (6)$$

$$CSi_{alt} = lim_{\sup_i} \times D_0 \qquad (7)$$

No caso de vários componentes a alterar obtém-se um intervalo de valores, para cada componente, que verifica a equação (3)."

- **A.5** - Determinação de nova dosagem dos componentes alterados

"*Para cada componente i cujo D_{min_i} seja superior a DL_P, será necessário considerar uma menor dosagem CSi_{alt} de modo que:*

$$CSi_{alt} = lim_{\sup_i} \times DL_P \qquad (8)$$

Se se verificar

$$(\sum_i^{n-1} restantesCS_i) + CSi_{alt} \geq DL_P \qquad (9)$$

então DL = DL_P e não há lugar para componentes minoritários na mistura, CM_{mist}, tendo-se:

$$CSi_{alt} = DL_P - (\sum_i^{n-1} restantesCS_i) \qquad (10)$$

Se se verificar

$$(\sum_i^{n-1} restantesCS_i) + CSi_{alt} < DL_P \qquad (11)$$

então há lugar para componentes minoritários na mistura, CMmist, de modo que:"

$$CM_{mist} \leq \frac{(\sum_i^{n-1} restantesCS_i) + CSi_{alt}}{0{,}95} \times 0.05 \qquad (12)$$

e

$$\left(\sum_i^{n-1} restantesCS_i\right) + CSi_{alt} + CM_{mist} = DL_P \qquad (13)$$

- A.6 - Determinação de dosagem final de ligante e dos respetivos componentes

"*A dosagem de ligante DL a considerar correspondente ao somatório de todos os componentes (principais e minoritários), selecionados em A.2, cujas quantidades foram determinadas nas secções A.1 e A.4 ou A.5:"*

$$DL = \left(\sum_{i}^{n-1} restantesCS_i\right) + CSi_{alt} + CM_{mist} \qquad (14)$$

2.2.2. Formulação de misturas

A formulação utilizada na E464 para a formulação de misturas de um cimento corrente com adições tipo I ou II, baseia-se no seguinte conjunto de símbolos:

D_0 – Massa da mistura a formular;

D_a – Dosagem total das adições a utilizar;

D_c – Dosagem de cimento a utilizar;

D_{cc} – Dosagem total de constituintes no cimento a utilizar, para além de clínquer;

D_k – Dosagem de clínquer no cimento ou na mistura;

p_k – Percentagem de clínquer existente no cimento a utilizar;

p_{km} – Percentagem de clínquer que se pretende na mistura.

À semelhança do processo de verificação da composição de misturas, o processo adotado para a formulação de misturas é dividido nas seguintes etapas:

- **A.0**- Definição dos constituintes de que se dispõe para formulação da mistura

Apresentação dos constituintes disponíveis para a formulação da mistura. Determinação da dosagem de ligante pretendida.

- **A.1** - Seleção do cimento que se pretende equivaler

"*Seleciona-se do Quadro 1 da NP EN 197-1 o cimento que se pretende equivaler.*"

Com base nos materiais disponíveis escolhe-se um dos cimentos do Quadro 1 da NP EN 197-1 que se pretende equivaler.

- **A.2** - Seleção da percentagem de clínquer que se pretende na mistura

"*Seleciona-se a percentagem de clínquer que se pretende na mistura, p_{km}, limitada ao intervalo previsto na NP EN 197-1 ou nesta Especificação* (LNEC E 464) *para o cimento a equivaler.*"

- **A.3** - Cálculo da dosagem de clínquer

"Calcula-se a dosagem de clínquer, D_k,"

$$D_k = \frac{p_{km}}{100} \times D_0 \qquad (15)$$

- **A.4** - Determinação da quantidade de cimento a utilizar

"*Determina-se a quantidade de cimento a utilizar, D_c, conforme*

$$D_c = D_{cc} + D_k \qquad (16)$$

onde D_{cc} é a dosagem global dos restantes constituintes, incluindo os minoritários, do cimento a utilizar, admitindo a percentagem mínima de clínquer para esse cimento, p_k, prevista na NP EN 197-1 ou a declarada pelo fabricante, conforme a seguinte equação:"

$$D_{cc} = \frac{100-p_k}{p_k} \times D_k \qquad (17)$$

- **A.5** - Determinação da dosagem total de adições a utilizar

"*A dosagem total de adições de adições a utilizar, D_a, obtém-se pela diferença entre a massa da mistura D_0 e a do cimento, D_c, calculada por (3) na secção anterior.*

$$D_a = D_0 - D_c \qquad (18)$$

No entanto, se o cimento selecionado em A.1 não incluir um ou mais constituintes da mistura a utilizar, então deverá ser subtraída a D_c a quantidade correspondente a esses constituintes, a não ser que se pretenda considerá-los como minoritários, até 5% da mistura.

Caso se disponha de mais que uma adição, estas serão incorporadas na mistura em partes que respeitem os intervalos previstos na NP EN 197-1 para o cimento que se pretende equivaler."

$$D_a = D_0 - D_c \qquad (19)$$

- **A.5.1** - Determinação da dosagem parcial de cada adição a utilizar

Esta etapa não aparece no Anexo A da Especificação LNEC E 464, tendo sido considerada como auxiliar ao cálculo. Visto que o programa calcula automaticamente as quantidades e percentagens dos componentes da mistura, esta etapa serve para dar ao utilizador a oportunidade de efetuar ajustes à formulação (dentro dos limites regulamentares), caso não esteja satisfeito com o resultado apresentado.

- Definição da quantidade e composição final da mistura

Cumpridas todas as etapas, o produto final do processo é a formulação da mistura pretendida pelo utilizador de acordo com a Especificação LNEC E 464.

2.3. MODELO PARA A ESPECIFICAÇÃO LNEC E 465

A Especificação LNEC E 465 "Metodologia para estimar as propriedades de desempenho do betão que permitem satisfazer a vida útil de projeto de estruturas de betão armado ou pré-esforçado sob as exposições ambientais XC e XS" propõe, fundamentalmente, a caracterização do betão através de propriedades de desempenho, nomeadamente a resistência à carbonatação e a permeabilidade ao ar, para as classes de exposição sujeitas à ação do dióxido de carbono (classe XC), e o coeficiente de difusão dos cloretos como propriedade de desempenho para as classes sujeitas à ação dos cloretos (essencialmente a classe XS, embora também admita que as classes XD quando ocorrem devem ser assimiladas às classes XS). Segundo esta especificação, a determinação da composição de betões pode ser efetuada através destes indicadores de desempenho, em alternativa à definição das quantidades de seus constituintes.

Antes de determinar os valores das propriedades de desempenho do betão a especificar no projeto de uma estrutura de betão, será necessário estabelecer alguns parâmetros da estrutura, nomeadamente:

- o tempo de vida útil pretendido, t_g, da estrutura
- a classe de fiabilidade da estrutura;
- a(s) classes(s) de exposição ambiental XC1 a XC4 ou XS1 a XS3 (ou v.g., a combinação XS1+XC4), a que o betão armado ou pré-esforçado de cada elemento estrutural fica submetido;
- os valores do recobrimento mínimo, R, em cada peça estrutural.

A Especificação LNEC E 465, na análise da durabilidade de estruturas, apenas considera "*o estado limite de utilização, definido como o início da fendilhação do betão de recobrimento por corrosão das armaduras, não se comprometendo a secção da armadura considerada nos cálculos estruturais*." Acrescentando "*Consequentemente, não se consideram estados limites últimos, até por o processo de corrosão não ser súbito e permitir em geral tomar oportunamente medidas corretivas*".

À semelhança do cálculo estrutural onde se utilizam fatores parciais de segurança que afetam materiais e ações, a metodologia da Especificação LNEC E 465 baseia-se em fatores de segurança, nomeadamente, no fator de segurança da vida útil, γ, para estimar as propriedades de desempenho do betão, procurando garantir que, para o estado limite em causa e para a vida útil pretendida, t_g, que a vida útil estimada, t_L, avaliada segundo a abordagem do desempenho, seja superior à vida útil pretendida, t_g, conforme indica a equação (20).

$$t_L - t_g > 0 \quad (20)$$

Adotando a abordagem probabilística, exposta no seu Anexo B, a Especificação satisfaz a condição da equação (20), calculando de forma determinística as propriedades de desempenho para o valor da "vida útil de cálculo", t_d, através do fator de segurança adotado.

$$t_d = \gamma \times t_g \quad (21)$$

São definidos no Quadro A.1 os valores do fator de segurança da vida útil a considerar.

Quadro A.1 – Fatores de segurança da vida útil.

Classes de fiabilidade	Fator γ para o Estado Limite de Utilização
RC3	2.8
RC2	2.3
RC1	2

2.3.1. MODELAÇÃO DA DETERIORAÇÃO DO BETÃO ARMADO POR CORROSÃO DO AÇO

Para o estado limite de utilização adotado na Especificação, a máxima degradação admissível por corrosão das armaduras é muito limitada. Assim o critério de cálculo selecionado foi o de estimar valores mínimos para o período de propagação e caracterizar o betão através das propriedades ligadas ao período de iniciação.

2.3.1.1. MODELAÇÃO DA HUMIDADE DO BETÃO NAS CLASSES DE EXPOSIÇÃO XC E XS

São adotados os valores apresentados na Especificação para a humidade do betão em cada classe de exposição através da humidade relativa do betão de recobrimento, $HR_{betão}$, e o tempo de molhagem, TdM, conforme apresenta o Quadro A.2.

Quadro A.2 – Modelação da humidade relativa e tempo de molhagem do betão nas classes de exposição

Classe estrutural	Humidade relativa	TdM
XC1 (seco/sempre húmido)	Ambiente seco: 60% Ambiente húmido: 100%	0.05 1*
XC2 (húmido/raramente seco)	90%	0.8
XC3 (moderadamente húmido)	70%	0.1
XC4 (ciclicamente húmido e seco)	Região seca: 80% Região húmida: 80%	0.18 0.24
XS1 (ar com sais do mar)	80%	0.6
XS2 (submersão permanente)	100%	1*
XS3 (zona de marés e de rebentação)	100%	1

Nota:
*Ausência de oxigénio para o processo de corrosão

2.3.1.2. MODELOS PARA CÁLCULO DO PERÍODO DE INICIAÇÃO DA CORROSÃO

As propriedades do desempenho ligadas ao movimento do dióxido de carbono e dos cloretos nos poros do betão de recobrimento, permitem relacionar a profundidade de penetração destes agentes agressivos com o período de iniciação. Assim os modelos de cálculo apresentados na especificação utilizam esta relação para estimar as propriedades de desempenho a controlar na estrutura.

Modelos para cálculo do período de iniciação devido à carbonatação

a) 1º Modelo de cálculo do período de iniciação devido à carbonatação.

O primeiro modelo é traduzido pela equação (22)

$$X = \sqrt{\frac{2\times D\times \Delta c}{a}\times t\times K} = \sqrt{\frac{2\times D\times \Delta c}{a}\times t\times \left[\sqrt{k0\times k1\times k2}\left(\frac{t_0}{t}\right)^n\right]} \quad (22)$$

Onde:

D – é o coeficiente de difusão do dióxido de carbono através do betão carbonatado em equilíbrio com o ambiente de 65% de humidade relativa e 20ºC (m^2/ano);

Δc – é a diferença de concentração de dióxido de carbono no exterior, c, e na frente de carbonatação, c1. Considerando o CO_2 totalmente consumido na frente de carbonatação, é $c_1 = 0$ e $\Delta c = 0{,}7*10^{-3}$ kg/m^3;

a – é a quantidade de CO_2 que provoca a carbonatação dos componentes alcalinos do betão contidos numa unidade de volume do betão, dependendo portanto do tipo e dosagem do cimento utilizado (kg/m^3);

k0 – é um fator de valor 3 quando as condições de ensaio são as da Especificação LNEC E 391;

k1 – é um fator que permite considerar a influência da humidade relativa, com os valores do Quadro A.3;

k2 – é um fator que permite considerar a influência da cura, tendo o valor 1 na cura normalizada e 0,25 quando a cofragem é de permeabilidade controlada e a cura é de 3 dias;

t_0 – é o período de referência (= 1 ano);

n – é um fator que permite considerar a influência da molhagem/secagem ao longo do tempo, com os valores dados no Quadro A.3.

Quadro A.3 – Valores dos parâmetros k1 e n.

	XC1	XC2	XC3	XC4
k1	1.00	0.20	0.77	0.41
n	0.000	0.183	0.020	0.085

A primeira parcela da equação corresponde à lei de Fick, regente da evolução da profundidade de carbonatação X (m) no tempo t (anos), considerando o fluxo de CO_2 estacionário. A segunda parcela, representada pelo termo K, permite ter em consideração a influência das condições de ensaio e de exposições ambientais diferentes de 65% HR e a cura do betão.

Admitindo que a resistência à carbonatação dum betão pode ser medida pela grandeza R_{C65}:

$$R_{C65} = \frac{a}{D}(kg.ano/m^6) \qquad (23)$$

Integrante não só da difusibilidade ao CO_2 do betão, como do tipo e dosagem do cimento, a primeira parcela da equação (22) é substituída pela equação (24).

$$X = \sqrt{\frac{2 \times c \times t}{R_{C65}}} \quad (24)$$

A determinação em laboratório da resistência à carbonatação de um betão, R_{C65}, é feita seguindo a Especificação LNEC E 391, usando o tempo t_1 necessário para atingir no provete de ensaio um valor mensurável de X_1 ao utilizar uma concentração superior à do CO_2 no ar, v.g., $c_{ace}l = 90*10^{-3}$ kg/m^3, para acelerar o processo de carbonatação. Assim da equação (24) vem

$$R_{C65} = \frac{2 \times c_{acel} \times t_1}{X_1^2} \qquad (25)$$

Introduzindo a equação (23) na equação (22) e tendo em conta o valor de c, a expressão do modelo de previsão da profundidade de carbonatação X dada pela equação (22) passa finalmente a ser descrita da seguinte forma:

$$X = \sqrt{\frac{2 \times 0{,}0007 \times t}{R_{C65}} \times \sqrt{k0 \times k1 \times k2} \times \left(\frac{t_0}{t}\right)^n} \quad (26)$$

Assim, a equação que permite determinar o valor da resistência à carbonatação a exigir ao betão em cada classe de exposição ambiental e a especificar no projeto, de modo a que ao fim do período de iniciação t_I a profundidade de carbonatação seja no máximo igual ao recobrimento R (mm), será:

$$R_{C65} = \frac{1{,}4 \times 10^3 \times t_I}{R^2} \times k0 \times k1 \times k2 \times \left(\frac{t_0}{t_I}\right)^{2n} \quad (27)$$

b) 2º Modelo de cálculo do período de iniciação devido à carbonatação.

O segundo modelo apresentado na especificação do LNEC, resulta de se ter verificado experimentalmente existir uma boa correlação entre os valores do coeficiente de difusão do ar e o coeficiente de permeabilidade ao ar no betão. Com base nesta última propriedade, foi estabelecida a equação (28), para prever a profundidade de carbonatação X (mm) ao fim do tempo t (anos):

$$X = \frac{a \times k^{0,4} \times t^{P}}{c^{0,5}} \times k2 \quad (28)$$

Onde

a – é um fator de cálculo de valor 150;

k – é o coeficiente de permeabilidade ao ar do betão de recobrimento (em 10^{-16} m^2) nas condições de humidade da exposição ambiental. Está relacionado com o valor medido pelo método CEMBUREAU descrito na Especificação LNEC E 392 [9] (mas utilizando o oxigénio como fluido) com o provete com 28 dias de idade e em equilíbrio com HR = 60%, k60, pela expressão $k = m*k_{60}$;

p – é um expoente que depende da humidade relativa do betão e portanto da classe de exposição;

c – é o teor de óxido de cálcio da matriz de cimento hidratado do betão (kg/m3), dependente do tipo de cimento utilizado e da classe de exposição;

k2 – é o fator que permite considerar a influência da cura, tendo o valor 1 na cura normalizada e 0,5 quando a cofragem é de permeabilidade controlada e a cura é de 3 dias.

Por forma a estabelecer o valor da propriedade de desempenho, k_{60}, que o betão deve exibir para que o recobrimento R (em mm) só seja atingido pela frente de carbonatação ao fim do período de iniciação t_I, a equação (28) foi reorganizada da seguinte forma:

$$k_{60} = \frac{R^{2,5} \times c^{1,25}}{(a \times k2)^{2,5} \times t_I^{2,5*p} \times m} \quad (29)$$

O Quadro A.4 apresenta os valores a considerar para os parâmetros c, m e p em função da humidade relativa do betão.

Quadro A.4 – Valores dos parâmetros m, p e c para cálculo de k60.

HR (%)	m	p	c (kg/m3)		
			CEM I *	CEM II/III	CEM IV/V
60	1	0.51	460	350	230
65	0.737	0.5	460	350	230
70	0.534	0.48	460	350	230
75	0.382	0.45	470	358	235
80	0.256	0.42	485	365	240
85	0.184	0.37	510	388	253
90	0.117	0.32	535	410	265
95	0.057	0.25	570	430	285
100	0	0.19	615	470	310

Modelo para cálculo do período de iniciação devido aos cloretos

Inicialmente, as equações da modelação de cálculo da profundidade de penetração dos cloretos através do betão de recobrimento, consideravam somente a segunda lei de Fick da difusão, cuja integração tem a seguinte expressão:

$$C(x,t) = C_S\left(1 - erf\frac{X}{2\sqrt{Dt}}\right) \quad (30)$$

Reorganizando-a, resulta:

$$X = 2\xi\sqrt{D \times t} \qquad (31)$$

ou

$$D = \frac{X^2}{4 \times t \times \xi^2} \qquad (32)$$

com

$$\xi = erf^{-1}\frac{C_S - C(x,t)}{C_S} \qquad (33)$$

Sendo:

D – o coeficiente de difusão dos cloretos do betão, em m^2/s;

C(x,t) – a concentração dos cloretos, em % da massa de ligante, à profundidade x (m) após decorrido o tempo t (em s) de exposição aos cloretos. No caso de x = recobrimento R e de haver iniciação da despassivação das armaduras e com um tempo de exposição igual ao período de iniciação (independentemente da classe de exposição), $t = t_I$, é $C(R,t_I) = CR$;

C_S – é a concentração dos cloretos, em % da massa de ligante, na superfície do betão (X = 0), para t=0, suposta constante;

erf – é a função erro: erf(z) = w e erf^{-1} o seu inverso: $erf^{-1}(w) = z$. A Especificação apresenta no seu Anexo D a modelação desta função. Neste Anexo, a Especificação introduz uma simplificação, de modo a facilitar o cálculo por computador desta função, sendo para os efeitos desta aplicação utilizada a mesma simplificação. Assim a seguinte expressão foi utilizada no desenvolvimento do aplicativo:

$$\mathrm{erf}(z) = 1 - (1 + a_1 \times z + a_2 \times z^2 + a_3 \times z^3 + a_4 \times z^4)^{-4} \qquad (34)$$

com

$a_1 = 0{,}278393$

$a_2 = 0{,}230389$

$a_3 = 0{,}000972$

$a_4 = 0{,}078108$

Para as expressões 30 a 33 a concentração inicial de cloretos no próprio betão admite-se não existente. Caso houver esta concentração inicial via constituintes do betão, esta deve ser subtraída às concentrações C_R e C_S.

A concentração dos cloretos, C_R, tem os valores atribuídos pela Especificação, conforme a classe de exposição ambiental e a razão água/cimento. Estes valores são reproduzidos no Quadro A.5.

Quadro A.5 – Concentração dos cloretos, C_R (% em massa do cimento).

Água/cimento	XS1;XS2	XS3
a/c ≤ 0,30	0.6	0.5
0,30 < a/c ≤ 0,40	0.5	0.4
a/c > 0,40	0.4	0.3

Os parâmetros C_S e D não são tabelados, necessitando assim de ser determinados através das equações que a seguir se indicam:

a) Concentração de cloretos à superfície do betão, C_S (% em massa de cimento):

$$C_S = C_b \times k_{a/c} \times k_{vert} \times k_{hor} \times k_{temp} \qquad (35)$$

Sendo:

C_b = 3,0% nas classes XS2 e XS3 e C_b = 2,0% na XS1. Tem em conta o teor de cloretos da água do mar em Portugal (21g/l) e a temperatura da água do mar de (16 ± 2)ºC. Na foz dos rios a salinidade da água depende das marés e da distância que estas atingem;

$k_{a/c}$ = 2,5 x (a/c) sendo a/c a razão água/ligante;

k_{temp} referente ao betão, tem os valores indicados no Quadro A.6.

k_{vert} e k_{hor} têm os valores indicados no Quadro A.7.

Quadro A.6 – Valores do parâmetro k_{temp}.

Temperatura do betão	0^0C	10^0C	15^0C	20^0C	25^0C	30^0C	35^0C
k_{temp}	2.2	1.5	1.2	1.0	0.8	0.7	0.6

Quadro A.7 – Valores dos parâmetros k_{vert} e k_{hor} para cálculo de CS.

Classes de exposição		k_{vert}
	XS1	0.7
XS2	**a 1 m de profundidade**	1.0
	a 24 m de profundidade	1.4
	XS3	1.0
	Distância à linha de costa*	**k_{hor}**
	0	1.0
	1 km	0.6

Notas:
Admitem-se variações lineares entre os limites de distância à linha da costa, em zonas planas e relativamente baixas e nos vales dos rios. Nas ilhas da Madeira e dos Açores pode ser duplicada.

b) Coeficiente de difusão do betão, D (em m^2/s), considerando que este diminui com o tempo de exposição segundo a expressão:

$$D_a(t) = D_a(t_0) \times \left(\frac{t_0}{t}\right)^n = k_{D,c} \times k_{D,RH} \times k_{D,T} \times D_0 \times \left(\frac{t_0}{t}\right)^n = k \times \left(\frac{t_0}{t}\right)^n \times D_0 \qquad (36)$$

Onde

$k_{D,c}$ – é um fator que tem em conta a influência das condições de cura;

$k_{D,RH}$ – é um fator que tem em conta a influência da humidade relativa do ambiente;

$k_{D,T}$ – é um fator que tem em conta a influência da temperatura;

D_0 – é o coeficiente de difusão potencial (m2/s), determinado em laboratório de acordo com a Especificação LNEC E 463, com o betão na idade de referência t_0 = 28 dias;

n – é um fator que tem em conta o decréscimo de D ao longo do tempo.

