

Specification faced with durability to meet superior level of performance in structural elements buried

Especificação frente à durabilidade para atender nível superior de desempenho em elementos estruturais enterrados



F. BOLINA^a
fabriciolb@unisinis.br

B. TUTIKIAN^a
bftutikian@unisinis.br

Abstract

The performance standard NBR 15575-1: 2013 [1] states that to achieve the higher level of performance for durability, buried concrete structures must achieve a minimum service life (VUP) of 75 years. However, the NBR 6118:2014 [2] does not specify the minimum project properties for the structure fulfill this VUP. The objective of this study is to provide recommendations for structural designers to meet higher performance requirements of NBR 15575:2013 [1] in durability. It was conducted a research of national and international standards and reference publications about the durability and VUP 75 years for structural elements buried. The paper was divided into three parts: (1°) the analysis of the Brazilian and international legal system, as well as reference publications in the area; (2°) discussion of service life prediction models; and (3°) specifications to meet the superior level of durability of structural elements buried.

Keywords: performance standard, superior performance, service life, buried structures.

Resumo

A ABNT NBR 15575-1:2013 [1] estabelece que, para atingir o nível de desempenho superior em termos de durabilidade, as estruturas de concreto armado enterradas devem atender a uma vida útil de projeto (VUP) mínima de 75 anos. Contudo, a norma ABNT NBR 6118:2014 [2] não apresenta recomendações de projeto para que esta VUP seja cumprida. O objetivo deste trabalho é determinar alguns parâmetros projetuais de durabilidade para estas estruturas, visando atender ao requisito de desempenho superior da norma. Para tanto, realizou-se uma pesquisa em normas nacionais e internacionais, além de publicações que remetam a especificações de projeto para vida útil de 75 anos para elementos estruturais enterrados. O trabalho dividiu-se em três partes: (1°) a análise do sistema normativo (nacional e internacional) e publicações referência da área; (2°) discussão de modelos teóricos de previsão de vida útil; e (3°) definição das especificações de projeto para elementos estruturais enterrados para o nível superior de desempenho.

Palavras-chave: norma de desempenho, desempenho superior, vida útil de projeto, estruturas enterradas.

^a Unisinis, São Leopoldo, Rio Grande do Sul, Brasil.

1. Introdução

Segundo a norma de desempenho das edificações habitacionais, ABNT NBR 15575-1:2013 [1], um sistema estrutural deve conservar sua segurança, estabilidade e aptidão em serviço durante o período correspondente a sua vida útil. Os elementos constituintes deste sistema devem ser projetados e construídos de modo que, sob condições pré-estabelecidas de uso, mantenham sua capacidade funcional durante a vida útil do projeto, a qual, para o desempenho superior, deve ser de 75 anos.

A ABNT NBR 15575-1:2013 [1] especifica que o método de avaliação da durabilidade de uma estrutura pode ser realizado através do atendimento aos requisitos estabelecidos em normas brasileiras que estejam relacionadas com o tema e, na inexistência destas, em normas estrangeiras e internacionais específicas e coerentes com o assunto.

O intento deste trabalho é fornecer recomendações de projeto em termos de durabilidade, as quais poderão ser adotadas no dimensionamento e verificação dos elementos em contato com solo - tais como os de fundação - que almejem atender o nível de desempenho superior da ABNT NBR 15575:2013 [1]. Nestes ambientes os principais agentes agressivos são os íons cloretos, sulfatos e a umidade.

Contudo, as normas brasileiras relacionadas ao projeto estrutural e à durabilidade do sistema estrutural citadas na ABNT NBR 15575-1:2013 [1], como a ABNT NBR 6118:2014 [2] e ABNT NBR 12655:2015 [3], não fornecem as recomendações necessárias para atender a este requisito de durabilidade dos

elementos enterrados, principalmente para vida útil superior. Assim, deve-se buscar outras referências, normativas ou não, para atender o propósito.

Com este intento, o presente estudo foi desenvolvido em três etapas: (1º) análise do sistema normativo brasileiro e internacional, (2º) revisão de modelos teóricos de previsão de vida útil e (3º) na definição e proposição de recomendações de projeto para estruturas enterradas, visando atender uma vida útil de 75 anos. No primeiro item são apresentadas as normas brasileiras e internacionais sobre o tema, além de publicações técnicas da área, as quais abordam os requisitos mínimos de projeto para cumprir com o requisito. Na segunda parte realiza-se uma comprovação destes parâmetros projetuais normativos, através de modelos teóricos. No terceiro item recomenda-se especificações de projeto a serem seguidas, integrando as referências consultadas e os resultados dos modelos de previsão de vida útil.

2. Análise do sistema normativo brasileiro e internacional

2.1 Normas brasileiras

A ABNT NBR 15575-1:2013 [1] estabelece que a VUP para elementos estruturais de edificações residenciais deve ser de 50, 63 ou 75 anos para cumprir com os níveis mínimo, intermediário e superior de durabilidade, respectivamente, conforme a Tabela .