O Quadro A.8 apresenta os valores destes parâmetros de cálculo definidos na Especificação.

Quadro A.8 – Valores dos parâmetros $k_{D,C}$, $k_{D,RH}$, $k_{D,T}$ e n para cálculo de $D_a(t)$.

Número de dias de cura	$k_{D,c}$	
normalizada	2.40	
em contacto permanente com água	0.75	
Cofragem de permeabilidade controlada e 3 dias de cura húmida	1.00	
Classes de exposição	**$k_{D,RH}$**	
XS1	0.4	
XS3	1.0	
XS2	1.0	
Temperatura do betão (^{0}C)	**$k_{D,T}$**	
30^{0}C	1.50	
25^{0}C	1.20	
20^{0}C	1.00	
15^{0}C	0.80	
10^{0}C	0.75	
0^{0}C	0.40	
Classes de exposição	**n**	
	CEM I/II*	CEM III/IV/V
XS1	0.55	0.65
XS2	0.45	0.55
XS3	0.55	0.65

2.3.1.3. MODELO PARA ESTIMA DO PERÍODO DE PROPAGAÇÃO

Para definição do modelo a Especificação recorre a três princípios de cálculo diferentes, nomeadamente:

a) à lei de Faraday

$$x = 0{,}0115 \times I_{corr} \times t_p \qquad (37)$$

que permite determinar a redução de raio x (mm) provocada pela intensidade da corrente de corrosão I_{corr} ($\mu A/cm^2$), frequentemente designada na literatura de taxa de corrosão, durante o tempo de propagação da corrosão t_P (anos).

b) à expressão experimental de estima da redução de raio, x, que provoca a iniciação da fissuração:

$$x = 10^{-3} \times \left(74{,}5 + \frac{7{,}3 \times R}{\emptyset_0} - 17{,}4 \times f_{cd}\right) \qquad (38)$$

onde

R – é o recobrimento (mm);

f_{cd} – é a resistência à compressão diametral do betão, com valor 2 e 2,5 MPa nos betões para a carbonatação e 3 e 4 MPa nos betões para os cloretos;

c) à consideração da diferente influência na corrosão da carbonatação e da ação dos cloretos. Sendo o diâmetro inicial ϕ_0 das armaduras passivas reduzido, devido à corrosão, de αx:

$$\emptyset_0 - \emptyset = \alpha x \quad \text{ou} \qquad r_0 - r = \left(\frac{\alpha}{2}\right) x \qquad (39)$$

sendo $\alpha = 2$ para a carbonatação (a corrosão é uniforme), e $\alpha = 10$ para o ataque por cloretos (a corrosão é por picadas), a redução do raio x pode então escrever-se de acordo com a expressão (40)

$$x = r_0 - r = \frac{k \times r_0}{100} \text{ (k em \%)} \qquad (40)$$

Isto permite rescrever a equação (35) sob a forma

$$\frac{k \times r_0}{100} = \left(\left(\frac{\alpha}{2}\right) \times \left(0{,}0115 \times I_{corr} \times t_p\right)\right) \qquad (41)$$

Ou

$$t_p = \frac{k \times \emptyset_0}{(1{,}15 \times \alpha \times I_{corr})} \qquad (42)$$

e a expressão (38) sob a forma

$$k = 0{,}1 \times \frac{\left(74{,}5 + \frac{7{,}3 \times R}{\emptyset_0} - 17{,}4 \times f_{cd}\right)}{\left(\frac{\emptyset_0}{2}\right)} \qquad (43)$$

Introduzindo o valor de k obtido pela equação (43) na equação (42) consegue-se estimar o período de propagação da corrosão.

A intensidade da corrente de corrosão, necessária à determinação do período de propagação é relacionada com níveis de corrosão, conforme apresenta o Quadro A.9.

Quadro A.9 – Níveis de corrosão.

Intensidade da corrente de corrosão (μA/cm2)	Nível de corrosão
< 0.1	desprezável
0.1 - 0.5	baixo
0.5 - 1	moderado
> 1	elevado

Associando estes níveis de corrosão com a humidade relativa das classes de exposição apresentadas no Quadro A.2, obtém-se os níveis de corrosão verificados em cada classe. O Quadro A.10 apresenta a associação das classes de exposição aos níveis de corrosão.

Quadro A.10 – Classes de exposição e níveis de corrosão das armaduras.

XC1	XC2	XC3	XC4	XS1	XS2	XS3
Desprezável	Baixo	Desprezável	Baixo	Moderado	Desprezável	Elevado
Desprezável			Moderado			

2.3.2. CÁLCULO DAS PROPRIEDADES DE DESEMPENHO DO BETÃO RELACIONADAS COM A CORROSÃO DAS ARMADURAS

A abordagem através do fator de segurança da vida útil, γ, possibilita a determinação do valor das propriedades de desempenho relacionadas com a durabilidade do betão armado, obtidas pelo período de iniciação de cálculo, $t_{IC} = \gamma * t_I$, dado por:

$$t_{IC} = \gamma \times (t_g - t_P) \qquad (44)$$

Sendo o tempo de vida útil de cálculo obtido pela equação (45)

$$t_d = \gamma \times t_g = \gamma \times (t_I + t_P) \qquad (45)$$

A Figura 2.1 apresenta a sistematização da metodologia da Especificação utilizada para o desenvolvimento da aplicação.

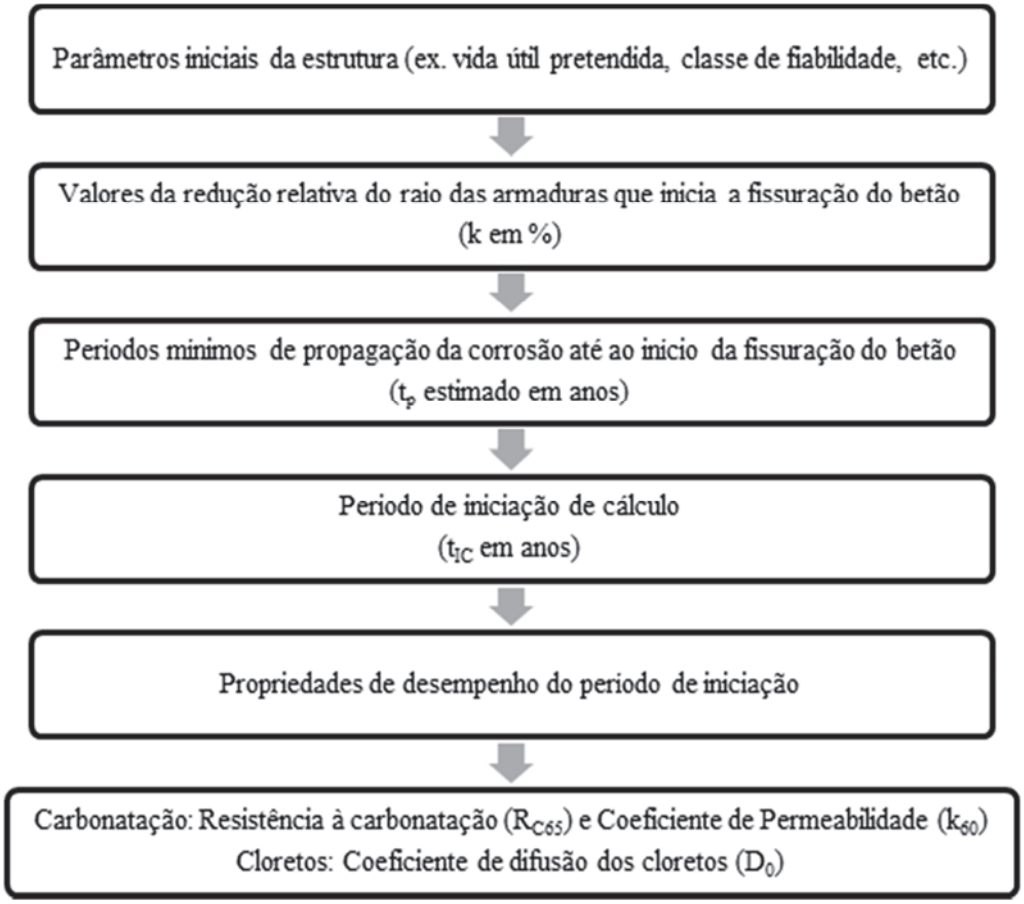


Fig. 2.1 – Sistematização da metodologia baseada no desempenho da Especificação LNEC E 465.

3. APRESENTAÇÃO DAS APLICAÇÕES

3.1. CÓDIGO E PROGRAMAÇÃO

Os programas de cálculo são desenvolvido no ambiente amigável do Microsoft Visual Basic for Applications® incorporado no Microsoft Excel®. A opção por este desenvolvimento tem por base o facto de o Microsoft Excel ser uma ferramenta amplamente utilizada no âmbito do projeto de estruturas, sendo as suas fórmulas, gráficos e ferramentas do conhecimento geral dos intervenientes no projeto. A incorporação do programa neste aplicativo é portanto vantajosa para estes intervenientes uma vez que não obriga a aprender a dominar novos aplicativos de cálculo.

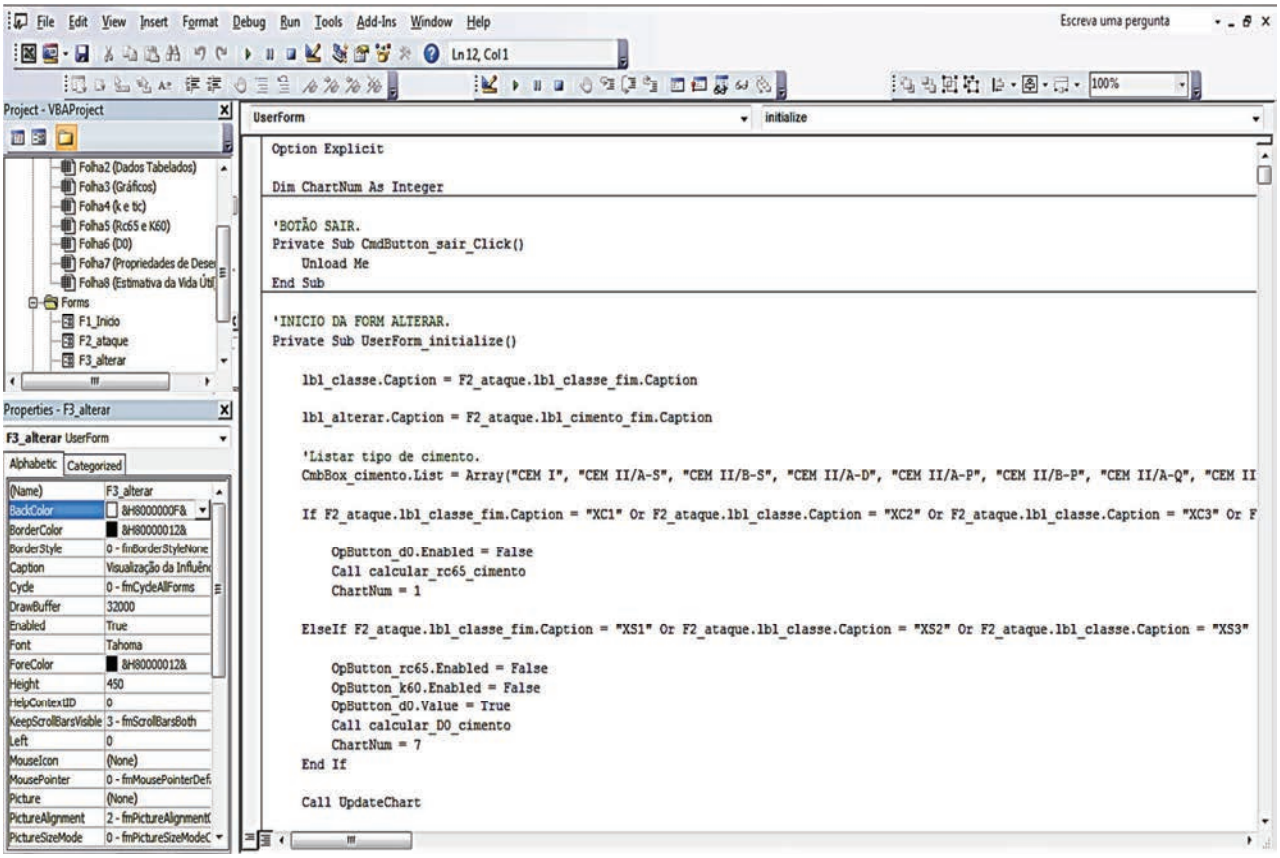


Figura 3.1 – Exemplo de linhas de código (VBA do MS Excel).

Do ponto de vista do utilizador o processo desenvolvido pelas aplicações é o indicado na Figura 3.2.

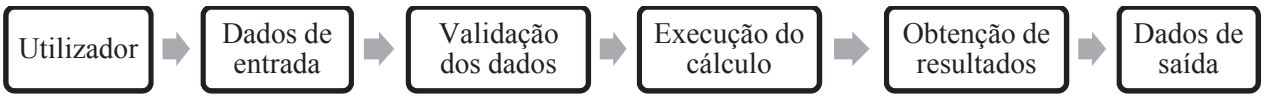


Figura 3.2 – Organigrama de resumo do funcionamento dos programas.

Nenhum dos aplicativos necessita de instalação própria, exigindo apenas que esteja disponível no computador uma versão do MS Excel válida. Inicialmente as aplicações foram desenvolvidas para a versão 2010 do Excel, mas converteram-se os ficheiros de modo a poder trabalhar em versões anteriores.

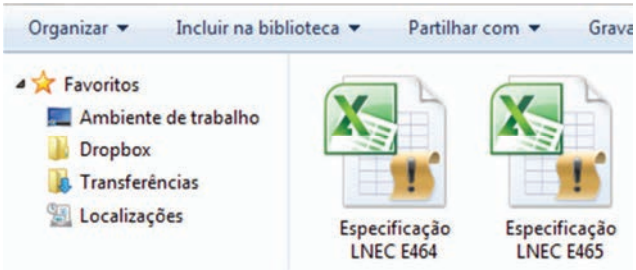


Figura 3.3 – Ficheiros de identificação e utilização dos aplicativos.

As especificações requeridas ao computador são as mesmas da utilização do MS Excel, tanto a nível de processador como de memória RAM. Nenhum dos programas dispõe da opção de gravar automaticamente os resultados para as utilizações seguintes, isto é, os resultados dos processos de cálculo são apresentados ao utilizador e posteriormente copiados para a folha de cálculo de modo a facilitar o seu manuseamento, contudo deverá ser o utilizador a efetuar a opção de guardar o ficheiro por forma a não perder os dados obtidos.

3.2. APRESENTAÇÃO GERAL

Ao abrir qualquer um do ficheiro de cálculo o utilizador depara-se com um livro de trabalho normal do MS Excel existindo apenas algumas formatações em algumas folhas de forma a receber os resultados e os botões de arranque das macros que iniciam os programas.

A Figura 3.3 ilustra a folha de cálculo da aplicação para a utilização da Especificação LNEC E 464, semelhante ao que acontece para a Especificação LNEC E 465.

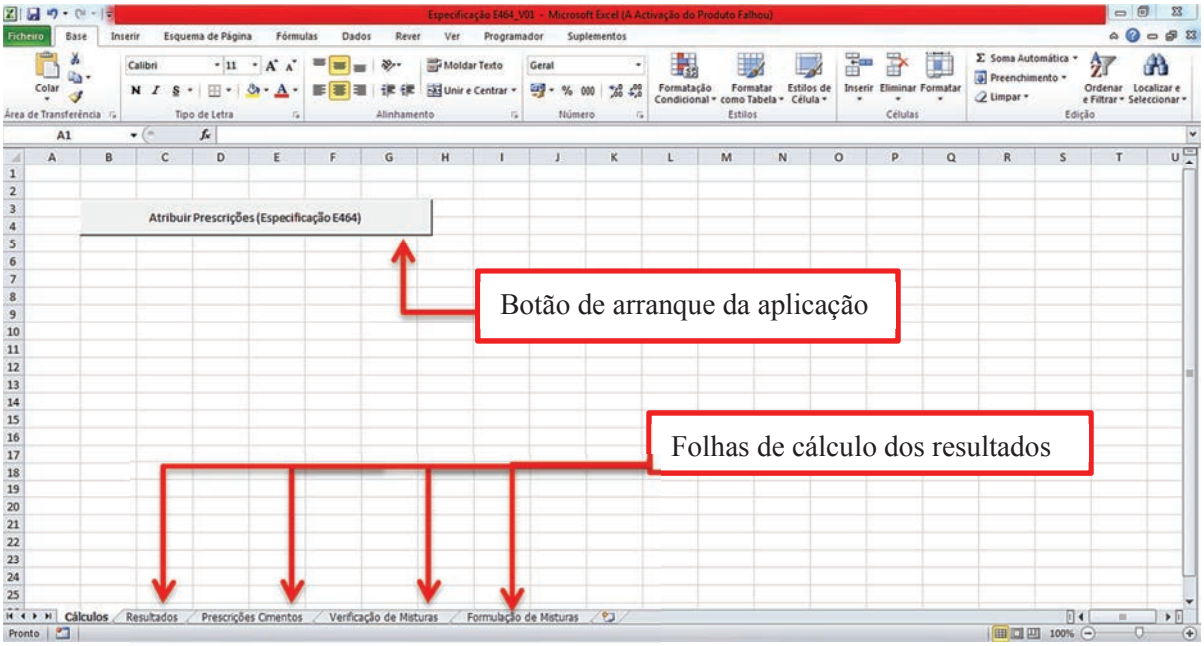


Figura 3.4 – Folha de cálculo genérica do arranque inicial dos aplicativos, .

O livro completo apresentado ao utilizador é composto por folhas de cálculo distintas. A primeira folha de cálculo destina-se a dar ao utilizador a opção de arranque do cálculo enquanto as outras são folhas de resultados onde são apresentados os resultados dos cálculos efetuados pelo programa.

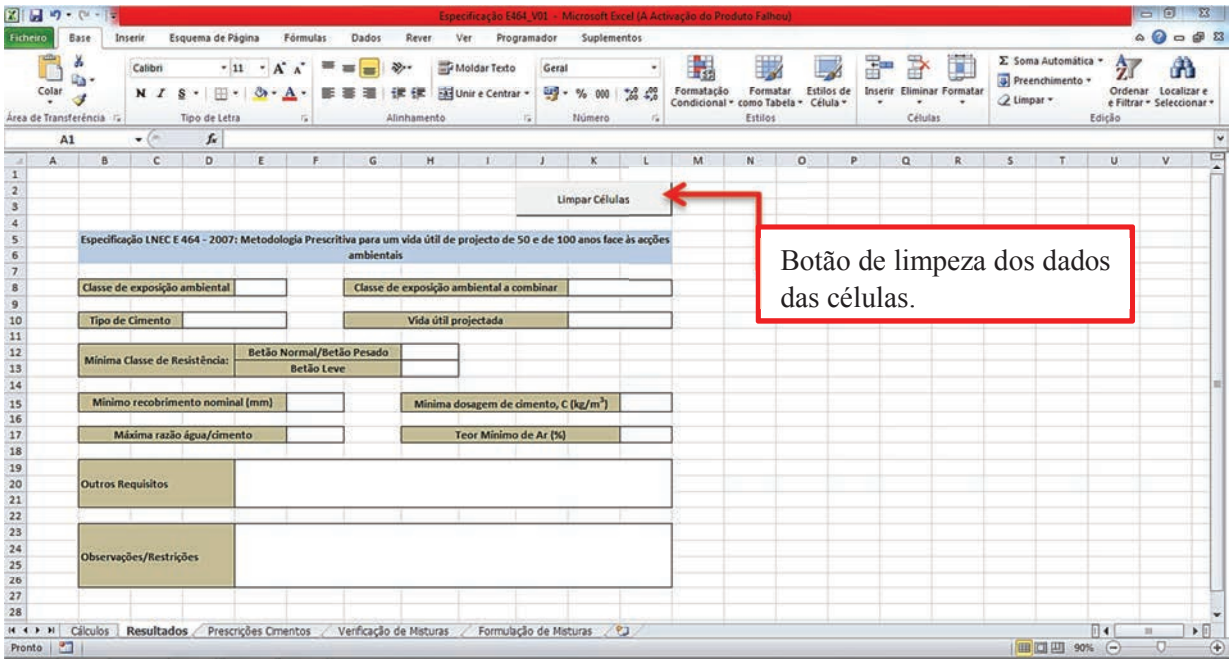


Figura 3.5 – Folha de cálculo, genérica, dos resultados .

A apresentação dos resultados nas células das folhas de cálculo dá ao utilizador a possibilidade de exportar estes resultados para outros ficheiros Excel ou para documentos de texto.

4. FUNCIONAMENTO

O pressionar do botão de arranque pelo utilizador inicia o programa, sendo a interação feita através de objetos gráficos (janelas ou *UserForm*) desenvolvidos no VBA do MS Excel.

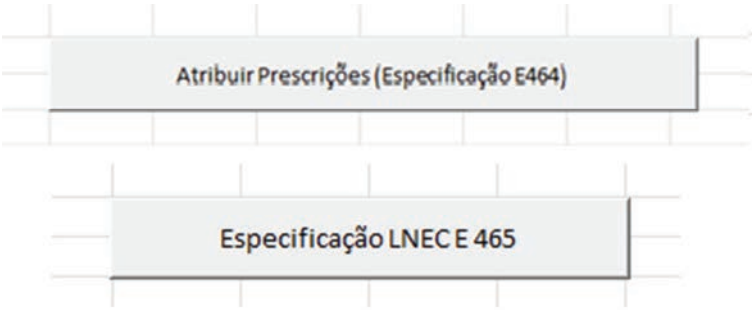


Figura 4.1 – Botões de arranque dos aplicativos para as respetivas especificações.

4.1. DEFINIR PRESCRIÇÕES E/OU TRABALHAR MISTURAS COM BASE NA ESPECIFICAÇÃO LNEC E 464

Esta secção apresenta, passo a passo, o procedimento a ser seguido na utilização da aplicação , para definir as prescrições e/ou trabalhar as misturas de cimentos e adições, de acordo com a Especificação LNEC E 464.

4.1.1. INÍCIO

No arranque da aplicação para esta análise, é apresentado ao utilizador a janela principal deste processo, ilustrada na Figura 4.2.

É a partir desta janela que o utilizador deverá indicar ao programa qual o processo pretendido, sendo que esta serve como uma plataforma de ligação entre as diversas partes do programa. Esta janela divide-se em três partes: a parte superior, onde se inserem os parâmetros de entrada; a parte intermédia onde serão apresentados os parâmetros de saída; e a parte inferior onde se encontram os botões de comando, conforme ilustrado na Figura 4.2.

- Parâmetros de entrada

Os dados iniciais a serem introduzidos pelo utilizador, nomeadamente, a vida útil pretendida, a classe de exposição ambiental (ou classes caso se trate de combinações de classes), a dimensão máxima do agregado e o tipo de cimento corrente, são tratados pelo programa como parâmetros de entrada na análise.

- Parâmetros de saída

Os resultados da análise correspondem às prescrições a serem empregues no projeto, nas condições iniciais definidas pelo utilizador. Estes parâmetros abarcam os mesmos requisitos apresentados nos Quadros 6 a 9 da especificação, tais como o mínimo recobrimento nominal, a máxima razão água/cimento e a classe de resistência.

- Botões de comando

Os botões de comando são os responsáveis pelas ações que a aplicação deverá realizar. É através destes que o utilizador indica ao programa o que é que deve ser feito.

Cada um destes botões desencadeia uma ação diferente, nomeadamente, o botão "Definir" define as prescrições regulamentares, o botão "Aceitar" copia os resultados para a folha de cálculo "Resultados" e o botão "Sair" fecha a aplicação e retorna à folha de cálculo.

Os botões "Ver Quadro", "Misturas de cimentos e adições" e "Ver prescrições isoladas" conduzem o utilizador a novas janelas da aplicação que são abordadas com algum detalhe mais à frente neste guia.

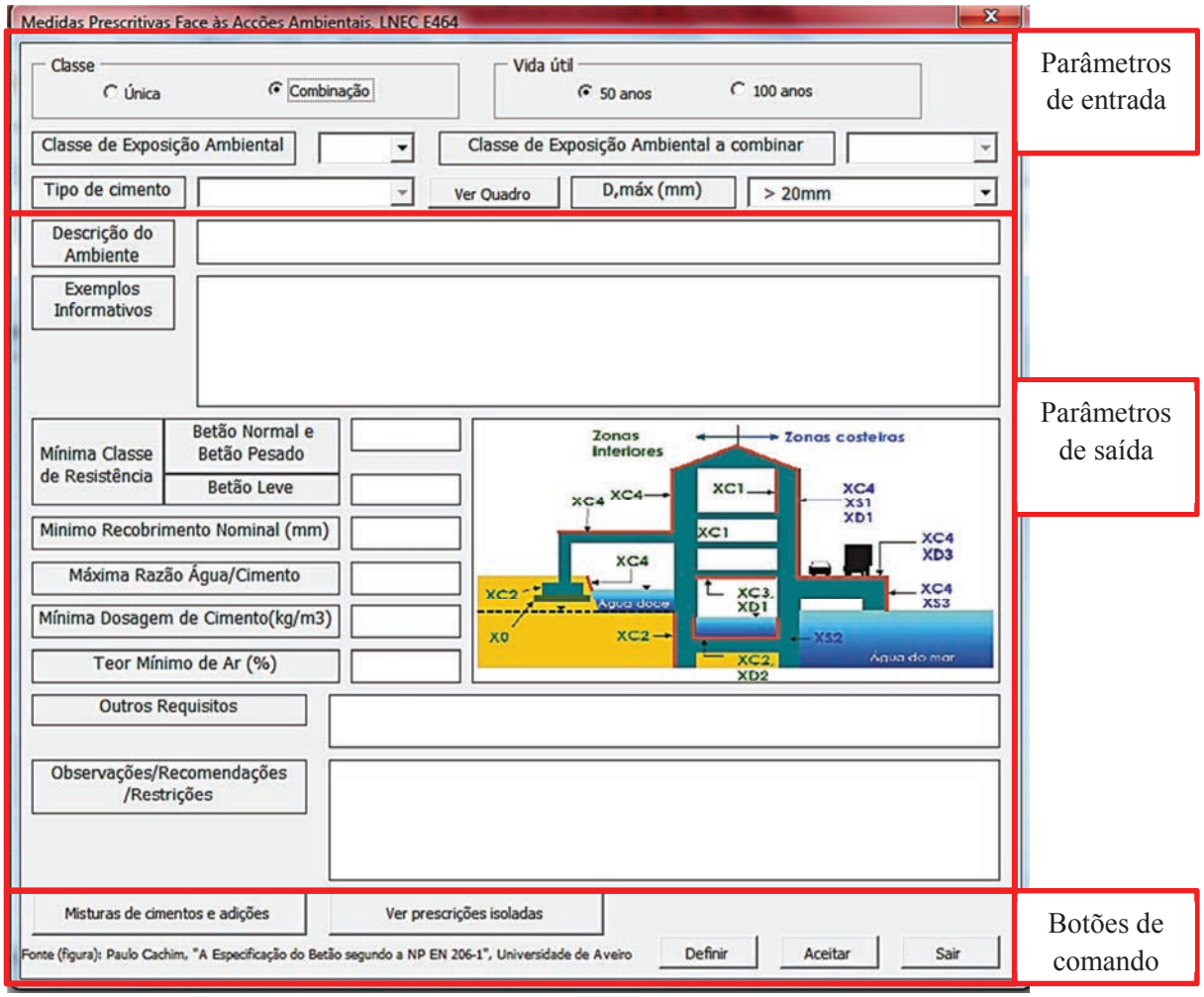


Figura 4.2 – Janela inicial da aplicação para a Especificação LNEC E 464 e divisão por secções.

4.1.2. DEFINIÇÃO EXPEDITA DE PRESCRIÇÕES

A primeira opção de cálculo disponível na aplicação é a de definir as prescrições mediante uma determinada situação. Conhecendo a vida útil pretendida, a(s) classe(s) de exposição ambiental, o tipo de cimento a utilizar e a máxima dimensão do agregado mais grosso, introduzem-se estes dados na aplicação.

Através do comando "Definir" da janela inicial são apresentadas as prescrições a serem verificadas para as condições definidas.

São apresentadas na mesma janela as prescrições gerais, a que uma estrutura na situação inicial definida, deve cumprir.

Ao pressionar o botão "Aceitar" o programa exporta as prescrições definidas da aplicação para a folha de cálculo "Resultados".

Os resultados são assim apresentados na folha de cálculo "Resultados" onde poderão ser trabalhados pelo utilizador da forma que entender, conforme demonstra a Figura 4.3.

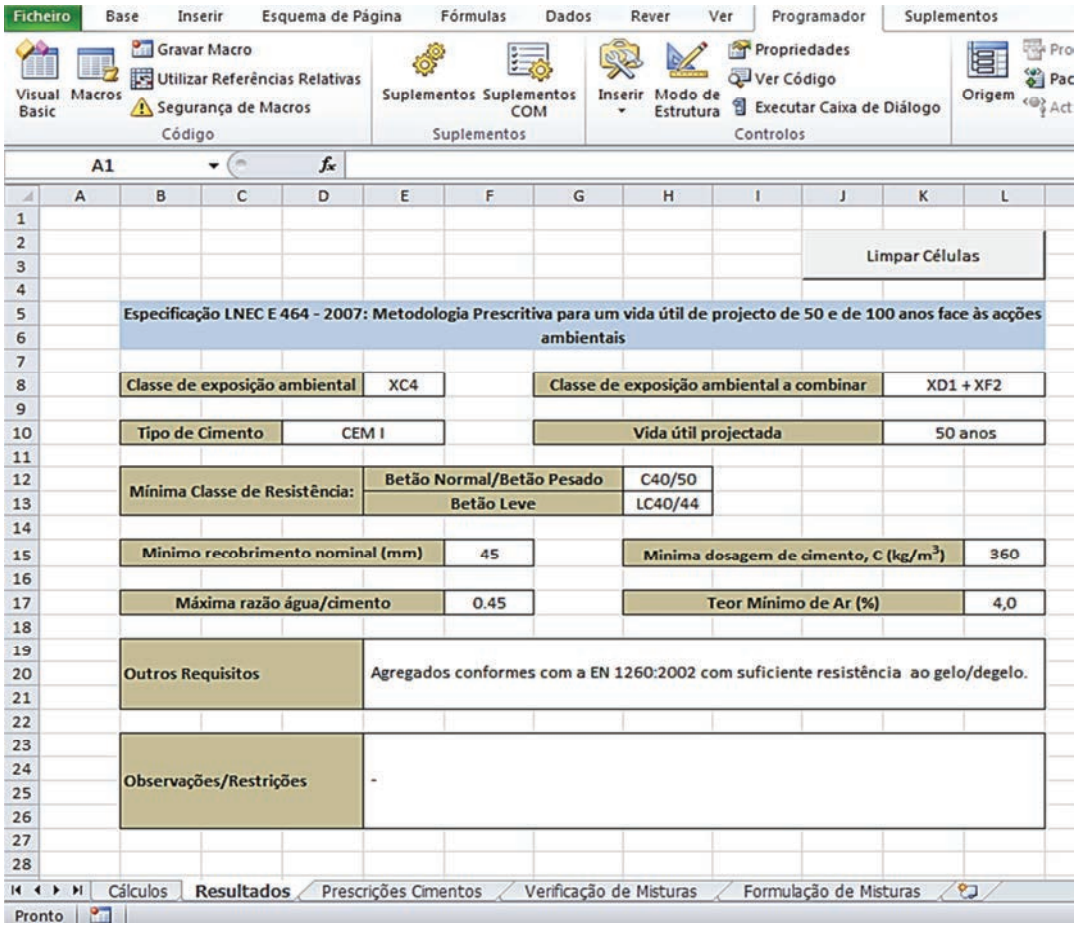


Figura 4.3 – Folha de resultados preenchida com dados.

4.1.3. CONSULTA DAS PRESCRIÇÕES POR TIPO DE CIMENTO

O acesso a esta funcionalidade da aplicação é feito através do comando "Ver Quadro" presente na janela inicial.

Conforme referido anteriormente, ao clicar neste botão o utilizador é conduzido para uma nova janela da aplicação onde poderá consultar as prescrições impostas para os 27 tipos de cimentos do Quadro 1 da NP EN 197-1 nas condições definidas. A janela desta funcionalidade tem o aspeto apresentado na Figura 4.4 e encontra-se também dividida em partes de forma a permitir uma utilização mais fluída.

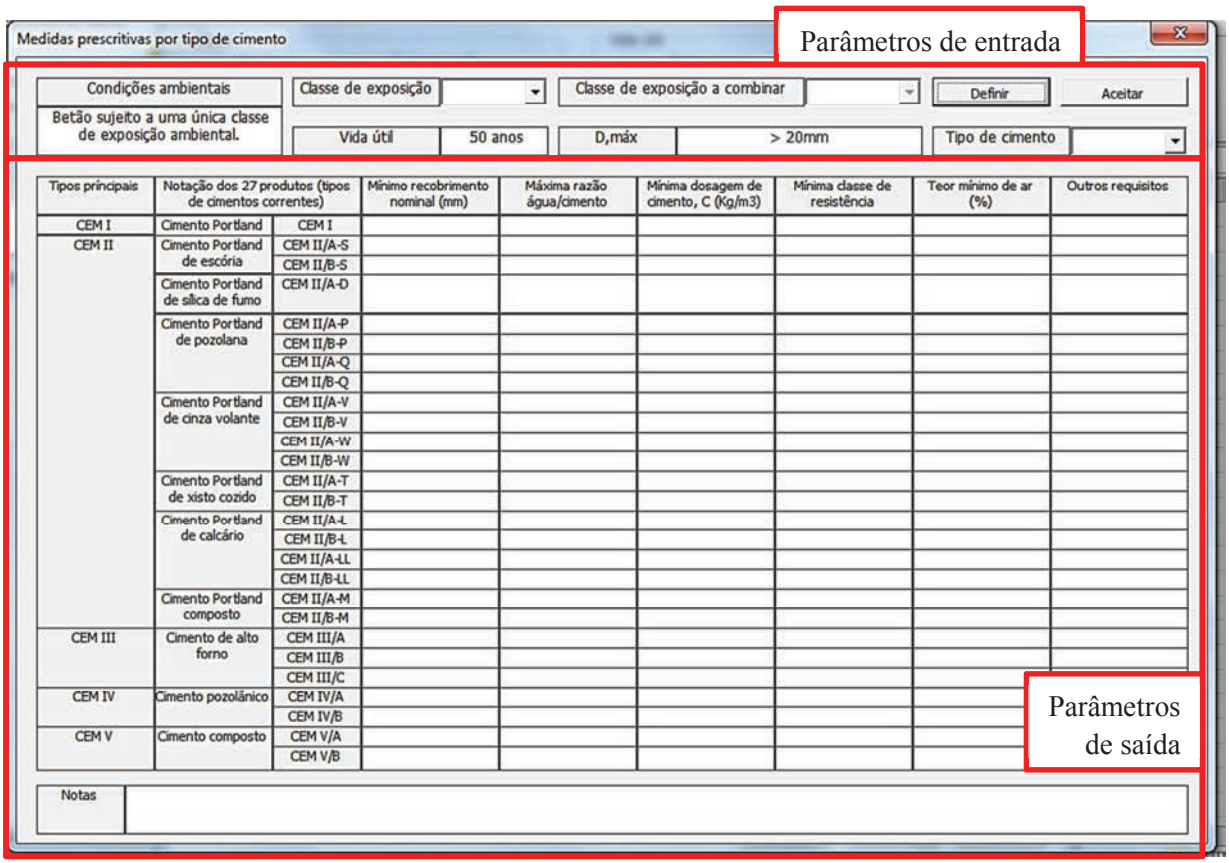


Figura 4.4 – Janela de apresentação das prescrições por tipo de cimento.

À semelhança do caso da definição expedita de prescrições, o utilizador pode variar a(s) classe(s) de exposição ambiental e consultar várias situações antes de fixar uma. Contudo a informação acerca da vida útil, combinação de classes ou dimensão máxima do agregado é importada da janela inicial pelo que para alterar estes critérios há que regressar a esta janela e proceder à alteração.

Para dar inicio à análise é necessário selecionar a(s) classe(s) de exposição ambiental em estudo.

Caso a classe já tenha sido escolhida na parte inicial a informação é importada juntamente com a relativa aos restantes critérios, caso contrário é necessário definir.

Selecionada a classe, com a ação do comando "Definir" apresentam-se as prescrições, nas condições iniciais, para os 27 tipos de cimentos do Quadro 1 da NP EN 197-1.

A tabela apresentada permite ao utilizador, de uma forma rápida, comparar as prescrições impostas, para diferentes tipos de cimento, nas condições iniciais, e selecionar o que melhor se enquadra na sua situação de projeto. Após verificar qual o tipo de cimento que pretende empregar, este deve ser selecionado.

Premindo o botão "Aceitar" o utilizador estará a concordar com as prescrições, exportando-as para a janela principal e encerrando a janela atual.

É dada também a opção de copiar a tabela diretamente para a folha de cálculo, com as prescrições para todos os tipos de cimentos, podendo servir para posterior consulta e análise.

O restante processo de cálculo é semelhante ao apresentado na secção anterior.

4.1.4. CONSULTA DAS PRESCRIÇÕES POR CLASSES NO CASO DAS COMBINAÇÕES

Perante uma situação de combinação de classes de exposição, definidas as classes a combinar, o programa automaticamente verifica as condições mais gravosas e apresenta as prescrições condicionantes para a dita combinação. Contudo como o utilizador poderá ter a necessidade de verificar como foi obtida tal situação condicionante, é-lhe dada a possibilidade de verificar isoladamente as prescrições para cada uma das classes combinadas, conforme as condições iniciais definidas.

Na janela principal, introduzidas as condições iniciais e definidas as prescrições, premindo o botão "Ver prescrições isoladas" o utilizador é conduzido a uma nova janela onde poderá verificar as prescrições que deram origem à situação condicionante (ver Figura 4.5). Destaca-se que, ao contrário dos restantes comandos que funcionam sempre, este comando só funciona se estiver selecionada a opção "Combinação" nos parâmetros de entrada.

Na nova janela apresentada o utilizador não poderá modificar os parâmetros iniciais uma vez que esta é apenas informativa das prescrições individuais para cada classe a combinar.

Prescrições de cada classe da combinação

Classes de Exposição	XC4	XD1	XF2	Condicionantes
Mínimo recobrimento nominal (mm)	40	45	-	45
Máxima razão água/cimento	0.60	0.45	0.55	0.45
Mínima dosagem de cimento, C (Kg/m3)	280	360	280	360.0
Mínima classe de resistência	C30/37 ; LC30/33	C40/50 ; LC40/44	C30/37 ; LC30/33	C40/50 ; LC40/44
Teor mínimo de ar (%)	-	-	4.0	4
Observações	-	-	Agregados conformes com a EN 12620:2002 com suficiente resistência ao gelo/degelo.	Ver notas individuais das classes.

Classe de Exposição Condicionante	XD1

OK

Figura 4.5 – Janela de apresentação das medidas prescritivas de cada classe da combinação.

4.1.5. MISTURAS E ADIÇÕES

Além da determinação das medidas prescritivas a aplicar, uma outra utilização do programa é para trabalhar misturas de cimentos e adições. A aptidão de uma mistura para ser constituinte do betão deve ser analisada de acordo o Capítulo 3 (Aptidão dos cimentos, adições e misturas como constituintes do betão) e com o Anexo A da Especificação LNEC E 464.

O programa auxilia o utilizador a comprovar a aptidão das misturas na medida em que sistematiza o processo descrito na especificação tanto para a verificação da composição de uma determinada mistura como para a formulação de uma nova mistura.

Para ter acesso a estas funcionalidades o utilizador deve carregar no botão de comando "Misturas de cimentos e adições". De notar que o acesso a esta funcionalidade pode ser direto, não necessitando o utilizador de fornecer nenhum informação prévia.

Ao pressionar o referido botão é apresentada ao utilizador uma janela de notificação acerca das condições gerais, que devem ser cumpridas para que a aptidão de uma dada mistura para ser constituinte do betão fique estabelecida, expostas no Capítulo 3 da especificação (ver Figura 4.6).

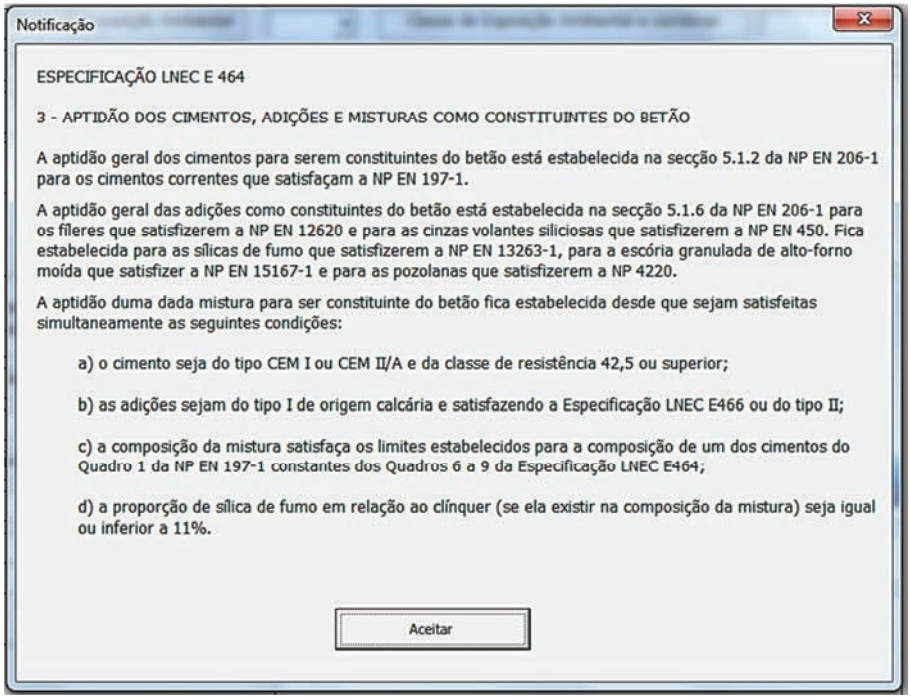


Figura 4.6 – Janela de notificação das condições gerais a serem cumpridas pelas misturas.

Ao concordar com estas condições uma outra janela é apresentada ao utilizador para que este possa escolher qual das opções de cálculo deseja realizar, isto é, se pretende fazer a verificação de uma composição de misturas existente ou se por outro lado deseja formular uma nova mistura, conforme a Figura 4.7.

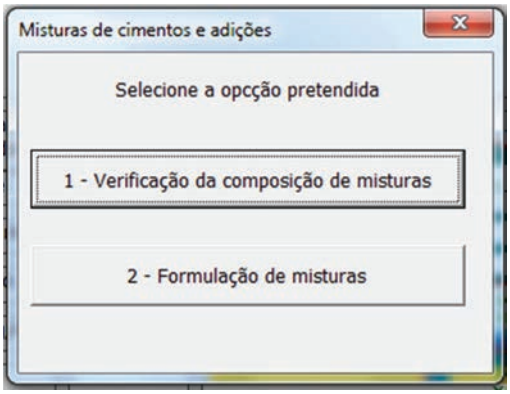


Figura 4.7 – Janela de seleção do estudo a efetuar.

Consoante a sua escolha, o utilizador será encaminhado para a respetiva funcionalidade.

4.1.5.1. VERIFICAÇÃO DA COMPOSIÇÃO DE MISTURAS

A verificação da composição de misturas segue, conforme dito na apresentação do modelo de cálculo, o processo de cálculo por etapas/fases como apresentado no Anexo A da especificação LNEC E 464. Estas etapas do cálculo são apresentadas ao utilizador sob a forma de abas no objeto gráfico, de modo a que este possa, em qualquer altura do processo, visualizar o desenvolvimento do mesmo.

A janela correspondente a esta funcionalidade da aplicação é ilustrada na Figura 4.8.