Nos projetos das estruturas de concreto armado, a

Tabela 1 – VUP para os níveis mínimo, intermediário e superior para a estrutura da edificação residencial

Parte da edificação	Exemplos	VUP (anos)		
		Mínimo	Intermediário	Superior
Estrutura principal	Fundações, elementos estruturais (pilares, vigas, lajes e outros), paredes estruturais, estruturas periféricas, contenções e arrimos	≥50	≥63	≥75

Fonte: ABNT NBR 15575-1:2013, editada pelos autores

Tabela 2 – Classes de agressividade ambiental

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	Pequeno
III	Forte	Marinha	Grande
		Industrial	
IV	Muito forte	Industrial	Elevado
		Respingos de maré	

Fonte: ABNT NBR 6118:2014

Tabela 3 – Correspondência entre classe de agressividade ambiental e cobrimento nominal da armadura

Tipo de estrutura	Componente ou elemento	Classe de agressividade ambiental			
		I	II	III	IV
		Cobrimento nominal (mm)			
Concreto armado	Laje ^{b)}	20	25	35	45
	Viga/pilar	25	30	40	50
	Elementos estruturais em contato com o solo	30	30	40	50

Source: ABNT NBR 6118:2014

Tabela 4 – Correspondência entre classe de agressividade e qualidade do concreto, para estruturas em concreto armado

Concreto	Classe de agressividade			
	I	II	III	IV
Relação água/cimento em massa	≤0,65	≤0,60	≤0,55	≤0,45
Classe de concreto (ABNT NBR 8953)	≥C20	≥C25	≥C30	≥C40
Consumo de cimento por metro cúbico de concreto kg/m ³	≥260	≥280	≥320	≥360

Fonte: ABNT NBR 12655:2015

Tabela 5 – Requisitos para concreto exposto a soluções contendo sulfatos

Condições de exposição em função da agressividade	Sulfato solúvel em água (SO ₄) presente no solo - % em massa	Sulfato solúvel (SO ₄) presente na água - ppm	Máxima relação a/c, em massa, para concreto com agregado normal*	Mínimo f _{ck} (para concreto normal ou leve) - MPa
Fraca	0,00 a 0,10	0 a 150	-	-
Moderada**	0,10 a 0,20	150 a 1500	0,50	35
Severa***	Acima de 0,20	Acima de 1500	0,40	40

*Baixa relação a/c ou elevada resistência podem ser necessárias para a obtenção de baixa permeabilidade do concreto ou proteção contra a corrosão da armadura ou proteção a processos de congelamento e degelo; **Água do mar; ***Para condições severa de agressividade, devem ser obrigatoriamente usados cimentos resistentes a sulfatos.

Fonte: ABNT NBR 12655:2015

agressividade ambiental deve ser classificada segundo os critérios admitidos pela ABNT NBR 6118:2014 [2], a qual especifica que as estruturas devem ser projetadas e construídas de modo que, sob as condições ambientais previstas na época do projeto, sua segurança, estabilidade e aptidão em serviço seja preservada durante o período correspondente a vida útil especificada em projeto. A Tabela 2 mostra o critério de classificação da agressividade ambiental proposta por esta norma.

Em função da classe de agressividade ambiental definida, recomendações quanto à espessura de cobrimento das armaduras são apresentadas pela ABNT NBR 6118:2014 [2]. Esta espessura de cobrimento visa garantir uma proteção física, química e me-

cânica das armaduras durante a vida útil da estrutura, conforme destaca a Tabela .

De acordo com a ABNT NBR 12655:2015 [3], quando atendidos os critérios estabelecidos pela ABNT NBR 6118:2014 [2], a durabilidade estrutural será função das características do concreto constituinte. Para tanto, esta norma define uma relação água/cimento máxima, uma resistência mínima à compressão e um consumo mínimo de cimento, conforme Tabela . A norma ainda apresenta a classificação de agressividade do solo em função da quantidade de sulfato solúvel em água (SO₄) presente no terreno, tal como mostra a Tabela .

Entende-se que as recomendações referenciadas nestas normas

Tabela 6 – Recomendações para zona de agressividade com impacto muito severo

Zona de agressividade	Concentração de sulfatos presentes em SO ₃			Tipo de cimento a ser utilizado	Consumo de cimento mínimo (kg/m ³)	Relação a/c máxima
	No solo		Em águas subterrâneas			
	Total SO ₃	SO ₃ em relação 2:1 de água e solo extraído				
4	1 a 2	3 a 5	2,5 a 5	Cimento supersulfatado ou cimento Portland resistente a sulfatos	370	0,45

Fonte: Indian Standard IS -456, traduzida e adaptada pelos autores

são para VUP de 50 anos. A ABNT NBR 8681:2004 [4] define que para as ações que apresentam variabilidade no tempo (ações variáveis) é estabelecido um período de referência para que estas sejam igualadas ou superadas. Estes valores foram definidos por consenso, com a probabilidade entre 25% e 35% de serem ultrapassados durante 50 anos.