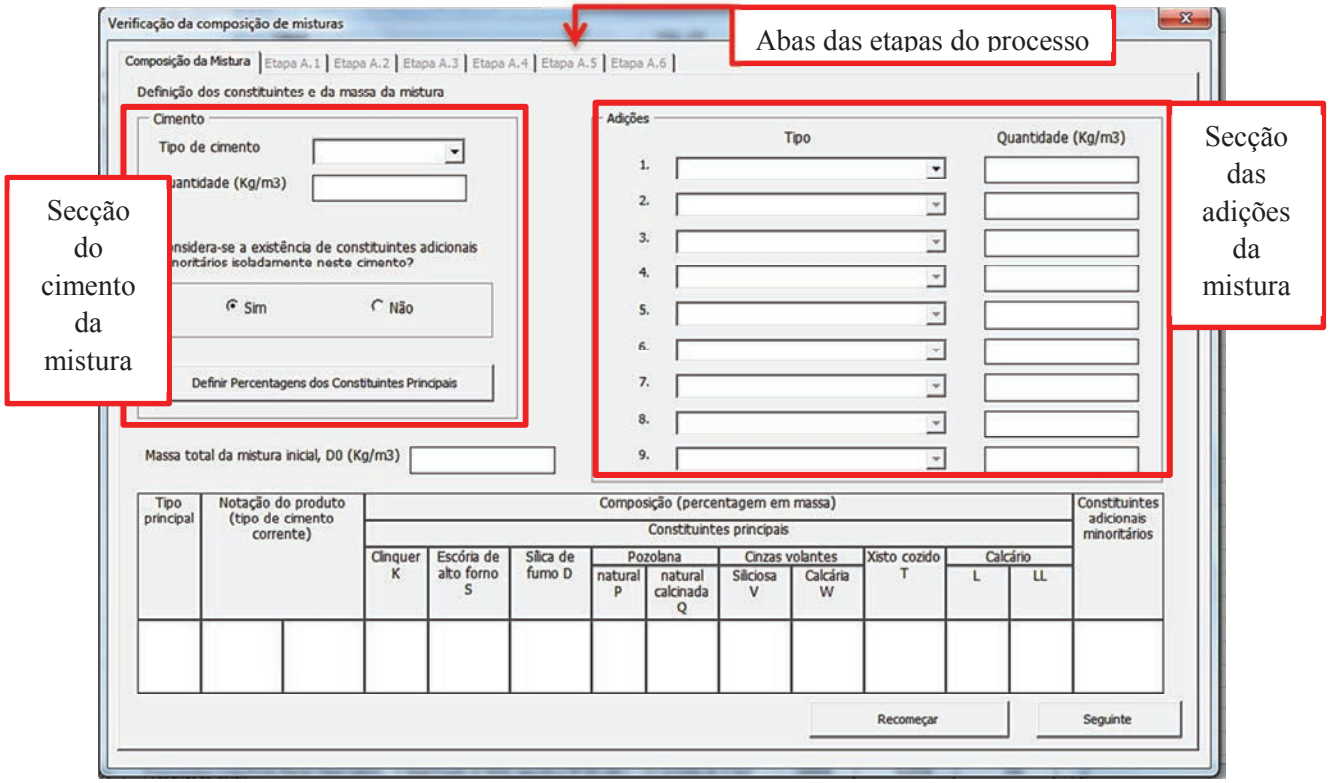


Figura 4.8 – Janela de início da verificação da composição de misturas.

Esta janela também se encontra dividida em secções de modo a facilitar a introdução dos dados pelo utilizador, sendo estas referentes ao cimento e às adições existentes na mistura.

O utilizador deve introduzir o tipo e respetiva quantidade de cimento existente na mistura, assim como o tipo de adições e respetivas quantidades. O número de adições a serem incorporadas na mistura é limitado pela aplicação a um máximo de 9, em conformidade com o número de constituintes principais dos tipos de cimentos presentes no Quadro 1 da NP EN 197-1.

Antes de prosseguir para a próxima etapa o utilizador precisa de definir a composição do cimento existente na mistura, através das percentagens dos seus constituintes. Para isso deverá pressionar o botão de comando "Definir percentagens dos constituintes principais" e definir, na nova janela aberta (ver Figura 4.9), a composição do cimento existente na mistura de acordo com os limites impostos pela NP EN 197-1.

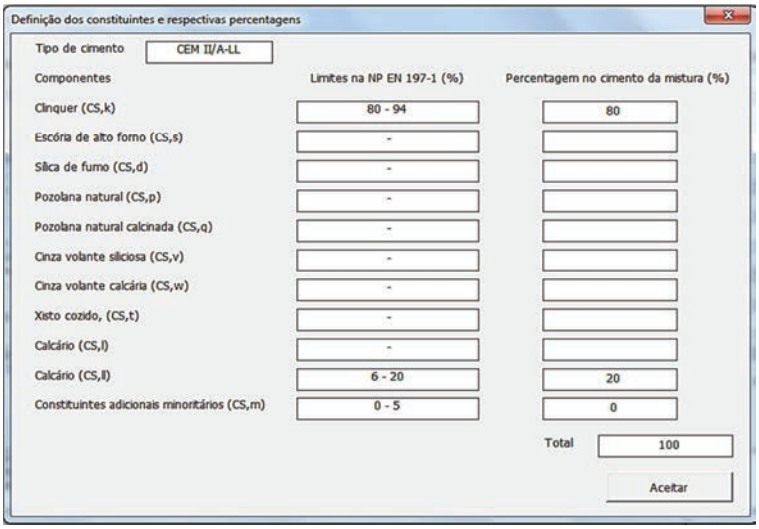
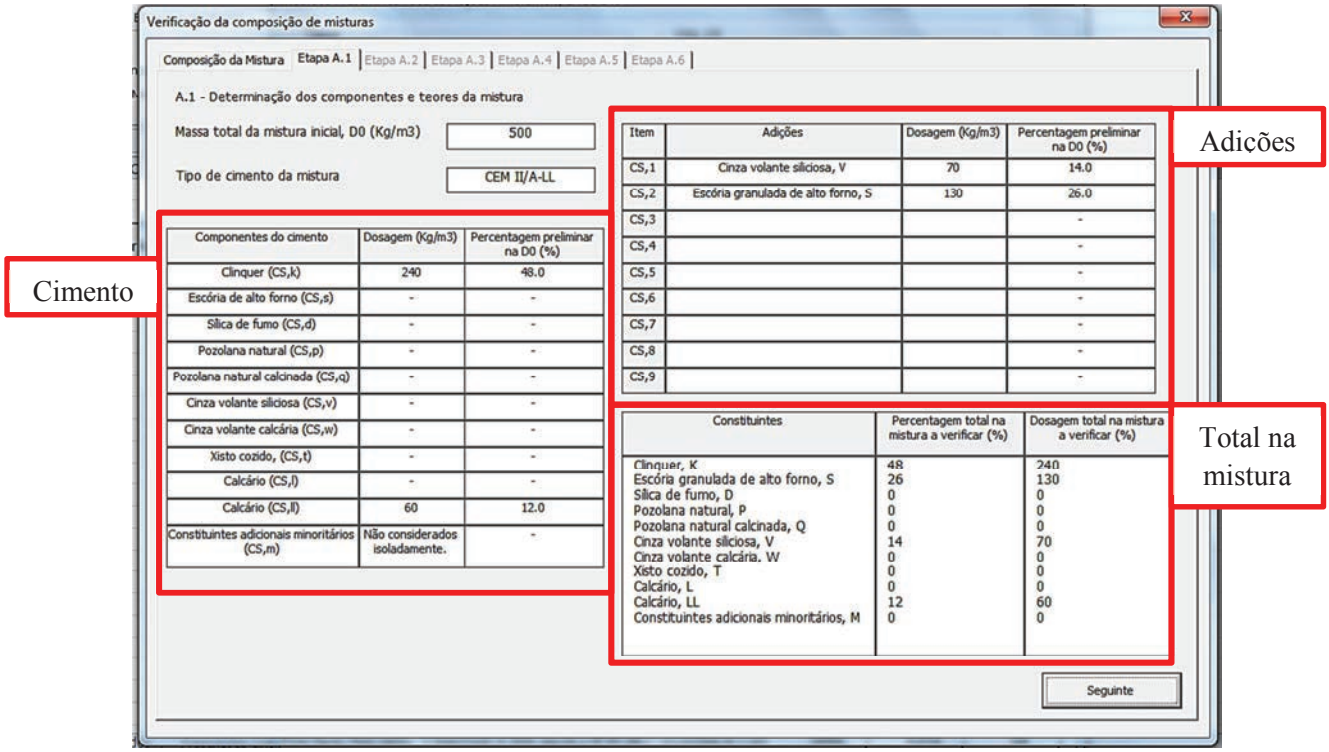


Figura 4.9 – Definição da composição do tipo de cimento existente na mistura.

Após a definição da composição do cimento existente na mistura e das adições, prossegue-se para a etapa A.1 carregando no botão "Seguinte". Os dados podem ser sempre redefinidos carregando o botão de comando "Recomeçar".

A etapa A.1 apresenta ao utilizador a listagem dos constituintes da mistura e a sua relevância na mistura (percentagem do componente em relação ao total da mistura) conforme apresenta a Figura 4.10. Servindo apenas de consulta, nesta aba a única ação a efetuar pelo utilizador será verificar a listagem e avançar para a etapa A.2 pressionando o botão "Seguinte".



Componentes do cimento	Dosagem (Kg/m3)	Percentagem preliminar na D0 (%)
Clinquer (CS,k)	240	48.0
Escória de alto forno (CS,s)	-	-
Sílica de fumo (CS,d)	-	-
Pozolana natural (CS,p)	-	-
Pozolana natural calcinada (CS,q)	-	-
Cinza volante siliciosa (CS,v)	-	-
Cinza volante calcária (CS,w)	-	-
Xisto cozido, (CS,t)	-	-
Calcário (CS,l)	-	-
Calcário (CS,ll)	60	12.0
Constituintes adicionais minoritários (CS,m)	Não considerados isoladamente.	-

Item	Adições	Dosagem (Kg/m3)	Percentagem preliminar na D0 (%)
CS,1	Cinza volante siliciosa, V	70	14.0
CS,2	Escória granulada de alto forno, S	130	26.0
CS,3			-
CS,4			-
CS,5			-
CS,6			-
CS,7			-
CS,8			-
CS,9			-

Constituintes	Percentagem total na mistura a verificar (%)	Dosagem total na mistura a verificar (%)
Clinquer, K	48	240
Escória granulada de alto forno, S	26	130
Sílica de fumo, D	0	0
Pozolana natural, P	0	0
Pozolana natural calcinada, Q	0	0
Cinza volante siliciosa, V	14	70
Cinza volante calcária. W	0	0
Xisto cozido, T	0	0
Calcário, L	0	0
Calcário, LL	12	60
Constituintes adicionais minoritários, M	0	0

Figura 4.10 – Etapa A.1: determinação dos componentes e teores da mistura.

Segue-se a etapa A.2 onde é apresentada ao utilizador a possibilidade de selecionar a qual dos tipos de cimentos correntes deve a mistura ser equivalente (ver Figura 4.11).

Para a massa e composição da mistura definidas, a aplicação verifica os tipos de cimentos que correspondem diretamente à mistura, através da comparação das percentagens dos constituintes na mistura com os limites da NP EN 197-1. Caso houver correspondência o(s) tipo(s) de cimento em causa apresenta(m)-se numa lista. Selecionando um tipo de cimento da lista o utilizador considera o ligante como equivalente ao cimento e é encaminhado para a parte final do programa pois a verificação é satisfeita. Se não houver correspondência direta entre a mistura e o tipo de cimento prossegue-se a verificação para a próxima etapa.

A aplicação apresenta ainda na etapa A.2 toda a informação relativa à correspondência ou não dos constituintes da mistura no cimento equivalente selecionado.

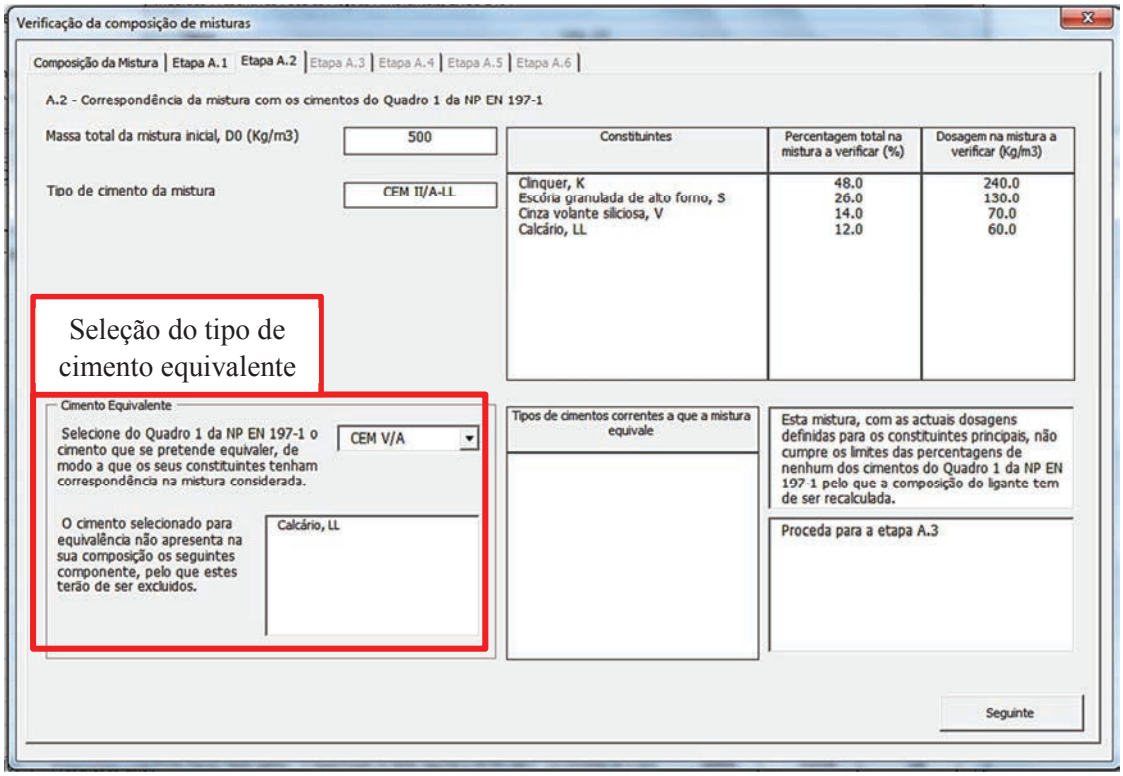


Figura 4.11 – Etapa A.2: Correspondência da mistura com os cimentos da NP EN 197-1.

Na etapa A.3 é apresentada a determinação da dosagem de ligante preliminar, assim como a quantidade máxima e mínima de ligante para cada componente da mistura que faça parte dos constituintes principais do cimento selecionado na etapa A.2 (ver Figura 4.12).

À semelhança da etapa A.1, para esta etapa A.3 a única ação a ser desenvolvida pelo utilizador será a de consultar os resultados do cálculo interno da aplicação e de avançar para a próxima etapa.

Esta etapa é também importante porque define qual o caminho a ser seguido no restante processo, ou seja se a etapa seguinte será a etapa A.4 ou A.5, consoante a relação entre a dosagem de ligante preliminar e a massa inicial da mistura.

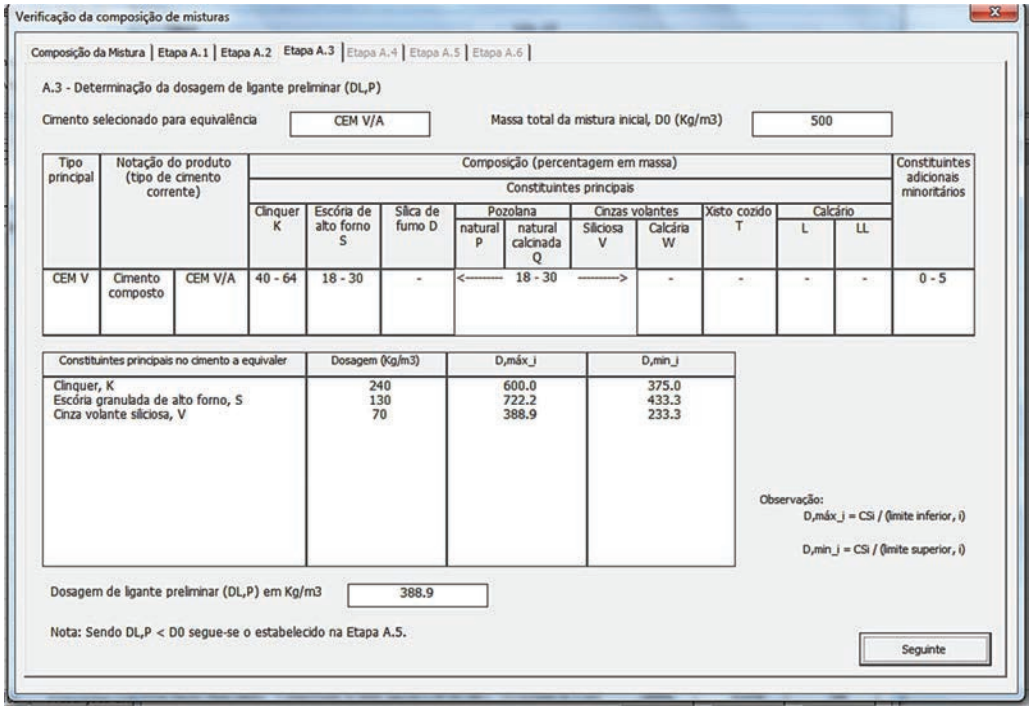


Figura 4.12 – Etapa A.3: Determinação da dosagem de ligante preliminar.

Na etapa A.4 é apresentada a lista dos constituintes cuja dosagem terá de ser alterada de modo a que a mistura verifique a composição do cimento equivalente selecionado, conforme a Figura 4.13.

Mais uma vez é apresentado ao utilizador somente o resultado do cálculo interno da aplicação.

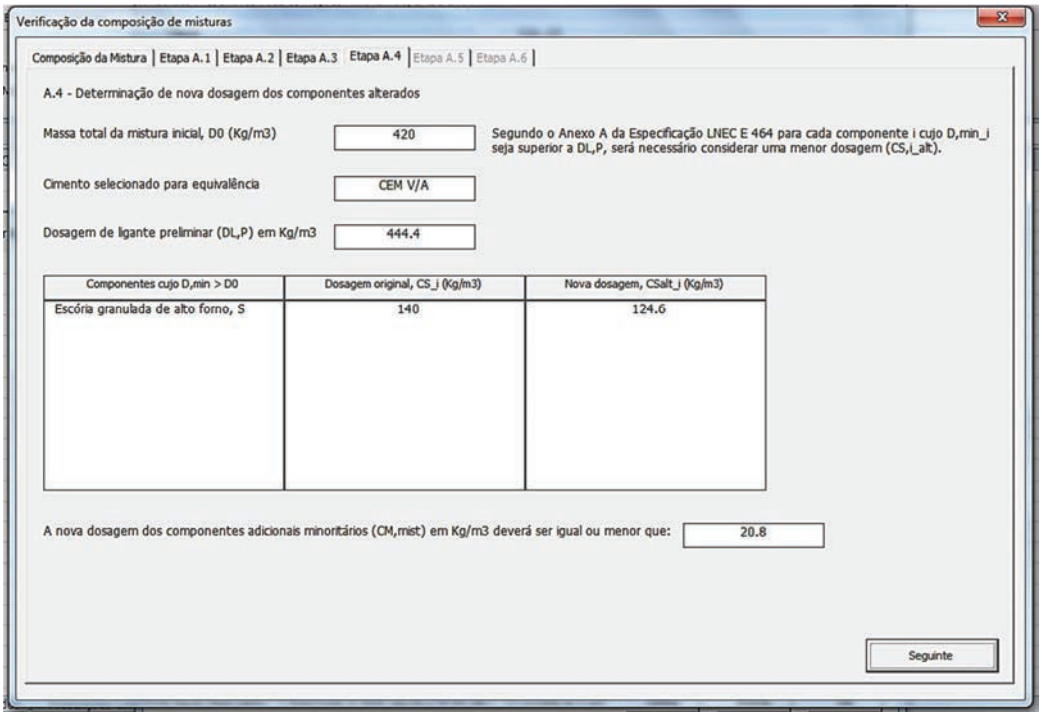


Figura 4.13 – Etapa A.4: Determinação da nova dosagem dos componentes alterados.

Alteradas as dosagens dos componentes prossegue-se para a última etapa, A.6, através do botão "Seguinte".

Caso tenha sido a etapa A.5 a seguinte à etapa A.3 é também efetuada uma alteração nas dosagens de alguns constituintes de modo a verificar a composição do cimento selecionado. Embora esta alteração seja feita de forma diferente em relação à etapa A.4. também na etapa A.5 só é apresentado ao utilizador o resultado do cálculo interno da aplicação (ver Figura 4.14).

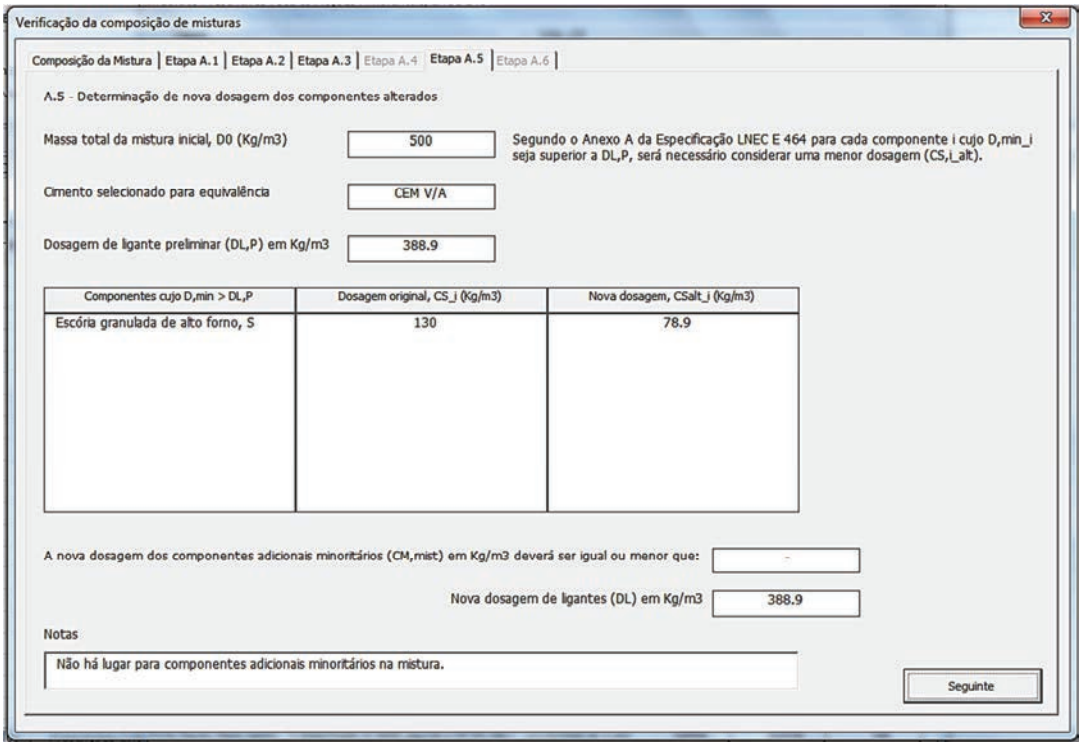


Figura 4.14 – Etapa A.5: Determinação da nova dosagem dos componentes alterados.

Feitas as alterações às dosagens quer na etapa A.4 como na etapa A.5 o utilizador é conduzido à etapa final, A.6, onde encontrará a composição final da mistura que será equivalente ao cimento escolhido na etapa A.2. É apresentada, além da composição detalhada com constituintes, dosagens e percentagens na mistura, a dosagem final da mistura, o cimento a que é equivalente assim como eventuais quantidades da mistura que não puderam ser considerados como ligante.

Pela análise do processo descrito, constata-se que desde a etapa A.3 até à A.6 o utilizador não interfere no cálculo realizado. A consequência disso é que no final da verificação o utilizador poderá deparar-se com uma composição que não corresponde aos seus interesses. Para salvaguardar esta situação, e evitar uma imposição da aplicação na etapa A.6, é dada ao utilizador a possibilidade de realizar alguns acertos na composição. Carregando no botão "Ajustar Composição" o utilizador é encaminhado para uma janela onde poderá efetuar ajustes tanto ao nível das dosagens como ao nível das percentagens na mistura, para a tornar melhor moldada aos materiais de que dispõem. Estes ajustes só podem ser feitos desde que respeitem os limites impostos à constituição do cimento pela NP EN 197-1.

A janela correspondente à Etapa A.6 está ilustrada na Figura 4.15.

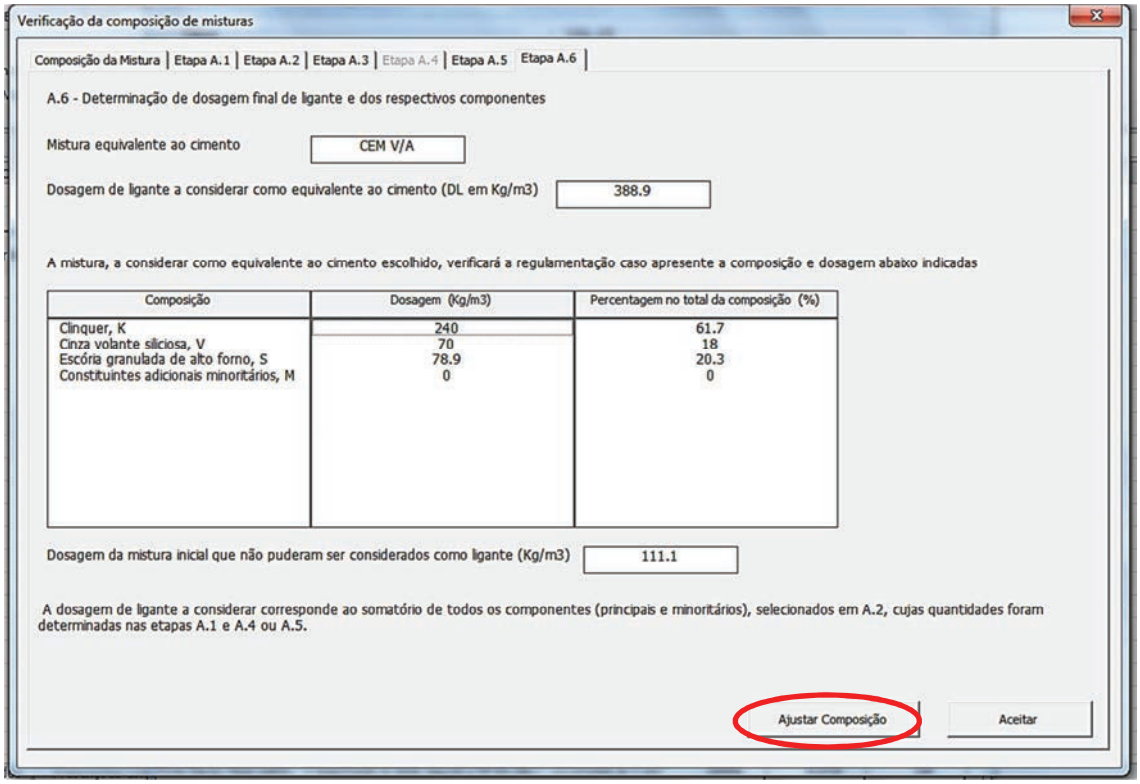


Figura 4.15 – Etapa A.6: Apresentação da dosagem final de ligante e respetivos componentes.

Esta funcionalidade de ajustar a composição justifica-se também pelo facto de esta funcionalidade dar ao utilizador a opção de fazer uso da sua sensibilidade e experiência na matéria para aprimorar a solução do programa (Figura 4.16).

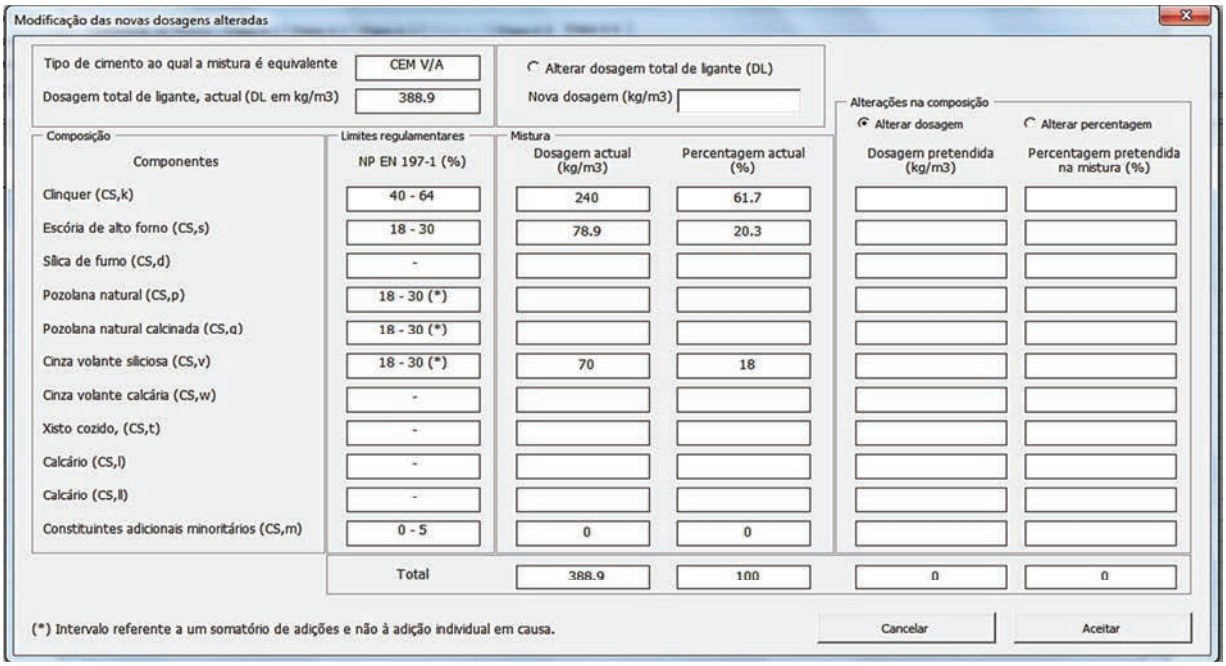


Figura 4.16 – Ajuste da composição do cimento equivalente.

O botão "Aceitar" permite exportar os resultados da verificação diretamente para a folha de cálculo "Verificação de misturas".

4.1.5.2. FORMULAÇÃO DE MISTURAS

A parte da "Formulação de misturas" está organizada de forma semelhante ao apresentado anteriormente para a parte da "Verificação da composição de misturas". O utilizador interage com uma nova janela onde o processo é exibido em abas conforme a etapa onde este se encontrar (Figura 4.17).

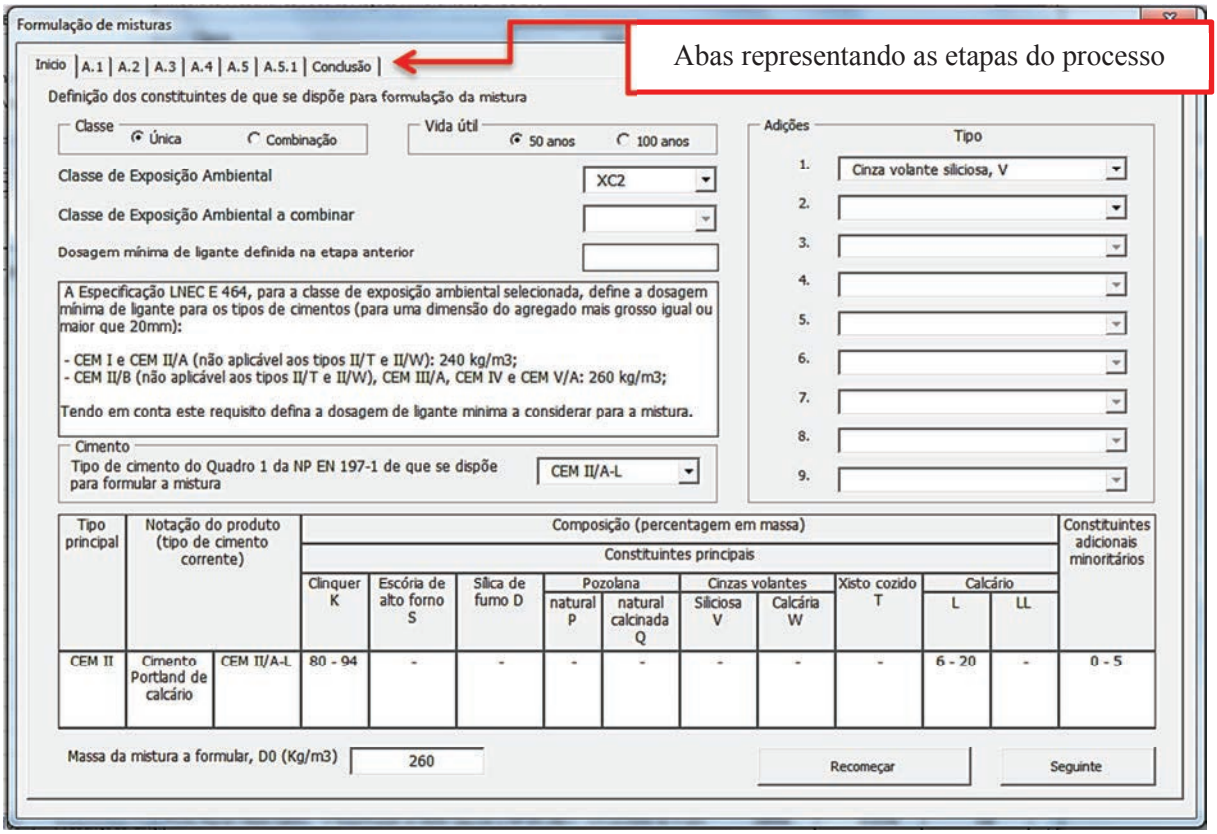


Figura 4.17 – Janela de início da formulação de misturas.

A janela inicial encontra-se dividida em três secções distintas, nomeadamente:

- definição das condições iniciais (vida útil e classe(s) de exposição ambiental), onde o utilizador especifica quais as condições onde irá empregar a mistura. Caso estas condições tenham sido definidas na janela principal, estes dados são importados daquela janela (assim como a dosagem de ligante mínima). Para o restante processo de cálculo estas informações não são obrigatórias, servindo apenas de auxílio na definição da dosagem de ligante a considerar para a mistura.
- definição do tipo de cimento e adições a empregar na mistura.
- definição da massa da mistura a formular.

Introduzidos os dados dos materiais disponíveis para formular a mistura avança-se para a etapa A.1 ao pressionar no botão "Seguinte". Caso se detete algum erro, ou seja necessário repetir o processo de cálculo a partir do início, deve pressionar-se o botão "Recomeçar".

É importante referir que numa tentativa de não deixar o utilizador perder-se a meio do processo de cálculo automático, além da apresentação em abas que permite sempre regressar ao ponto anterior, são também apresentados, ao longo do processo e em cada nova etapa, os resultados parciais acumulados das etapas anteriores. Assim, na etapa A.1 é apresentado ao utilizador a dosagem de ligante, o cimento disponível para empregar na mistura e a listagem das adições definidos na etapa A.1.

A ação do utilizador na etapa A.1 consiste em definir qual o tipo de cimento que se pretende equivaler com a formulação da mistura. A aba representativa desta etapa é ilustrada na Figura 4.18.

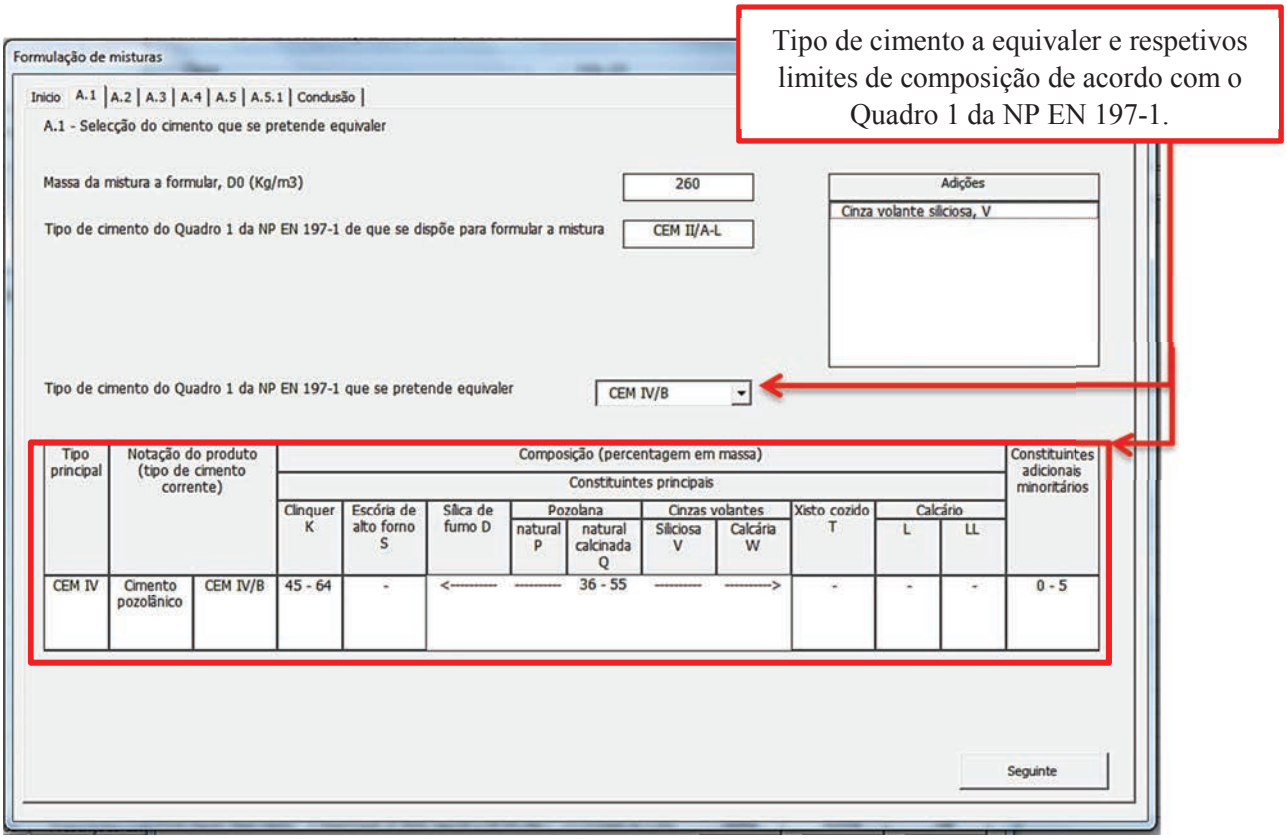


Figura 4.18 – Etapa A.1: Seleção do tipo de cimento a equivaler.

Selecionado o tipo de cimento a equivaler prossegue-se o cálculo avançando para a etapa A.2 através do botão "Seguinte". A etapa A.2 apresenta as informações acumuladas da etapa inicial e da etapa A.1 na parte superior da janela e os limites da percentagem de clínquer para o cimento a equivaler, conforme ilustrada na Figura 4.19. Respeitando o intervalo, cabe ao utilizador definir a percentagem exata de clínquer a estar presente no cimento equivalente.

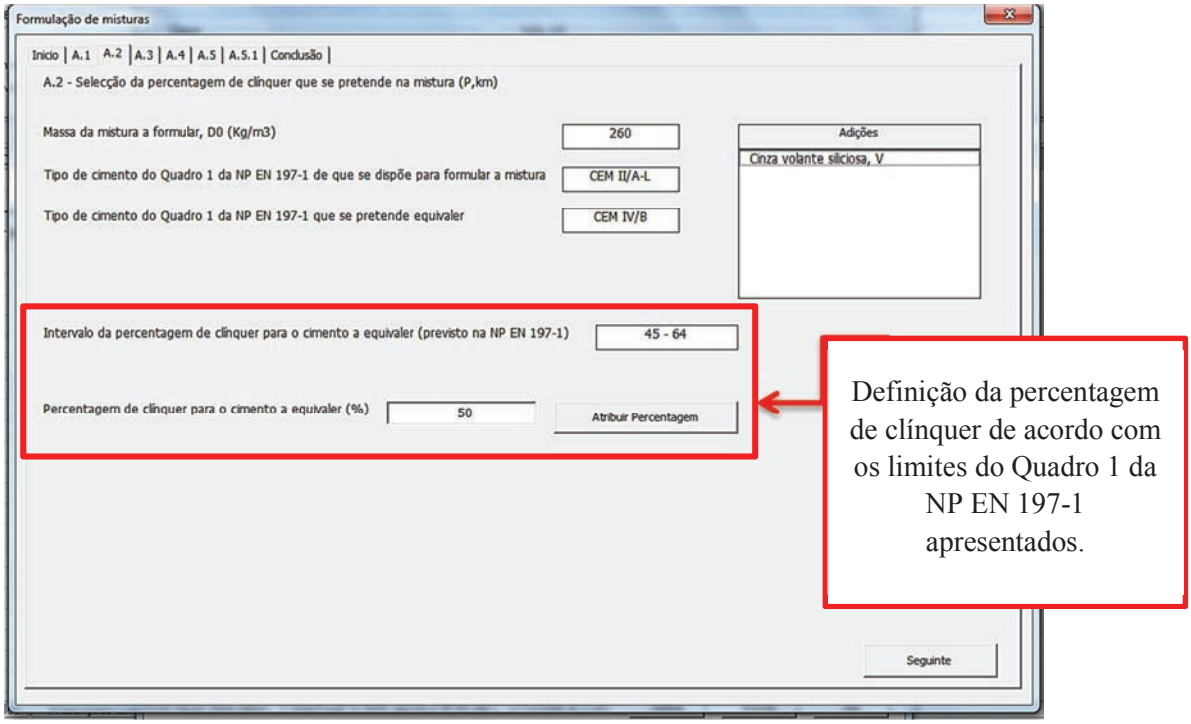


Figura 4.19 – Etapa A.2: Seleção da percentagem de clínquer que se pretende na mistura.

A definição desta percentagem de clínquer é feita pressionando o botão "Atribuir Percentagem" presente na aba. Definida a percentagem de clínquer no cimento a equivaler segue-se a etapa A.3. Nesta etapa é apresentada a dosagem de clínquer da mistura consoante a percentagem atribuída na etapa anterior (ver Figura 4.20).

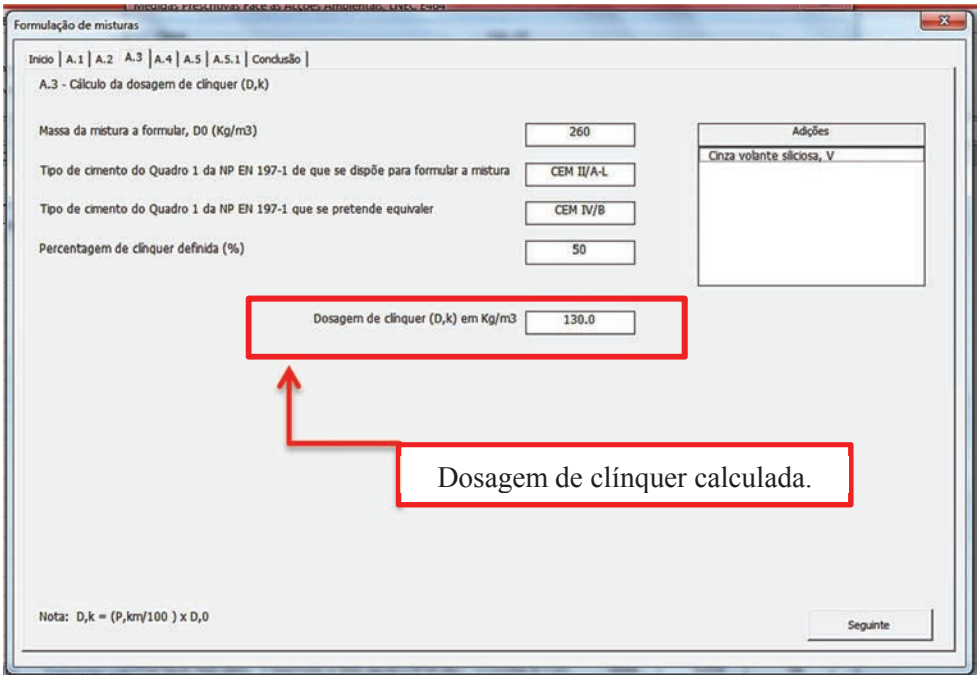


Figura 4.20 – Etapa A.3: Cálculo da dosagem de clínquer.

Não sendo requerida nenhuma ação do utilizador nesta etapa, este deve avançar para a próxima etapa, após conferir os dados apresentados.