2.2 Normas internacionais e bibliografias referências na área

Segundo Tutikian, Isaia e Helene (2011) [5], a durabilidade das

estruturas de concreto depende tanto de fatores extrínsecos (presença de sais, maresias, chuvas ácidas), quanto de fatores intrínsecos (tipo de cimento, relação água/cimento, adições, aditivos, entre outros). Para este artigo, o interesse se concentra na avaliação dos fatores intrínsecos, necessários para atender a uma VUP de 75 anos. Os fatores intrínsecos que o sistema normativo nacional e internacional recomenda para o atendimento da durabilidade são (a) o consumo mínimo de cimento; (b) a espessura mínima do cobrimento das armaduras; e (c) a relação água/cimento máxima. A resistência à compressão do concreto também é citada, porém está relacionada à relação água/cimento, não necessitando de

Tabela 7 – Especificações para atender VUP de 100 anos em elementos de concreto armado ou protendido

Tipo de corrosão	Condição de exposição	Tipo de cimento	Cobrimento do nominal concreto (mm)							
			45	45	50	55	60	65	70	75
Por cloretos (exceto água do mar)	Névoa salina, mas sem contato direto	I, IIA, IIB-S, SRPC	C45/55 0,40;380	C40/50 0,45;360	C35/45 0,50;340	C32/40, 0,55;320	C28/35 0,60;300	C28/35 0,60;300	C28/35 0,60;300	C28/35 0,60;300
		IIB-V, IIIA	-	-	C35/45 0,45;360	C32/40, 0,50;340	C28/35 0,55;320	C28/35 0,55;320	C28/35 0,55;320	C28/35 0,55;320
		IIIB	-	-	C32/40, 0,45;360	C28/35 0,50;340	C28/35 0,55;320	C28/35 0,55;320	C28/35 0,55;320	C28/35 0,55;320
		IVB-V	-	-	C28/35 0,45;360	C25/30 0,50;340	C20/30 0,55;320	C20/30 0,55;320	C20/30 0,55;320	C20/30 0,55;320
	Úmida, raramente seca	I, IIA, IIB-S, SRPC	-	-	-	-	-	C45/55 0,40;380	C40/50 0,40;380	C35/45 0,45;360
		IIB-V, IIIA	-	-	-	C40/50 0,35;380	C35/45 0,40;380	C32/40, 0,45;360	C28/35 0,50;340	C25/30 0,55;320
		IIB, IVB-V	-	-	-	C32/40, 0,40;380	C28/35 0,45;360	C25/30 0,50;340	C25/30 0,55;320	C25/30 0,55;320
		I, IIA, IIB-S, SRPC	-	-	-	-	-	C45/55 0,35;380	C40/50 0,40;380	C35/45 0,45;360
	Ciclos de molhagem e secagem	IIB-V, IIIA	-	-	-	C40/50 0,35;380	C35/45 0,40;380	C32/40, 0,45;360	C28/35 0,50;340	C25/30 0,55;320
		IIIB, IVB-V	-	-	-	C32/40, 0,40;380	C28/35 0,45;360	C25/30 0,50;340	C25/30 0,50;340	C25/30 0,50;340
		I, IIA, IIB-S, SRPC	-	-	-	-	-	C45/55 0,35;380	C40/50 0,40;380	C35/45 0,45;360

Fonte: adaptada da BS 8500-1:2006

um detalhamento mais profundo. O tipo de cimento também pode exercer influência sobre a durabilidade destas estruturas frente a mecanismos de deterioração química, mas este não costuma ser detalhado pelas normas.

2.2.1 Consumo mínimo de cimento

O consumo de cimento é, com frequência, relacionado com parâmetros como resistência mecânica, durabilidade, fluidez, tempo de pega, entre outros. Segundo a BRE (2005) [6], a penetração dos íons sulfatos ocorre na solução alcalina porosa que resulta da hidratação do cimento, apresentando danos como expansão, fissuras, entre outros. Utilizando-se cimentos resistentes a sulfatos, o aluminato tricálcico mantém-se em índices mínimos, reduzindo o efeito desta reação na estrutura. Em relação a estruturas inseridas em ambientes com sulfatos, convém destacar as prescrições referenciadas na IS 456:2000 [7]. Esta regulamentação apresenta uma classificação qualitativa, em zonas, dos ambientes potencialmente agressores às estruturas de concreto. Esta norma indiana faz alusão às estruturas enterradas, admitindo para estas a zona de agressividade número 4. Para as estruturas nestas circunstâncias, a norma específica que o consumo mínimo de cimento deve ser de 370 kg/m³, como mostra a Tabela .

As recomendações da BS EN 206-1:2006 [8] em relação ao consumo de cimento são semelhantes às apresentadas pela