A etapa A.4 (Figura 4.21) apresenta a dosagem total do cimento a utilizar na mistura e a dosagem dos restantes constituintes do cimento a utilizar além do clínquer. Mais uma vez o utilizador não necessita de efetuar qualquer tipo de ação, sendo-lhe apresentados os resultados dos cálculos internos já realizados pela aplicação.

Conferido os novos dados apresentados avança-se para a etapa A.5 no botão "Seguinte".

Na etapa A.5 (Figura 4.22) é calculada e apresentada ao utilizador a dosagem total de adições que podem ser empregues na mistura. Inicialmente a aplicação assume que não vão estar presentes constituintes adicionais minoritários na mistura, logo, caso o utilizador os queira considerar, deve indicar isso ao programa juntamente com a percentagem pretendida (até um máximo de 5%). Introduzindo esta informação a aplicação ajusta automaticamente o total das adições e dos constituintes adicionais minoritários de modo a verificar a dosagem de ligante estabelecida.

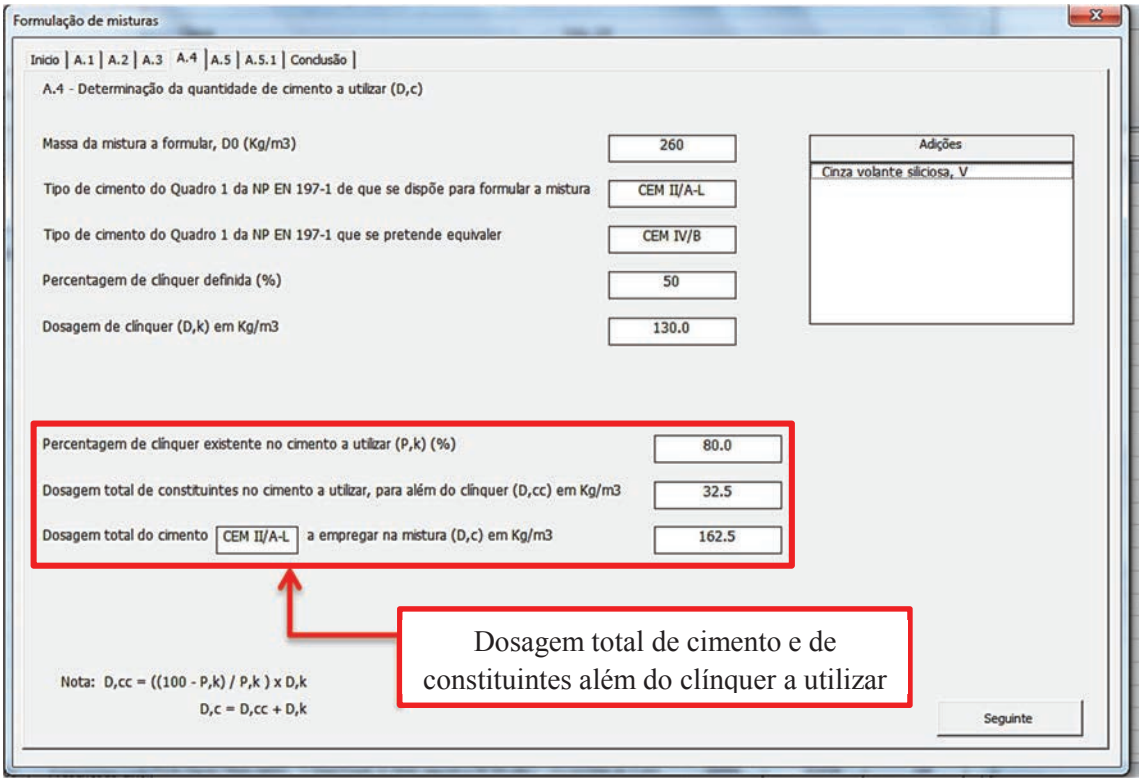


Figura 4.21 – Etapa A.4: Determinação da quantidade de cimento a utilizador.

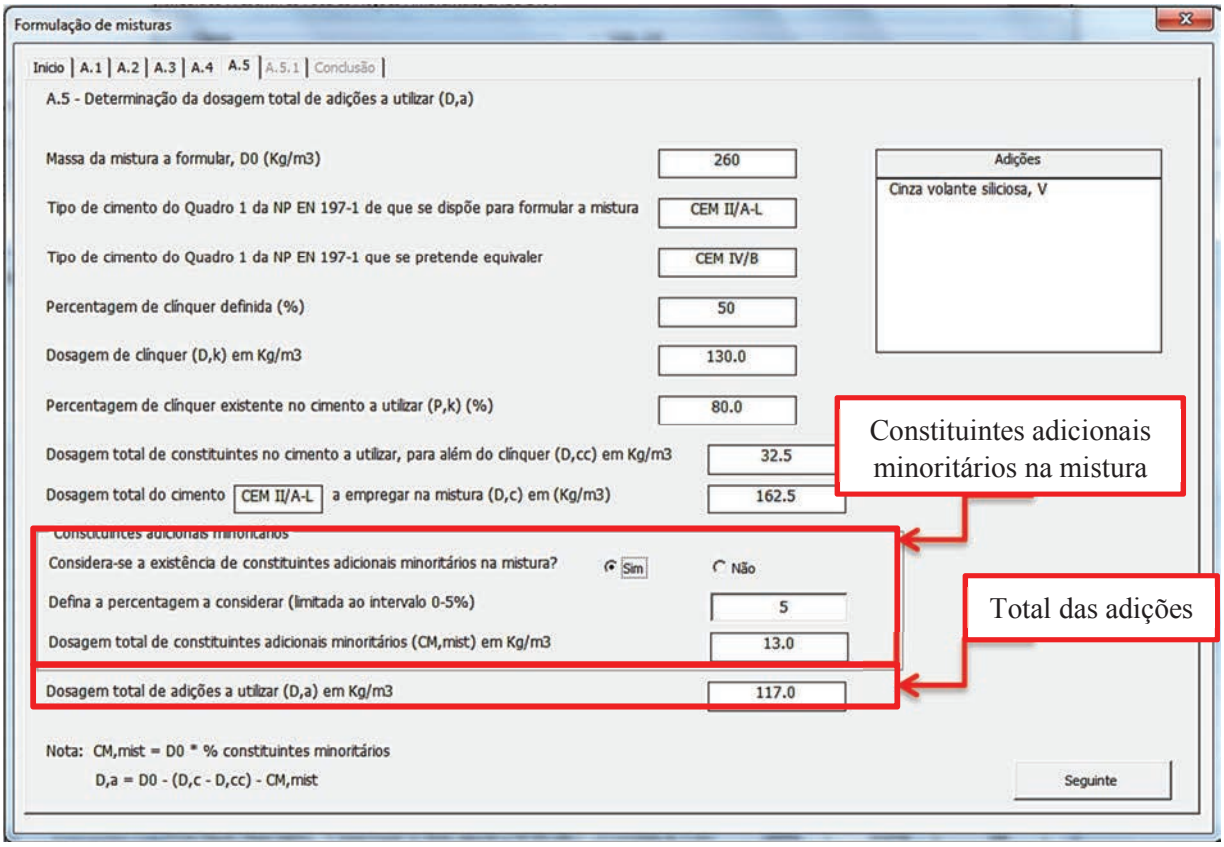


Figura 4.22 – Etapa A.5: Determinação da dosagem total de adições a utilizar.

Acertada a questão da existência ou não dos constituintes adicionais minoritários no cimento equivalente, segue-se o processo de cálculo para a próxima etapa.

Depois da etapa A.5, obtidas as dosagens totais a utilizar do cimento, das adições e dos constituintes adicionais minoritários o utilizador é encaminhado à uma etapa extra da aplicação, que não está presente na Especificação LNEC E 464. Esta etapa, designada como A.5.1 (Figura 4.23) tem o mesmo propósito do botão "Ajustar Composição" introduzida na verificação da composição de misturas.

Aqui o utilizador poderá efetuar ajustes à composição, com base nos cálculos anteriores, de modo a melhor adequar a composição às suas necessidades. Estes ajustes tanto podem ser feitos pressionando o botão "Alterar percentagens" como nos botões de rotação presentes na aba. Qualquer modificação ou ajuste que o utilizador faça é sempre verificado pela aplicação de modo a cumprir os limites regulamentares.

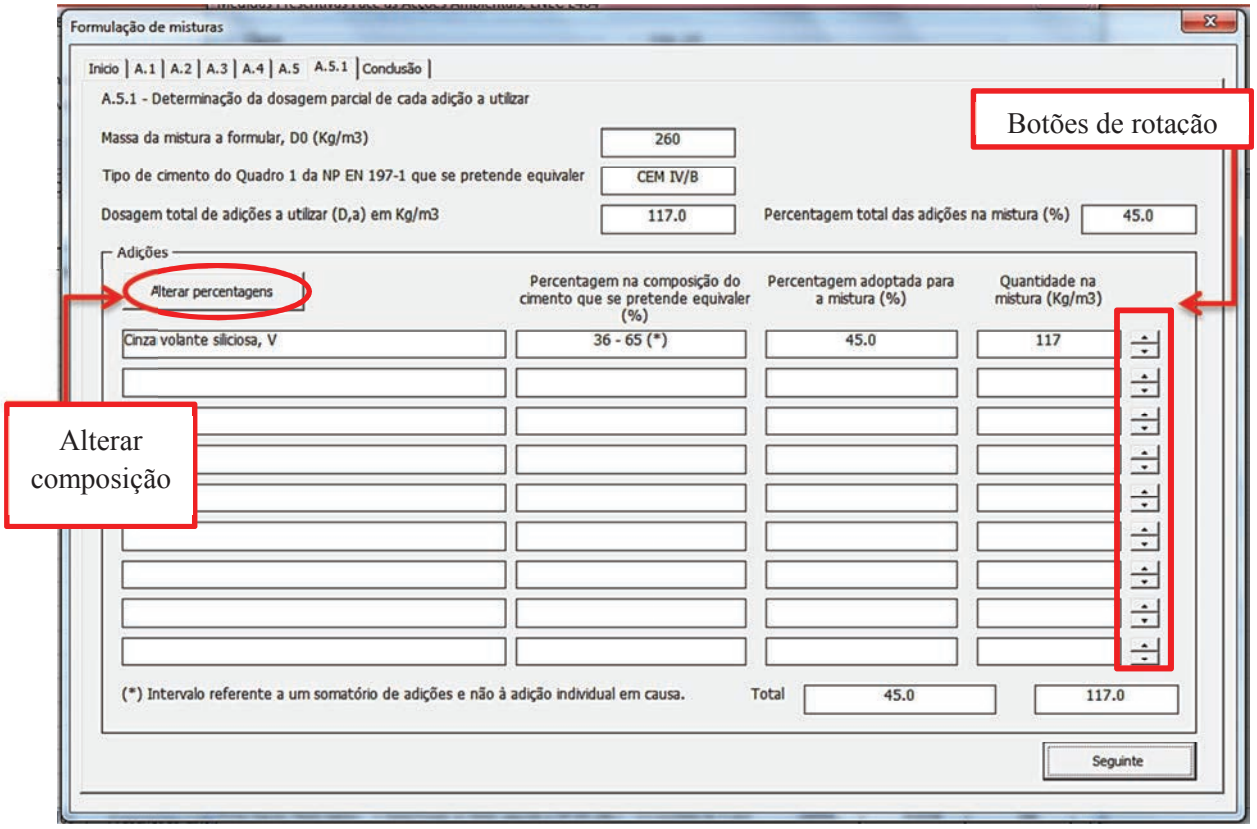


Figura 4.23 – Etapa A.5.1: Determinação da dosagem parcial de cada adição a utilizar.

Depois de ajustada a composição, prossegue-se para a última etapa do processo pressionando o botão "Seguinte".

A última aba da janela (Figura 4.24) apresenta a composição final da mistura que será equivalente ao tipo de cimento selecionado.

O utilizador poderá aceitar a composição apresentada e exportar os dados para a folha de cálculo "Formulação de Misturas" (Figura 4.25) com o comando "Aceitar", ou voltar à etapa final e recomeçar o cálculo.

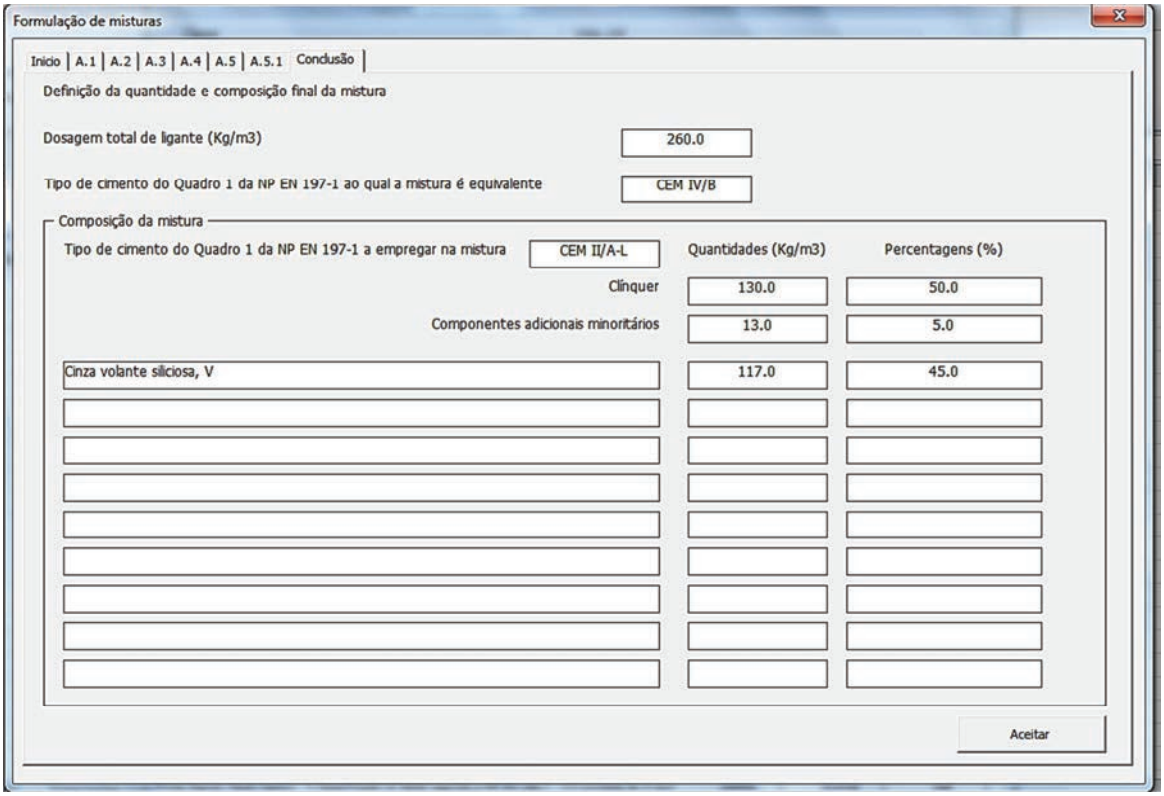


Figura 4.24 – Etapa Final: Definição da quantidade e composição final da mistura.

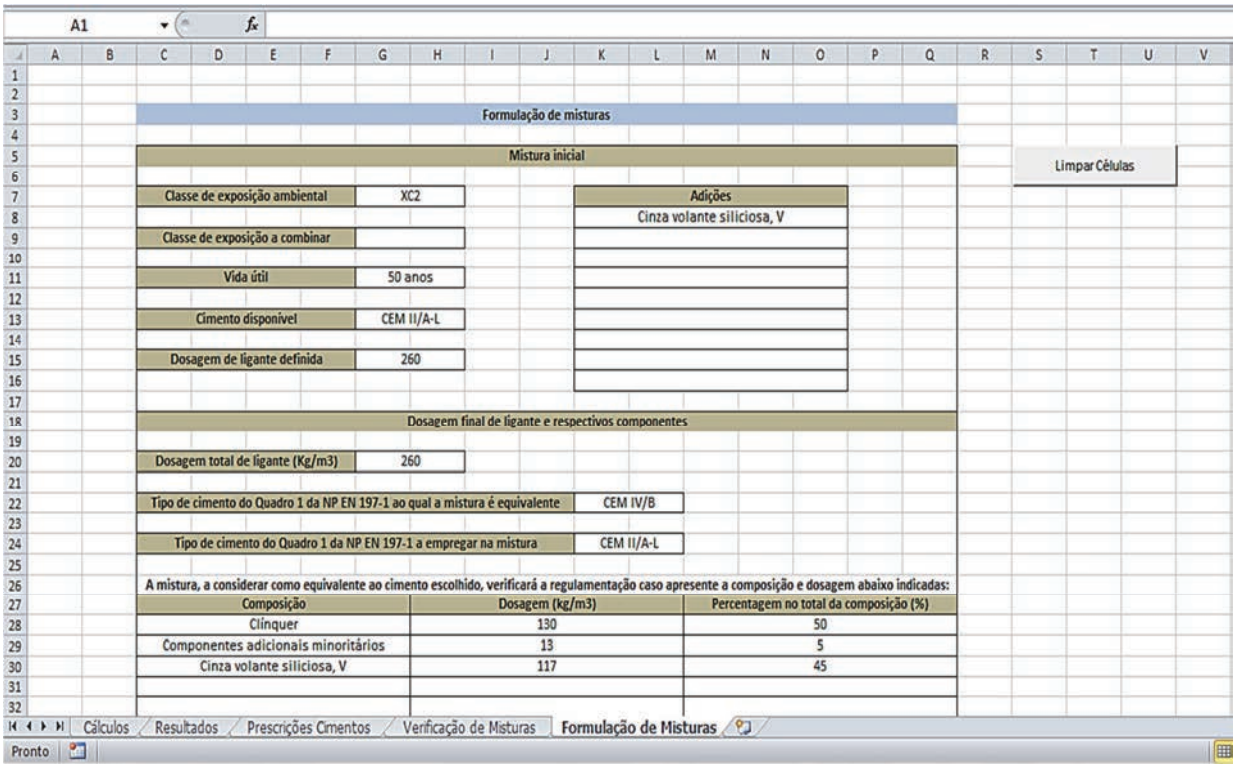


Figura 4.25 – Resultados na folha de cálculo “Formulação de Misturas”.

4.2. METODOLOGIA BASEADA NO DESEMPENHO DA ESPECIFICAÇÃO LNEC E 465

Esta secção apresenta, passo a passo, o procedimento a ser seguido na utilização da aplicação, para estimar as propriedades de desempenho do betão armado ou pré-esforçado, sujeito à ação do dióxido de carbono ou dos cloretos, que permitem satisfazer a vida útil pretendida, de acordo com a Especificação LNEC E 465.

Apresenta também a funcionalidade da aplicação que, utilizando a metodologia presente na especificação, permite estimar o tempo de vida útil da estrutura com base em propriedades do desempenho obtidas em ensaios laboratoriais.

4.2.1. INÍCIO

O acesso a esta aplicação é feito através do ficheiro correspondente à Especificação LNEC E 465 ilustrado na Figura 4.1. Neste ficheiro é apresentado ao utilizador a folha de cálculo onde é desenvolvida a aplicação, sendo a formatação semelhante à Especificação LNEC E 464 ilustrada nas Figuras 3.4 e 3.5.

O livro de cálculo é constituído assim por uma folha inicial que dá acesso à aplicação propriamente dita, e por folhas de resultado que apresentam os resultados da aplicação no livro.

Com o pressionar do comando apresentado na primeira folha de cálculo dá-se início ao processo de cálculo.

Em primeiro lugar o utilizador é confrontado com uma janela onde deverá indicar qual o processo de cálculo que deseja prosseguir, isto é, caso pretende estimar as propriedades de desempenho do betão armado ou pré-esforçado que permitem satisfazer a vida útil pretendida, ou estimar o tempo de vida útil da estrutura com base em propriedades do desempenho obtidas em ensaios laboratoriais. A tomada de decisão é feita pressionando o respetivo comando de cálculo, conforme indica a Figura 4.26.

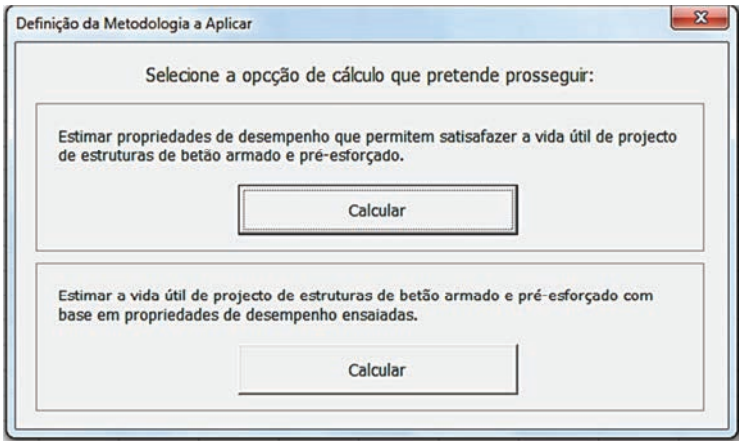


Figura 4.26 – Seleção da opção de cálculo a efetuar.

Consoante o procedimento de cálculo escolhido, o utilizador é encaminhado para a respetiva janela da aplicação que o permite realizar.

4.2.2. ESTIMATIVA DE PROPRIEDADES DE DESEMPENHO QUE PERMITEM SATISFAZER A VIDA ÚTIL DE PROJETO PARA ESTRUTURAS DE BETÃO ARMADO E PRÉ-ESFORÇADO

Semelhante aos processos de verificação e formulação de misturas da aplicação referente à Especificação LNEC E 464 já apresentados, para a aplicação de cálculo relativa à Especificação LNEC E 465 também o processo desenvolve-se em janelas apresentando abas que permitem controlar o avanço do mesmo. Esta organização mostra ser a mais adequada, pois visto a metodologia adotada não ser direta, progredindo por cálculos separados de determinados parâmetros, esta divisão por abas representando o processo continuo até ao objetivo final, permite acompanhar de melhor forma a metodologia. Assim o utilizador não será confrontando por janelas diferentes mas antes a apenas uma janela com diferentes abas transitáveis.

A aplicação apresenta abas de recolha de informação sobre a estrutura, ou seja, dados de entrada, fornecidos pelo utilizador, e outras abas onde serão apresentados apenas os resultados do processo de cálculo para análise do utilizador.

A primeira imagem do processo apresentada ao utilizador corresponde precisamente a uma das abas de entrada de dados, respeitante a um dos parâmetros mais importantes para o desenvolvimento do processo, a classe de exposição ambiental da estrutura. A par da listagem das classes de exposição ambiental é apresentada a descrição e os exemplos informativos relativos a estas classes de acordo com a Especificação LNEC E 464.

Além da definição da classe, o utilizador deve especificar outras condições da estrutura, quando tal for aplicável, nomeadamente, a distância à linha da costa para a classe XS1, a profundidade para a classe XS2 e o ambiente/região para as classes XC1 e XC4.

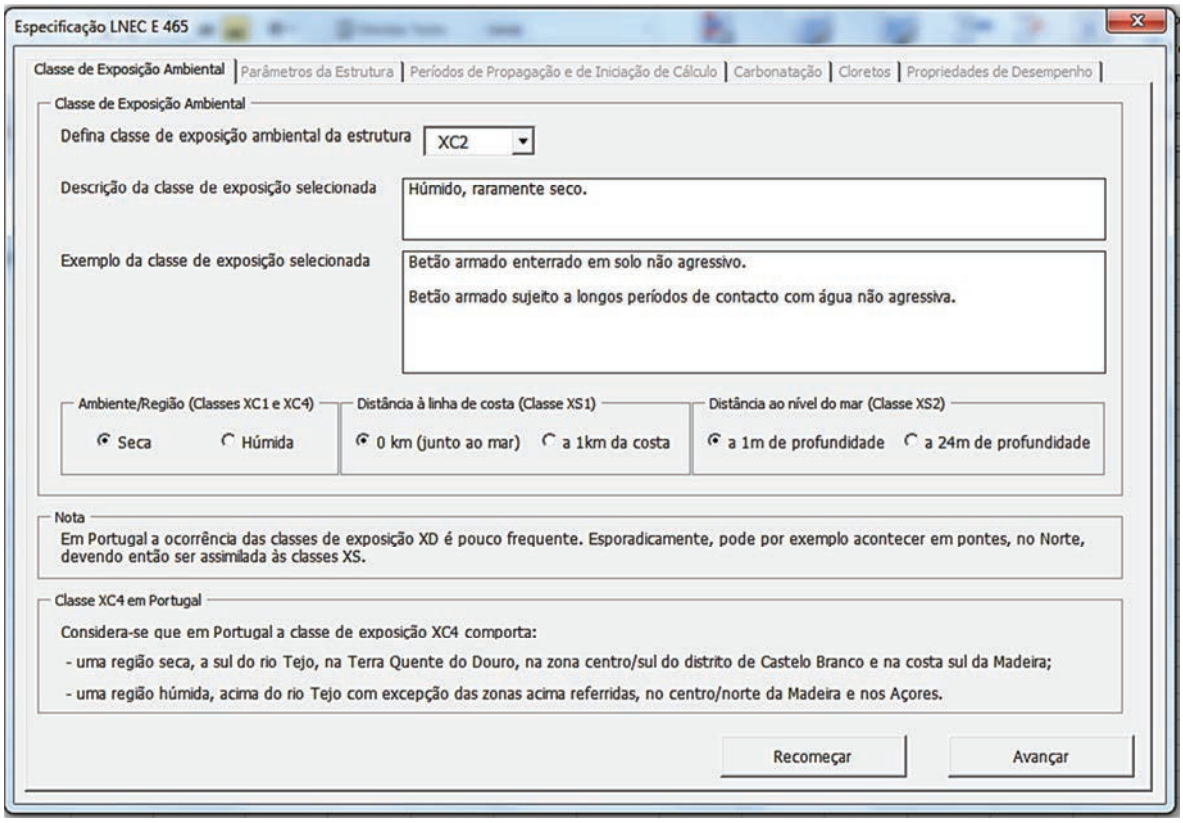


Figura 4.27 – Etapa inicial do procedimento, definição da classe de exposição ambiental.

A escolha da classe definida nesta primeira etapa condiciona todo o restante processo de cálculo, uma vez que é através da classe que se examina se a estrutura está sob ataque dos dióxidos de carbono (carbonatação) ou dos cloretos.

Definida a classe e outros parâmetros aplicáveis, prossegue-se com o cálculo avançando para a próxima etapa, ilustrada na Figura 4.28.

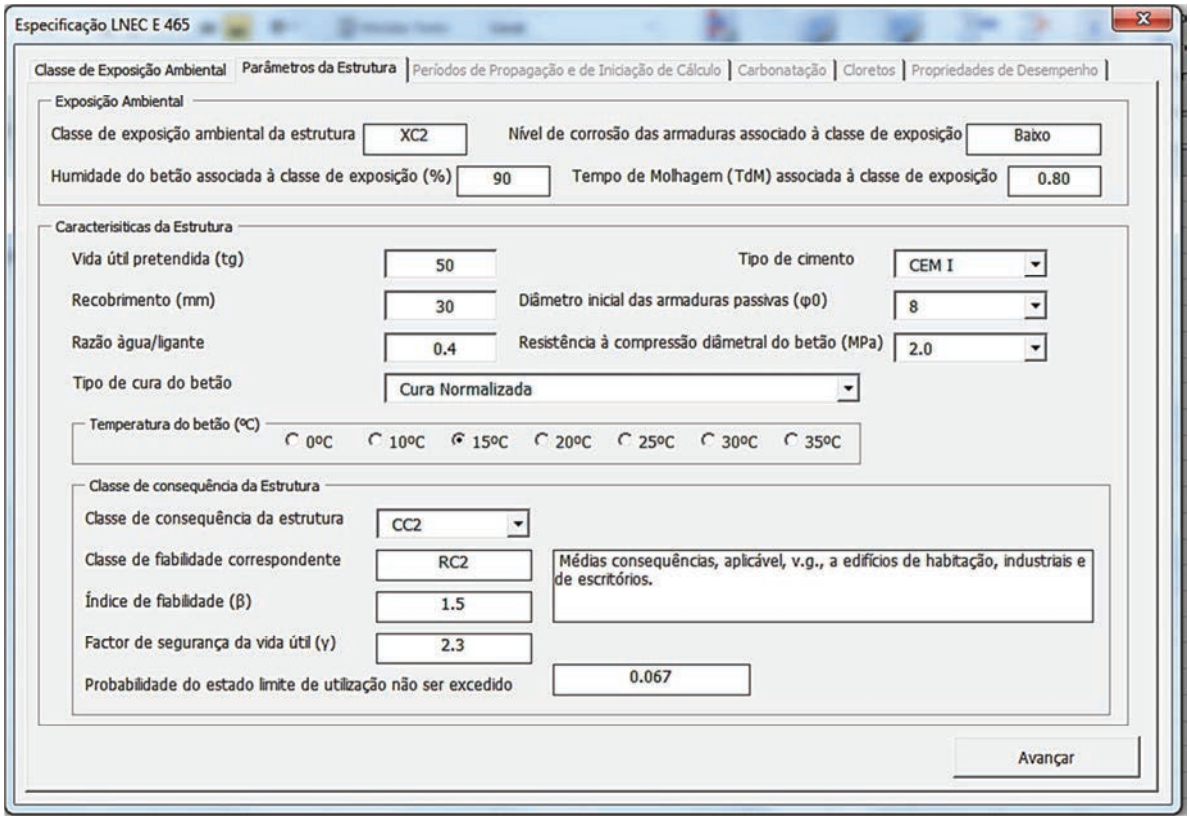


Figura 4.28 – Definição dos parâmetros da estrutura.

Nesta segunda etapa do cálculo, o utilizador deverá especificar todos os parâmetros relacionados com a estrutura que serão posteriormente necessário ao cálculo das propriedades de desempenho. Para melhor interação com o utilizador esta etapa encontra-se dividida em três secções. A primeira seção, correspondente à parte superior da janela, apresenta os parâmetros diretamente relacionados com a classe de exposição ambiental definida na etapa anterior, como o nível de corrosão ou o tempo de molhagem. A parte central da janela, ou segunda seção, é onde o utilizador deve introduzir os parâmetros relativos à composição (p.e., razão água cimento) e execução (p.e., cura) considerados para a estrutura em estudo. Por último, a parte inferior diz respeito à classe de consequência da estrutura, onde são apresentados os parâmetros associados à classe definida pelo utilizador.

Introduzidas todas as informações requeridas prossegue-se com o cálculo para a etapa seguinte, ilustrada na Figura 4.29.

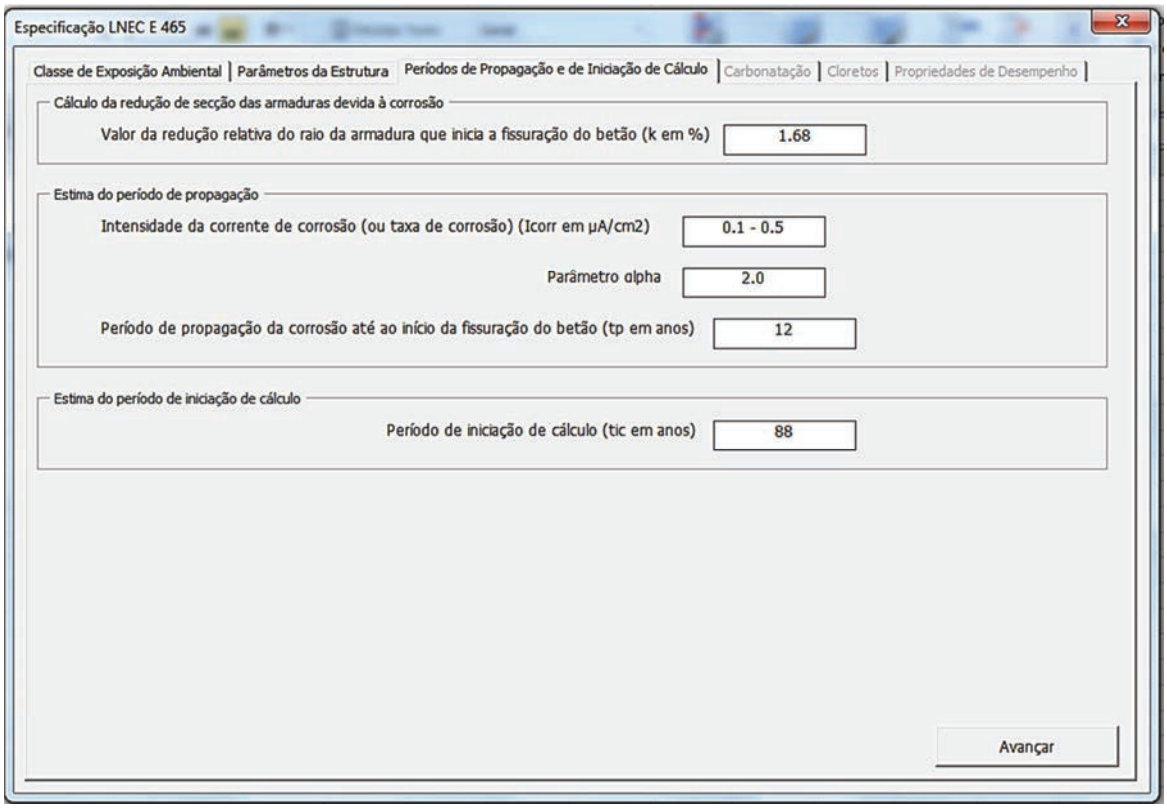


Figura 4.29 – Estimativa do período de iniciação e de propagação da corrosão.

A terceira etapa do processo é a primeira a apresentar resultados práticos da aplicação da metodologia. São apresentados os valores calculados para o período de iniciação e para o período de propagação da corrosão, assim como outros resultados necessários para o cálculo destes períodos, como a redução relativa do raio da armadura que inicia a fissuração do betão.

Denota-se que até este ponto do cálculo o percurso é o mesmo tanto para a carbonatação como para os cloretos, só se diferenciando o cálculo a partir deste ponto. Caso se trate de uma das classes XC ao avançar com o procedimento o utilizador é encaminhado para a etapa da carbonatação. Em caso contrário, se a classe for uma XS então a próxima etapa será relativa aos cloretos.

Tratando-se de um caso da carbonatação, a etapa correspondente é ilustrada na Figura 4.30. Para estes casos de carbonatação, o programa utiliza as duas metodologias presentes na especificação para calcular as duas propriedades de desempenho aplicáveis, nomeadamente, a resistência à carbonatação, R_{C65}, e o coeficiente de permeabilidade ao ar, k_{60}. A par das propriedades do desempenho, são também apresentados os valores de alguns parâmetros utilizados nos cálculos, como informação ao utilizador no caso de confirmação dos resultados.

O coeficiente de difusão potencial dos cloretos, D0, propriedade de desempenho associada aos cloretos, é apresentado na etapa relativa aos cloretos quando a classe de exposição é uma XS. À semelhança da etapa da carbonatação, além da estimativa da propriedade do desempenho em si, são apresentados outros valores intervenientes no cálculo. Esta etapa é ilustrada na Figura 4.31.

Especificação LNEC E 465

Classe de Exposição Ambiental | Parâmetros da Estrutura | Períodos de Propagação e de Iniciação de Cálculo | Carbonatação | Cloretos | Propriedades de Desempenho

Período de iniciação de cálculo (tic em anos) 88

Resistência à carbonatação do betão

Factor de concordância com as condições de ensaio da Especificação LNEC E 391 (k0)	3.0
Factor de consideração da influência da humidade relativa (k1)	0.20
Factor de consideração da influência do tipo de cura (k2)	1.00
Período de referência (t0 em anos)	1.0
Factor de consideração da influência da molhagem/secagem ao longo do tempo (n)	0.183
Resistência à carbonatação do betão, Rc65 (kg.ano/m5)	16

Coeficiente de permeabilidade ao ar do betão

Factor de cálculo (a)	150	Factor de cálculo (m)	0.117
Expoente dependente da humidade relativa do betão (P)			0.32
Factor de consideração da influência do tipo de cura (k2)			1.00
Teor de óxido de cálcio da matriz de cimento hidratado do betão, c (kg/m3)			535.0
Coeficiente de permeabilidade ao ar, K60 (10^-16 m2)			10.95

Avançar

Figura 4.30 – Propriedades de desempenho para a carbonatação.

Especificação LNEC E 465

Classe de Exposição Ambiental | Parâmetros da Estrutura | Períodos de Propagação e de Iniciação de Cálculo | Carbonatação | Cloretos | Propriedades de Desempenho

Período de iniciação de cálculo (tic em anos) 113

Concentração dos cloretos à superfície do betão

Factor de cálculo Cb (%)	2.0	Factor de cálculo k,vert	0.7	Factor de cálculo k,temp	1.2
Factor de cálculo k,a/c	1.00	Factor de cálculo k,hor	1.0		
Concentração dos cloretos em massa do cimento, Cr (% em massa do cimento)			0.5		
Concentração dos cloretos, em % da massa de ligante, na superfície do betão, para t = 0, suposta constante (Cs)			1.680		

Coeficiente de difusão do betão

Coeficiente de difusão dos cloretos do betão, D (m2/s)	0.116
Factor de consideração da influência das condições de cura (kD,C)	2.40
Factor de consideração da influência da humidade relativa do ambiente (kD,RH)	0.4
Factor de consideração da influência da temperatura (kD,T)	0.80
Factor de consideração do decréscimo de D ao longo do tempo (n)	0.55

Coeficiente de difusão potencial dos cloretos

Coeficiente de difusão potencial dos cloretos a ser determinado de acordo com a Especificação LNEC E 463, D0 (10^-12 m/s) 8.366

Avançar

Figura 4.31 – Propriedades de desempenho para o ataque por cloretos.

A última etapa, acessível através do pressionar do botão avançar tanto na carbonatação como nos cloretos, apresenta os resultados finais do processo, nomeadamente períodos de iniciação e de propagação da corrosão e as propriedades de desempenho aplicáveis. Apresenta também, de uma forma conclusiva, os parâmetros definidos pelo utilizador que permitiram obter os resultados finais.

A Figura 4.32 apresenta um exemplo desta etapa final, com parâmetros da estrutura e estimativas dass propriedades do desempenho.

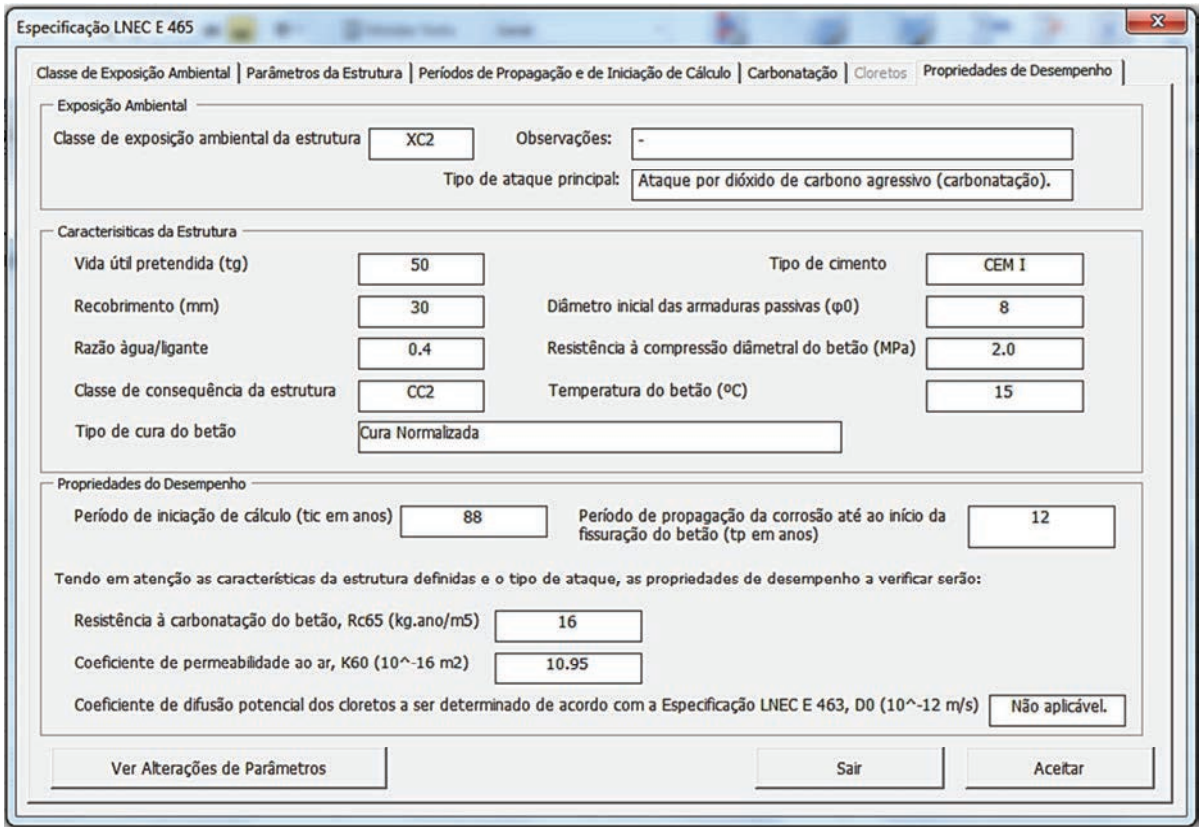


Figura 4.31 – Etapa final do processo com apresentação dos resultados.

Esta etapa alberga também o acesso a uma outra funcionalidade da aplicação. Suponha-se que o utilizador queira analisar como é que a alteração dos parâmetros iniciais da estrutura alteram as propriedades de desempenho a verificar. Para isso ele deveria aplicar a metodologia repetitivamente para cada alteração que queira introduzir até conseguir ter dados suficientes que permitam realizar esta análise.

É de forma a facilitar este processo que o pressionar no botão "Ver Alterações de Parâmetros", permite ter acesso a uma funcionalidade do programa que possibilita a análise simultânea de diferentes variações das propriedades do desempenho, conforme algumas alterações dos parâmetros iniciais da estrutura.

Para as diferentes propriedades de desempenho calculadas são apresentadas em forma de gráficos as variações que uma mudança no tipo de cimento, na espessura do recobrimento, ou na razão água/cimento introduzem. A Figura 4.32 ilustra uma dessas variações dos parâmetros nas propriedades do desempenho.

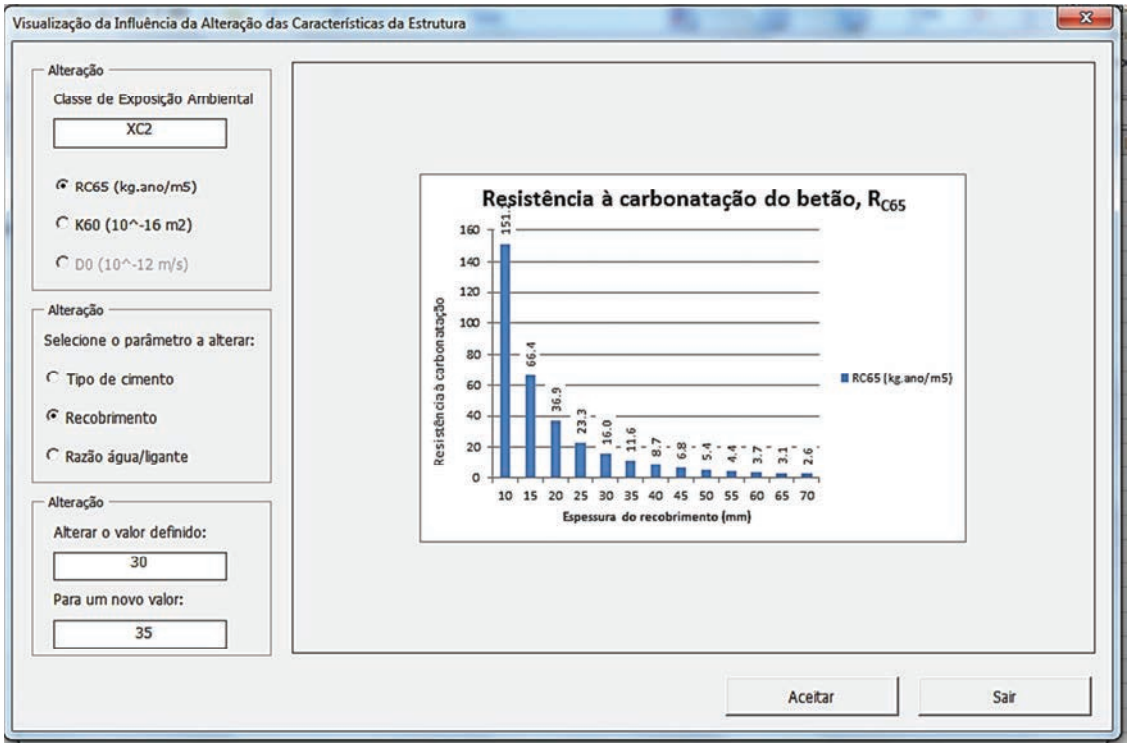


Figura 4.32 – Análise das variações nas propriedades do desempenho.