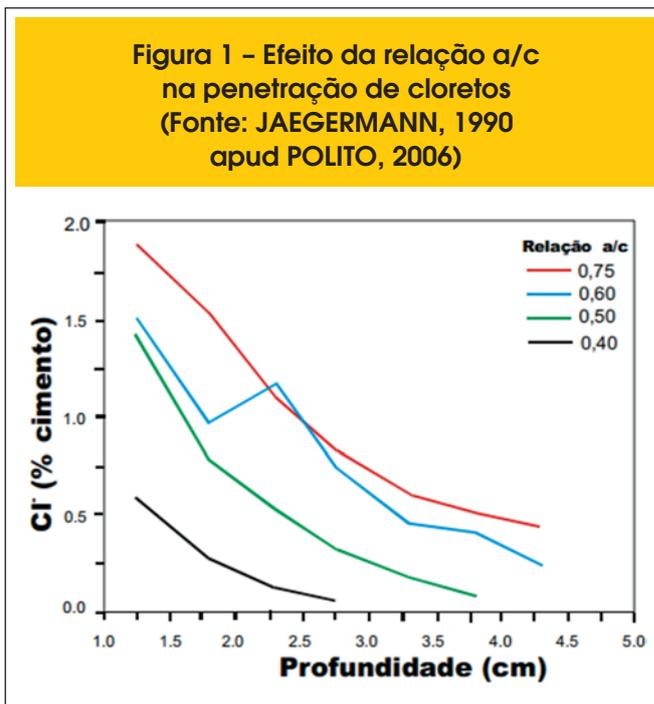


Tabela 8 - Classificação ACEC para solos naturais

Classe DS (Design Class) do solo	Sulfatos			pH águas subterrâneas		Classe ACEC do solo
	Extrato 2:1 água/solo (SO ₄ mg/l)	Água subterrânea (SO ₄ mg/l)	potencial total de sulfatos (SO ₄ %)	Água estática (pH)	Água móvel (pH)	
DS-1	< 500	< 400	< 0,24	≥ 2,5	-	AC-1s
				≥ 2,5	> 5,5	A1-1
				≥ 2,5	2,5 - 5,5	AC-2z
				> 3,5	-	AC-1s
DS-2	500 - 1500	400 - 1400	0,24 - 0,6	-	> 5,5	AC-2
				2,5 - 3,5	-	AC-2s
				-	2,5 - 5,5	AC-3z
				> 3,5	-	AC-2s
DS-3	1600 - 3000	1500 - 3000	0,7 - 1,2	-	> 5,5	AC-3
				2,5 - 3,5	-	AC-3s
				-	2,5 - 5,5	AC-4
				> 3,5	-	AC-3s
DS-4	3100 - 6000	3100 - 6000	1,3 - 2,4	-	> 5,5	AC-4
				2,5 - 3,5	-	AC-4s
				-	2,5 - 5,5	AC-5
				> 3,5	-	AC-4s
DS-5	> 6000	> 6000	> 2,4	2,5 - 3,5	≥ 2,5	AC-5
				2,5 - 3,5	≥ 2,5	AC-5

Fonte: adaptada de BRE Special Digest 1:2005

IS 456:2000 [7]. Tal como as regulamentações brasileiras, estas normas não apresentam uma descrição sobre a vida útil de projeto praticada. Tanto para a ACI 318-11:2002 [9] quanto para a ABNT NBR 6118:2014 [2] se subentende que a VUP é de 50 anos, devido ao tempo de retorno das ações variáveis de projeto. Observa-se que estas recomendações são mais conservadoras do que as praticadas pela ABNT NBR 6118:2014 [2] para elementos estruturais enterrados.

2.2.2 Cobrimento nominal das armaduras

O objetivo do cobrimento de concreto é garantir uma proteção química e física às armaduras para que o nível de desempenho superior de durabilidade seja atendido, ou seja, uma vida útil mínima de projeto maior ou igual a 75 anos. A Tabela , referenciada da ABNT NBR 6118:2014 [2], especifica os cobrimentos mínimos das armaduras para uma VUP de 50 anos, sendo necessário buscar informações adicionais para atender a critérios mais rígidos.

Segundo Neville e Brooks [10], é possível atingir VUP para estruturas de 100 anos, adotando um cobrimento nominal especificado conforme o tipo e condição de exposição da estrutura, além da classe de resistência do concreto. Este é o princípio praticado na ABNT NBR 6118:2014 [2] e ABNT NBR 12655:2015 [3]. Neste contexto, na Tabela constam as especificações da BS 8500-1:2006 [11] para atender a uma VUP de 100 anos, destacando o ataque por íons cloretos.

Evidencia-se que, para condições úmidas e raramente secas em ambientes que apresentam potencial para desenvolver corrosão por cloretos, tem-se que o cobrimento das armaduras é de, no mínimo, 55 mm, com f_{ck} de 40MPa, máxima relação água/cimento de 0,40 e consumo mínimo de cimento de 380 kg/m³. Novamente observa-se que a BS 8500-1:2006 [11] se baseia no cobrimento de concreto, na resistência à com-

Tabela 9 – Classe DC e número de APM para elementos de concreto situados em zonas onde o gradiente hidráulico menor ou igual a 5: concreto para uso geral *in situ*

Classe ACEC do solo	Vida útil desejada	
	Até 50 anos	Até 100 anos
AC-1s, AC-1	DC-1	DC-1
AC-2s, AC-2	DC-2	DC-2
AC-2z	DC-2z	DC-2z
AC-3s	DC-2	DC-3
AC-3z	DC-3z	DC-3z
AC-3	DC-2	DC-3
AC-4s	DC-3	DC-3
AC-4z	DC-4z	DC-4z
AC-4	DC-3	DC-4
AC-4ms	DC-4m	DC-4m
AC-4m	DC-4m	DC-4m
AC-5z	DC-4z + APM3 ^o	DC-4z + APM3 ^o
AC-5	DC-4 + APM3 ^o	DC-4 + APM3 ^o
AC-5m	AC-4m + APM3 ^o	AC-4m + APM3 ^o

Fonte: adaptada de BRE Special Digest 1:2005

pressão, relação água/cimento e consumo de cimento para garantir a durabilidade das estruturas, tal como a ABNT NBR 6118:2014 [2], ABNT NBR 12655:2015 [3] e demais normas internacionais propõem.

Tabela 10 – Qualidade do concreto para resistência ao ataque químico: concreto para uso geral *in situ*

Classe DC	Máx. a/c	Mínimo consumo de cimento (kg/m ³), por tamanho máximo de agregado				Grupo do tipo de cimento
		≥ 40 mm	20 mm	14 mm	10 mm	
DC-4	0,45	340	360	380	380	F
	0,4	360	380	380	380	E
	0,35	380	380	380	380	D, G
Grupo	Cimentos				Combinações	
A	CEM I, CEM II/A-D, CEM II/A-Q, CEM II/A-S, CEM II/B-S, CEM II/A-V, CEM II/B-V, CEM III/A, CEM III/B				CIIA-V, CIIB-V, CII-S, CIIIA, CIIIB, CIIA-D, CIIA-Q	
B	CEM II/A-L, CEM II/A-LL				CIIA-L, CIIA-LL	
C	CEM II/A-L, CEM II/A-LL				CIIA-L, CIIA-LL	
D	CEM II/B-V+SR, CEM III/A+SR				CIIB-V+SR, CIIIA+SR	
E	CEM IV/B (V), VLH IV/B (V)				CIVB-V	
F	CEM III/B+SR				CIIIB+SR	
G	SRPC				-	

Fonte: adaptada de BRE Special Digest 1:2005

2.2.3 Relação água/cimento

Assim como a espessura do cobrimento das armaduras, a especificação da relação água/cimento máxima é consequência da agressividade ambiental. Para determinar esta relação para uma VUP de 75 anos para estruturas enterradas, deve-se atentar para o ataque por cloretos e por sulfatos, além da umidade presente no solo.

Segundo CCAA (2009) [12] e Figueiredo (2011) [13], a resistência do concreto quanto ao ataque por cloretos depende da porosidade do material, fundamentalmente do tamanho, distribuição e interconectividade dos poros da pasta. Sendo esta variável diretamente proporcional à relação água/cimento. A Figura apresenta o efeito desta variável na penetração dos íons cloretos (POLITO, 2006 [14]). A Tabela expressa a especificação da BS 8500-1:2006 [11] da relação água/cimento máxima a ser admitida nos projetos feitos em regiões com este tipo de agressividade ambiental.

A ACI 318-11:2002 [9], tal como as normas brasileiras, não faz diferenciação da VUP almejada através da adoção dos parâmetros projetuais (pressupõe-se que seja 50 anos, conforme ASCE 7-05 (2005) [15]). No entanto, a exemplo da norma brasileira, a ACI 318-11:2002 [9] classifica os ambientes em diferentes classes de agressividade. Considerando a estrutura exposta a umidade e a fontes externas de cloretos (classe C2), tem-se a recomendação de uma relação água/cimento máxima de 0,4, valor condizente com a recomendação da BS 8500-1:2006 [11].

Outra hipótese a ser levantada quando é feita uma análise sobre a durabilidade das estruturas enterradas é o ataque por sulfatos presentes no solo, principalmente em zonas industriais. Destacam Mehta e Monteiro (2014) [16] que concentrações de sulfatos de magnésio, sódio e potássio é corriqueiro nas águas subterrâneas. Segundo Isaia (2011) [17], o ataque por sulfatos ocorre através da reação química do íon de sulfato com os componentes de aluminatos do concreto no endurecido. Mehta e Monteiro (2014) [16] destacam que degradação do concreto pode se manifestar por expansão e por fissuração. A expansão do concreto pode ocasionar a fissuração, que, por sua vez, aumenta a permeabilidade do concreto, o que facilita a penetração de outros agentes agressivos no interior do elemento estrutural.

O BRE (2005) [6] estabelece uma metodologia para a escolha de concreto resistente ao ataque de sulfatos. A primeira etapa é a definição da classe ACEC (*Agressive Chemical Enviroment for Concrete*) do solo, como mostra a Tabela. Essa classificação depende do potencial total de sulfato e do pH da água subterrânea. Com a classificação definida, é possível determinar a classe DC (*Design Chemical*) do concreto para uma vida útil de 100 anos (Tabela **Erro! A origem da referência não foi encontrada.**). Com a classe, se determinam os valores de máxima relação água/cimento, consumo e tipo de cimento (Tabela).

Para efeito comparativo com as recomendações de relação água/cimento encontradas devido ao ataque por cloretos, considera-se a classe de agressividade em que o solo está inserido como a AC-5, a mais severa condição de exposição aos sulfatos. Para essa classe, para uma vida útil de 100 anos, a classe do concreto é a DC-4. Com isso, recomenda-se uma relação água/cimento de 0,35; 0,4 ou 0,45 (valores associados a outras características do concreto).