Mais uma vez, após finalizar o cálculo, o programa permite exportar os resultados para a folha de cálculo do Excel de forma a poderem ser trabalhadas pelo utilizador (ver Figura 4.33).

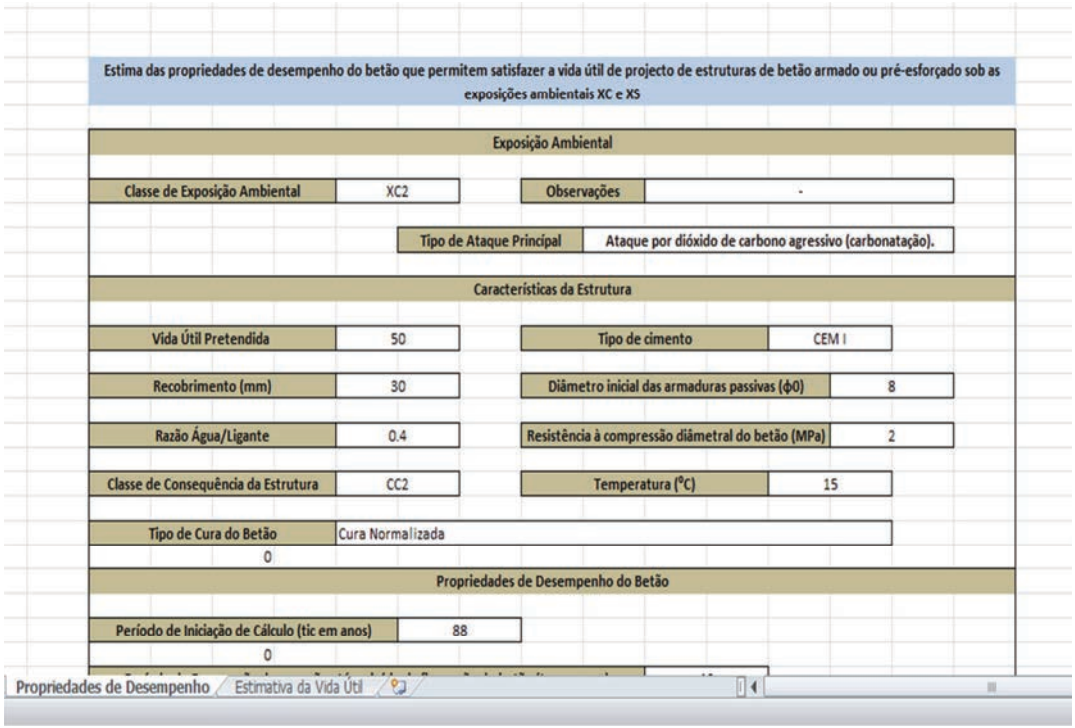


Figura 4.33 – Folha de cálculo das propriedades do desempenho.

4.2.3. ESTIMATIVA DA VIDA ÚTIL DE PROJETO DE ESTRUTURAS DE BETÃO ARMADO E PRÉ-ESFORÇADO COM BASE EM PROPRIEDADES DE DESEMPENHO ENSAIADAS

Esta funcionalidade da aplicação utiliza o processo reverso ao apresentado na secção anterior para estimar a vida útil de projeto com base em propriedades do desempenho.

O processo é desenvolvido por etapas de cálculo, apresentadas em abas da janela do programa pelas razões já enunciadas.

As duas primeiras etapas do cálculo, relativas à definição da classe de exposição ambiental e aos parâmetros da estrutura, são iguais ao descrito na secção anterior, não sendo por isso transcritos nesta secção. As variações são registadas na terceira etapa e assim o procedimento aqui apresentado para esta funcionalidade começa a partir desta etapa.

Definidas as condições ambientais e os parâmetros da estrutura, consoante a classe de exposição definida no início do processo, o utilizador é encaminhado para a etapa da carbonatação ou para o dos cloretos.

Caso seja um caso relativo à carbonatação, o utilizador deverá indicar uma das propriedades de desempenho ensaiadas, resistência à carbonatação ou coeficiente de permeabilidade ao ar, de modo a poder estimar-se a vida útil da estrutura. Esta etapa é ilustrada na Figura 4.34.

Para a ação dos cloretos como é analisada apenas uma propriedade do desempenho, o coeficiente de difusão potencial dos cloretos, deverá ser especificado este valor para estimativa da vida útil. A Figura 4.35 ilustra esta etapa.

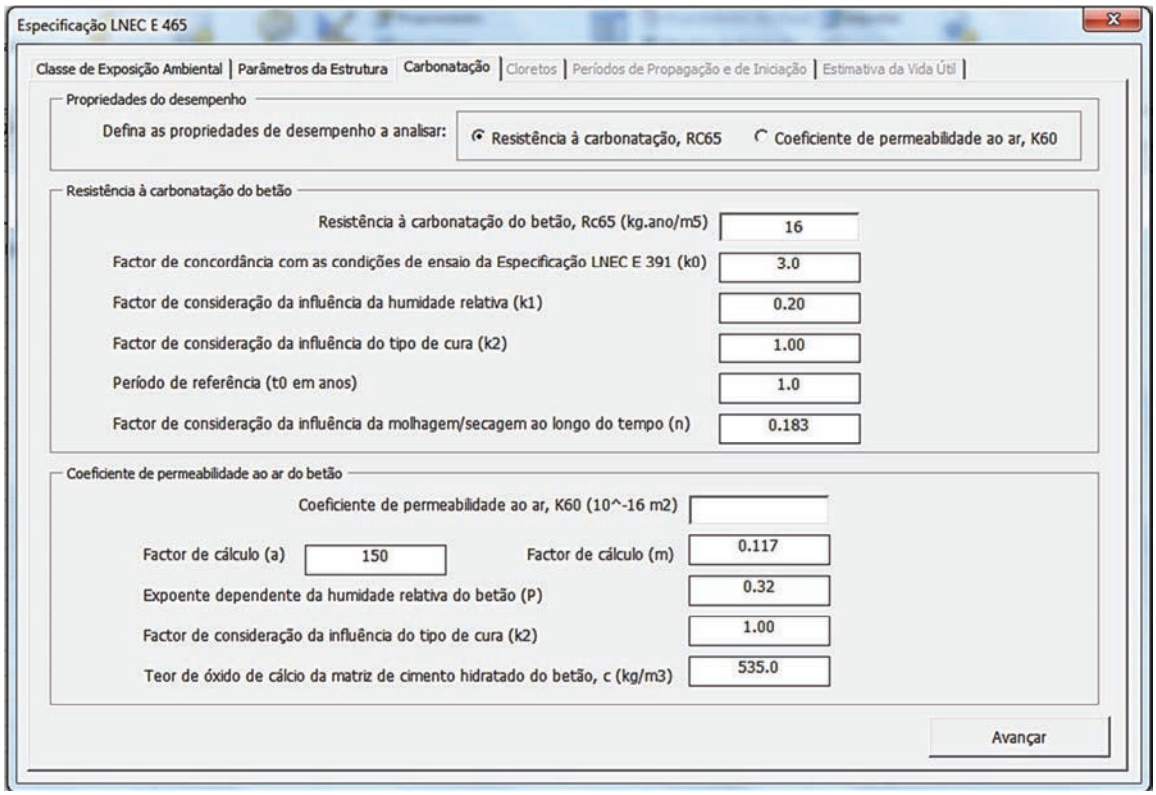


Figura 4.34 – Definição de propriedades do desempenho para a carbonatação.

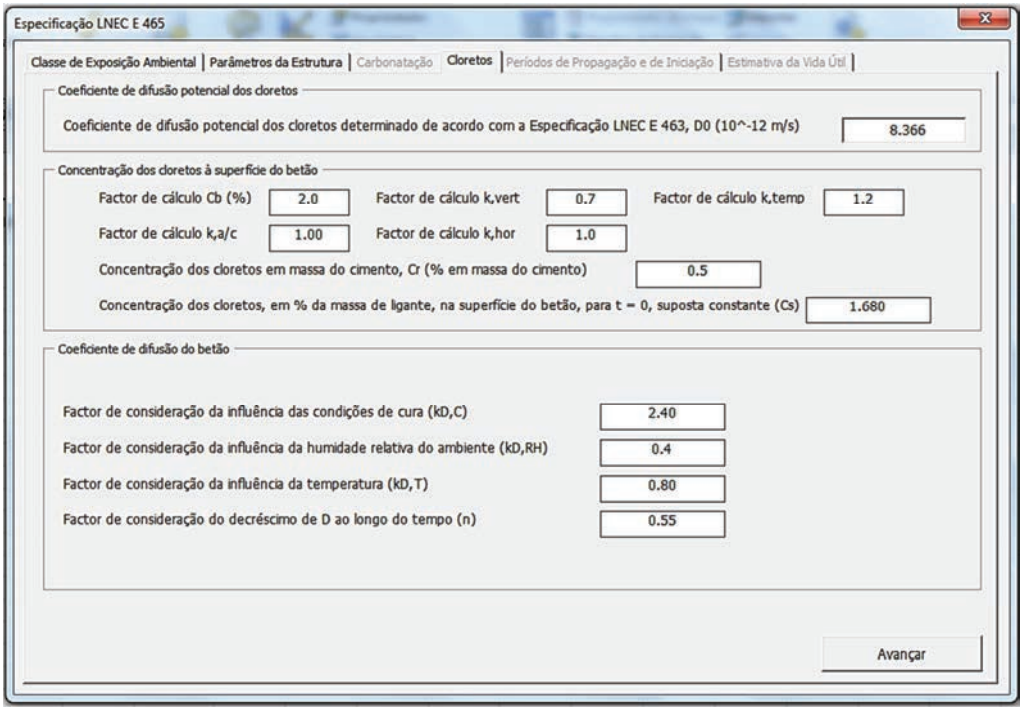


Figura 4.35 – Definição de propriedades do desempenho para os cloretos.

Definidas as propriedades de desempenho relativas ao caso em estudo avança-se para a estimativa dos períodos de iniciação e de propagação da corrosão, que permitem estimar a vida útil da estrutura (Figura 4.36).

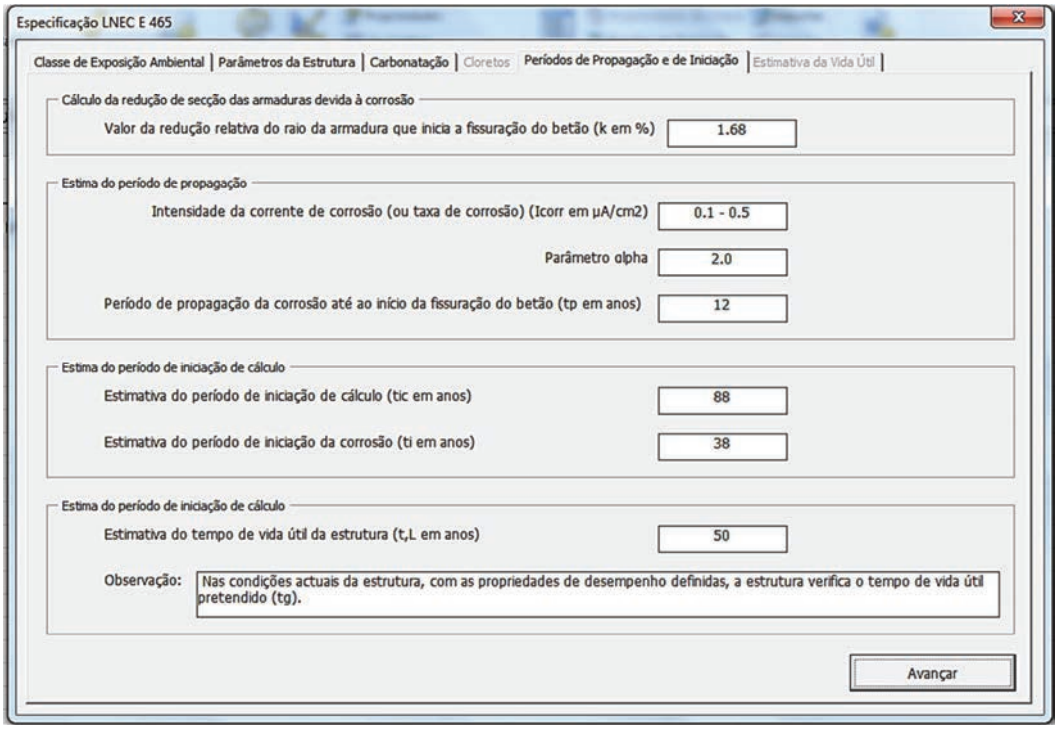


Figura 4.36 – Estimativa da vida útil com base nas propriedades do desempenho definidas.

Ao estimar a vida útil da estrutura, o programa automaticamente compara este valor com a vida útil pretendida definida pelo utilizador e o informa se está é cumprida ou não.

A etapa final (Figura 4.37) apresenta o resumo das etapas de cálculo anteriores, com os resultados finais e os parâmetros que os deram origem. Mais uma vez é possível exportar estes resultados diretamente para a folha de cálculo do Excel (Figura 4.38).

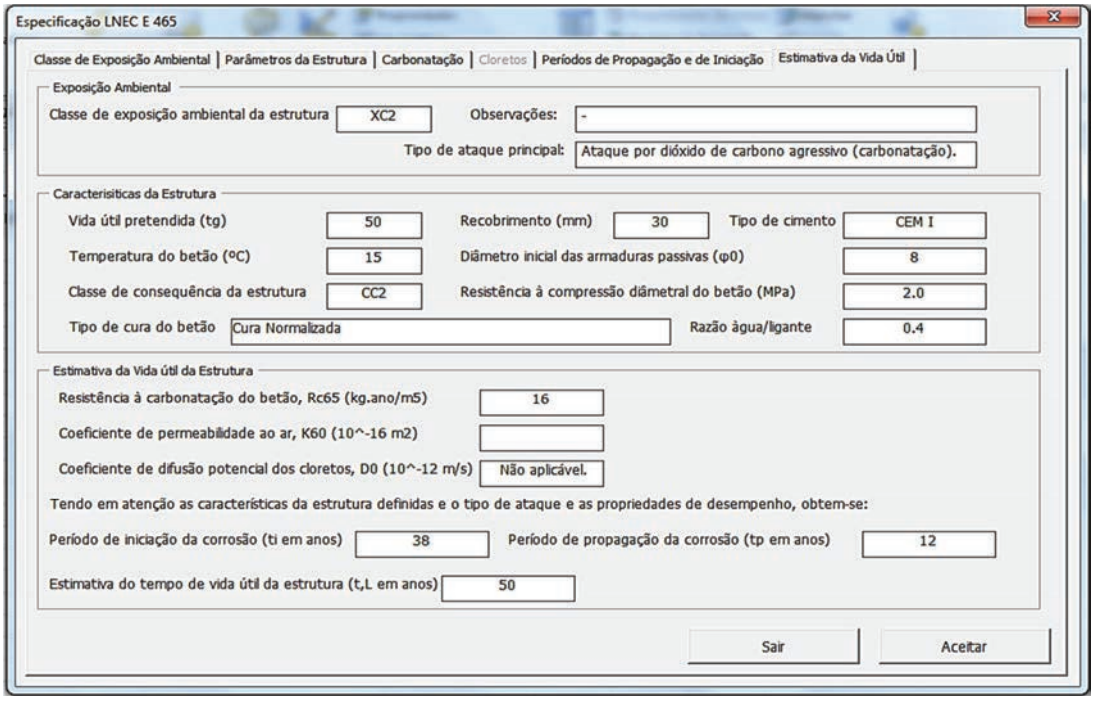


Figura 4.37 – Apresentação final dos resultados do processo de cálculo.

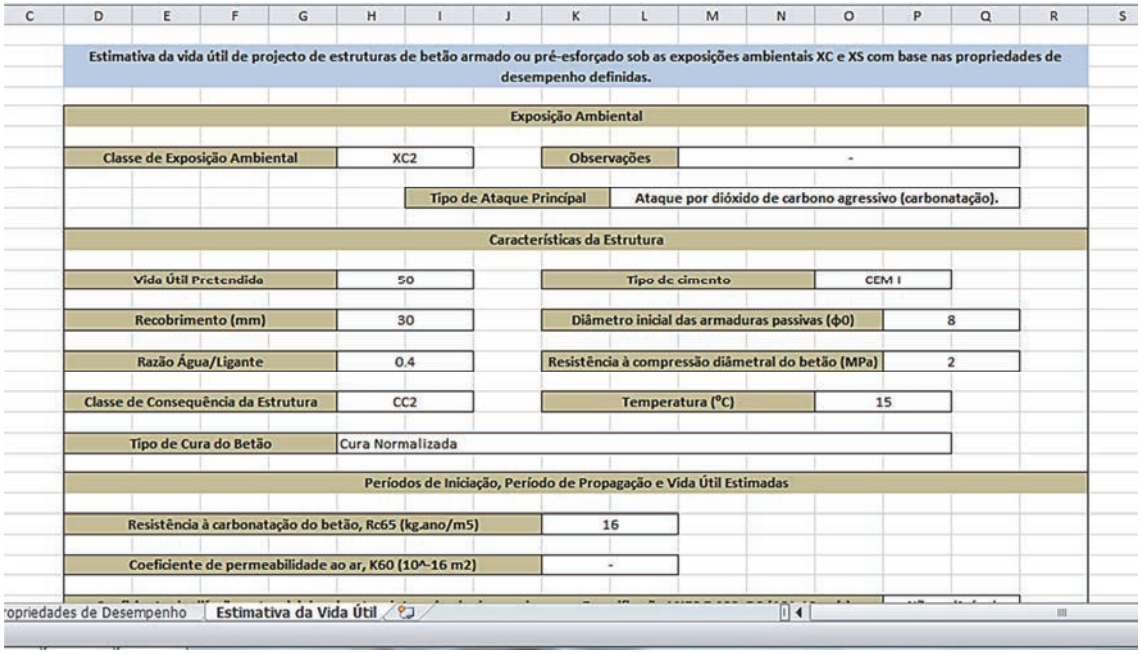


Figura 4.38 – Folha de cálculo da estimativa do tempo de vida útil da estrutura.

5. OBSERVAÇÕES E RESTRIÇÕES DE CÁLCULO

Algumas restrições e observações referentes à utilização da aplicação:

- A aplicação desenvolvida tem como objetivo a utilização apenas em Portugal e como tal apresenta as disposições regulamentares apenas aplicáveis a este país.
- Sendo resultante dos processos apresentados nas Especificações LNEC E 464 e LNEC E 465 a aplicação apresenta as mesmas restrições apresentadas nestas. Sugere-se por isso, que a utilização seja acompanhada destas especificações para melhor condução e perceção do processo.
- As combinações de classes de exposição ambiental possíveis de realizar na aplicação são apenas as combinações mais frequentes observadas em Portugal, ilustradas no Quadro 11 da Especificação LNEC E 464.
- O uso da aplicação não substitui a leitura cuidada das disposições das normas e especificações a que diz respeito, sendo que as informações apresentadas no decorrer do processo são um resumo destas.
- A funcionalidade de trabalhar misturas é apenas aplicável às misturas de cimentos e adições e à sua aptidão para serem considerados como ligantes hidráulicos. Não é por isso permitido utilizar a aplicação para trabalhar a composição real do betão (mistura de ligante, agregados e água);
- As estimativas, resultantes da aplicação da metodologia baseada no desempenho presente na Especificação LNEC E 465, apresentam as mesmas simplificações e considerações de cálculo apresentadas neste documento;
- A aplicação desenvolvida, resultante da metodologia exposta na Especificação LNEC E 465, apresenta apenas valores estimados para os períodos de iniciação e de propagação da corrosão, não devendo o utilizador portanto assumir estes valores como absolutos e exatos.

6. BIBLIOGRAFIA

1. Decreto-Lei n.º 301/2007 de 23 de Agosto – Condições para a colocação no mercado dos betões de ligantes hidráulicos e para a execução de estruturas de betão.
2. NP EN 206-1 "Betão – Parte 1: Especificação, desempenho, produção e conformidade", 2007.
3. NP EN 206-1:2007 Emenda 1, "Betão – Parte 1: Especificação, desempenho, produção e conformidade", 2008.
4. NP EN 206-1:2007 Emenda 2, "Betão – Parte 1: Especificação, desempenho, produção e conformidade", 2010.
5. Especificação LNEC E 464 – 2007 "Betões – Metodologia prescritiva para uma vida útil de projecto de 50 e 100 anos face às acções ambientais.
6. Especificação LNEC E 465 – 2007 "Betões – Metodologia para estimar as propriedades de desempenho do betão que permitem satisfazer a vida útil de projecto de estruturas de betão armado ou pré-esforçado sob as exposições ambientais XC e XS."
7. Especificação LNEC E 477 – 2007 "Guia para especificação do betão de ligantes hidráulicos conforme com a NP EN 206-1".
8. NP EN 197-1, "Cimento – Parte 1: Composição, especificações e critérios de conformidade para cimentos correntes", 2001.
9. NP EN 197-1:2001 Emenda 1, "Cimento – Parte 1: Composição, especificações e critérios de conformidade para cimentos correntes", 2005.
10. Ferreira, R. M., "Probability-based durability analysis of concrete structures in marine environment", Tese de PhD, Guimarães, 2004
11. Marques, P. F. e Costa, A. e Lanata F., "Service life of RC structures: chloride induced corrosion: prescriptive versus performance-based methodologies", Materials and Structures, vol. 45, n.º 1-2, pp. 277-296, 2012.
12. EN 1990 "Eurocódigo: Bases para o projecto de estruturas.", 2002.
13. NP EN 13670-1 Execução de estruturas de betão. Parte1: Regras gerais., 2007.
14. NP EN 1992-1-1 "Eurocódigo 2: Projecto de estruturas de betão. Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios.". 2008.
15. Especificação LNEC E 391 "Betões. Determinação da resistência à carbonatação", 1993.
16. Especificação LNEC E 392 "Betões. Determinação da permeabilidade ao oxigénio.". 1993.
17. Especificação LNEC E 463 "Betões. Determinação do coeficiente de difusão dos cloretos por ensaio de migração em regime não estacionário.", 2004.