2.2.4 Tipo de cimento

A ABNT NBR 5736:1999 [18] permite a mistura de até 50% de pozolana com o clínquer, sulfato de cálcio e material carbonático para formar o CPIV. O cimento pozolânico, devido à reação da pozolana com o hidróxido de cálcio formado na hidratação do cimento, possui uma durabilidade maior, pois o hidróxido de cálcio, que é altamente solúvel e lixiviável, encontra-se combinado na forma de silicato de cálcio hidratado, componente com maior resistência frente a agentes agressivos. O mesmo ocorre com CPIII, que segundo ABNT NBR 5735:1991 [19], é a mistura de clínquer, sulfato de cálcio e material carbonático com 30 a 70% de escória alto-forno.

Estes tipos de cimento, portanto, são indicados em obras expostas à ação de água corrente e ambientes agressivos. O concreto feito com este produto se torna menos permeável, mais durável, apresentando resistência mecânica à compressão em longas idades superior à do concreto feito com cimentos Portland com menores teores de adições. Apresentam menor geração de calor de

Tabela 11 - Classificação da resistência dos concretos frente ao risco de corrosão das armaduras

Classe de concreto	Classe de resistência	Máxima relação a/c	Deterioração por carbonatação	Deterioração por cloretos
			Teor de adições	Teor de adições
Durável	≥C50	≤0,38	≤10% de pozolana, metacaulim ou escória de alto-forno	≤20% de pozolana ou metacaulim ≤65% de escória de alto-forno aço galvanizado ou inox
Resistente	C35 C40 C45	≤0,50	≤10% de pozolana ou metacaulim ≤15% de escória de alto-forno	≤10% de pozolana ou metacaulim ≤35% de escória de alto-forno aço galvanizado ou inox
Normal	C25 C30	≤0,62	Qualquer	Qualquer
Efêmero	C10 C15 C20	Any	Qualquer	Qualquer

Fonte: Medeiros, Andrade e Helene, 2011

hidratação durante a pega do concreto, já que suas reações são mais lentas, o que favorece sua aplicação em peças com grande volume, o que pode ocorrer em blocos de fundação, por exemplo. Ainda, a reação álcali-agregado, reação expansiva que pode ocorrer em estruturas acabadas, é mitigada com a inserção de pozolanas, de acordo com a ABNT NBR 15577:2008 [20]. Nagesh (2012) [21] afirma que é recomendável a aplicação de cimentos deste tipo para a produção de elementos estruturais potencialmente propensos a este ataque, como os em contato com o solo.

É sabido que a ABNT NBR 6118:2014 [2] define o gás carbônico e os íons cloretos como os agentes agressivos mais importantes para a estrutura de concreto, devendo ser previstos e evitados na fase de projeto e uso da edificação. A norma ainda refere o ataque por lixiviação e reações expansivas, como a provocada pela álcali-agregado e por sulfatos. Na ausência de valores de ensaios experimentais, Medeiros, Andrade e Helene (2011) [22] recomendam a adoção de uma especificação orientativa, conforme apresentado na Tabela 11 e Tabela 12, com uso de adições pozolânicas.

Portanto, para a análise da durabilidade das estruturas enterradas, em termos de projeto, avalia-se a composição química (tipo) e consumo mínimo de cimento, entre outros fatores.

2.3 Modelos de previsão de vida útil

Os modelos teóricos de previsão de vida útil ajudam a entender a taxa de propagação de agentes agressivos ao interior do concreto e determinar o cobrimento das armaduras necessário e outros meios de proteção, como redução da relação água/cimento, destacam Bolina e Tutikian [23]. A interpretação destes modelos teóricos, que normalmente são desenvolvidos com base em ensaios experimentais, auxilia na compreensão da velocidade de deterioração química dos constituintes do concreto.

Para a determinação da durabilidade das estruturas de concreto deve-se analisar modelos de previsão de vida útil de penetração de íons cloretos, que dependem, basicamente, da porosidade do

material e cobrimento das armaduras, na pior situação, por ser uma rápida penetração. Os modelos teóricos mais apropriados são o de Helene (1993) [24] e Bob (1996) [25].

2.3.1 Helene (1993) [24]

O modelo determina a profundidade de penetração (y_c) dos íons cloretos de acordo com a equação 1.

$$y_c = k \cdot \sqrt{t} \quad (1)$$

Sendo t o tempo, em anos, e k o coeficiente de difusão dos íons cloretos. Helene (1993) [24] sugere que a concentração de cloretos em um elemento estrutural seja expressa em relação à massa de cimento ($Cl_{cemento}$), diretamente influenciada pela concentração de cloretos no ambiente (Cl_{amb}). A expressão que correlaciona estas variáveis segue a equação 2.

$$Cl_{cemento} = \frac{Cl_{amb} \cdot Ab \cdot \gamma \cdot 0,01}{C} \quad (2)$$

Onde $Cl_{cemento}$ é o consumo de cimento, em kg/m^3 , Ab é a absorção máxima de água no concreto, expressa em %, e γ a massa específica do concreto, em kg/m^3 .

2.3.2 Bob (1996) [25]

Após verificações baseadas em dados de experimentos de longa duração, Bob (1996) [26] observou que a modelagem da penetração de cloretos pode ser expressa através da equação 3.

Tabela 12 - Classificação da resistência dos concretos frente ao risco de deterioração por lixiviação ou por formação de compostos expansivos

Classe de concreto	Classe de resistência	Deterioração por expansão		Deterioração por lixiviação
		Teor de C_3A no cimento anidro	Teor de adições	Teor de adições
Durável	$\geq C50$	$\leq 5\%$	$\geq 20\%$ de pozolana ou metacaulim $\geq 65\%$ de escória de alto forno	$\geq 20\%$ de pozolana ou metacaulim $\geq 65\%$ de escória de alto forno
Resistente	C35 C40 C45	$\leq 5\%$	$\geq 10\%$ de pozolana ou metacaulim $\geq 35\%$ de escória de alto forno	$\geq 10\%$ de pozolana ou metacaulim $\geq 35\%$ de escória de alto forno
Normal	C25 C30	$\leq 8\%$	Qualquer	Qualquer
Efêmero	C10 C15 C20	Qualquer	Qualquer	Qualquer

Fonte: Medeiros, Andrade e Helene, 2011

$$x_m = 150 \cdot \left(\frac{c \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot d}{f_c} \right) \cdot \sqrt{t} \quad (3)$$

Sendo x_m a profundidade média de penetração de cloretos, em milímetros, f_c a resistência à compressão característica do concreto, em

MPa, c a capacidade de fixação de cloretos, k_1 a influência da temperatura no modelo, k_2 a influência da umidade e d a relação entre a concentração crítica e a concentração superficial de cloretos na estrutura.

3. Resultados e discussões

Com base nas normas internacionais e trabalhos referência da área foram propostos parâmetros mínimos para garantir a VUP de estru-

Tabela 13 - Modelo de previsão de vida útil para elementos submetidos a severa agressividade por cloretos, segundo (a) Helene (1993) (24) e (b) Bob (1996) (25)

Fraca agressividade									
(a)					(b)				
C	340	kg/m ³	Clsup.	0,0441 %	f_c	40	MPa		
γ	2500		k	0,0441	k_1	0,75		cobr.	36,5 mm
Cambiente	0,3		t	75 anos	k_2	1		c+ΔC	46,5 mm
Abh	2	%	y	3,309 cm	d	1,5			
Cobr.				33,1	c	1			
c+ΔC				43,1 mm	t	75	anos		
DADOS DE INSERÇÃO (cinza)					DADOS DE INSERÇÃO (cinza)				
Moderada agressividade									
(a)					(b)				
C	370	kg/m ³	Clsup.	0,059028 %	f_c	40	MPa		
γ	2500		k	0,059028	k_1	1,25		Cobr.	45,7 mm
Cambiente	0,5		t	75 anos	k_2	1		c+ΔC	55,7 mm
Abh	1,7	%	y	4,427083 cm	d	1,5			
Cobr.				44,3	c	1			
c+ΔC				54,3 mm	t	75	anos		
DADOS DE INSERÇÃO (cinza)					DADOS DE INSERÇÃO (cinza)				
Severa agressividade									
(a)					(b)				
C	400	kg/m ³	Clsup.	0,0781 %	f_c	50	MPa		
γ	2500		k	0,0781	k_1	1,5		Cobr.	58,5 mm
Cambiente	2,5		t	75 anos	k_2	1		c+ΔC	68,5 mm
Abh	0,5	%	y	5,859 cm	d	1,5			
Cobr.				58,6	c	1			
c+ΔC				68,6 mm	t	75	anos		
DADOS DE INSERÇÃO (cinza)					DADOS DE INSERÇÃO (cinza)				

Tabela 14 – Recomendações para especificação dos concretos para atender VUP de 75 anos para estruturas enterradas

Condição de exposição em função da agressividade	Sulfato solúvel em água (SO ₄) presente no solo (% em massa)	Classe de concreto	Relação a/c máxima	Consumo de cimento mínimo (kg/m ³)	Tipo de cimento	Cobrimento nominal (mm)
Fraca	0,00 a 0,10	C40	0,50	340	Cimento CPIIE ou CPIIZ ou utilização de 5% de sílica ativa ou metacaulim	45
Moderada	0,10 a 0,20	C40	0,40	370	Cimento CPIII (com no mínimo 60% de escória) ou CPIV (com no mínimo 30% de pozolana) ou utilização de 10% de sílica ativa ou metacaulim	55
Severa	Acima de 0,20	C50	0,35	400	Cimento resistente a sulfato	70

turas enterradas de 75 anos, atingindo o nível superior da Norma de Desempenho. Os parâmetros especificados avançam nas recomendações de normas que apresentam especificações para este tipo de estruturas, tal como a ACI 318-1:2002 [9], EN 206-1:2000 [8], IS 456:2000 [7], ABNT NBR 15577-1 [26] e BS 8500-1:2006 [11]. Estes parâmetros de durabilidade, a exemplo do que propõe a ABNT NBR 6118:2014 [2], são a resistência à compressão mínima, relação água/cimento máxima, consumo de cimento mínimo, tipo de cimento e cobrimento nominal das armaduras.

Através dos modelos de previsão descritos, se obteve os parâmetros de projeto, para atender a VUP de 75 anos para estruturas enterradas com agressividade fraca, moderada e forte, como mostra a Tabela 13. Foram avaliados os modelos de Helene (1993) [24] e Bob (1996) [25] para usar um valor médio entre estes. Como os modelos representam ataque de íons cloretos à estrutura, se obteve o valor crítico para elementos enterrados.

Na Tabela 14 estão determinadas as propriedades de projeto para atender a esta expectativa, com todos os parâmetros numericamente embasados e alinhados com as referências nacionais e internacionais.

As especificações da relação a/c seguiram as da BS 8500-1:2006 [11]. Esta norma ainda prevê variações de relação a/c e cobrimento, o que não foi seguido neste artigo.

Se adotou a classificação da agressividade das normas nacionais, como a ABNT NBR 12655:2015 [3], e internacionais, como a ACI 318-11:2002 [9], EN 206-1:2000 [8] e IS 456:2000 [7], com a divisão entre agressividade fraca, moderada e severa. Observa-se que, para uma classe de agressividade fraca é especificado um cobrimento nominal de 45mm, que, segundo os modelos de pre-

visão de vida útil, protegerá a estrutura por 75 anos. Se a estrutura estiver locada em uma agressividade moderada, o cobrimento nominal deve ser especificado em 55mm. E, em ambientes de agressividade severa o cobrimento nominal será de 70mm. Recomenda-se o uso de fibras ou armação do cobrimento quando este for superior a 50mm (IS 456:2000 [7]).

4. Conclusões

A ABNT NBR 15575-2:2013 [1] estabelece parâmetros inéditos de durabilidade dos sistemas, até então não abordados no país. Por ser uma norma de desempenho, apoia-se em normas prescritivas do sistema normativo brasileiro, porém não há indicativo de como cumprir a exigência de durabilidade superior. O atendimento ao desempenho superior para estruturas de concreto armado enterradas, tal como os blocos de fundação e as estacas, são exemplos desta lacuna. Para cumprir com este propósito, um levantamento das normatizações existentes no mundo, bem como uma análise dos demais referenciais bibliográficos existentes, foi necessário para fundamentar a tomada de decisão. Uma comprovação através de modelos teóricos de vida útil foi necessária para validar este comparativo. Concluiu-se que, para atestar uma VUP de 75 anos, a estrutura de concreto enterrada pode ser elaborada com um cimento com adições, o que proporciona uma maior durabilidade quando em contato com regiões ou materiais contaminados, evitando a propagação de uma potencial reação álcali-agregado. Ainda foram definidos parâmetros de dosagem dos concretos, em relação à resistência à compressão, relação água/cimento e consumo de cimento, além do cobrimento nominal das barras de

aço, para garantir a VUP de 75 anos, nível superior da Norma de Desempenho.

5. Referências bibliográficas

- [1] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15575-2: Edificações habitacionais – Desempenho. Parte 2: Requisitos para os sistemas estruturais. Rio de Janeiro, 2013.
- [2] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.
- [3] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12655: Concreto - Controle, preparo e recebimento. Rio de Janeiro, 2015.
- [4] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8681: Ações e segurança nas estruturas - Procedimento. Rio de Janeiro, 2004.
- [5] TUTIKIAN, B.F. ISAIA, G.C., HELENE, P. Dosagem dos concretos de cimento Portland In: ISAIA, Geraldo Cechella. Concreto: Ciência e Tecnologia. São Paulo: Ipsilon. 2011. V.1. Cap. 12. P.415-452.
- [6] BRITISH RESEARCH ESTABLISHMENT – BRE Construction Division. Concrete In Aggressive Ground (Special Digest 1). Garston, 2005.
- [7] INDIAN STANDARD. IS-456: Plain and Reinforced concrete - Code of Practice. New Delhi, 2000.
- [8] EUROPEAN STANDARD. EN 206-1: Concrete – Part 1: Specification, Performance, Production and Conformity. Brussels, 2000.
- [9] AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 318-11: Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary. Reported by ACI Committee, Detroit, Michigan, U.S.A., 2002.
- [10] NEVILLE, A. M.; BROOKS, J.J. Tecnologia do Concreto. Bookman: São Paulo, 2013.
- [11] BRITISH STANDARDS INSTITUTION. BS 8500-1: Concrete – Complementary British standard to BS EN 206-1 – Part 1: Method of specifying and guidance for the specifier. London, 2006.
- [12] CEMENT CONCRETE & AGGREGATES AUSTRALIA - CCAA. Chloride Resistance of Concrete. Sydney, 2009.
- [13] FIGUEIREDO, Enio Pazini. Durabilidade e vida útil das estruturas de concreto. In: ISAIA, Geraldo Cechella. Concreto: Ciência e Tecnologia. São Paulo: Ipsilon. 2011. V.1. Cap. 25. P.889-902.
- [14] POLITO, Giuliano. Corrosão Em Estruturas De Concreto Armado: Causas, Mecanismos, Prevenção E Recuperação. 2006. 188 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.
- [15] AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS. ASCE 7-05: Minimum design loads for buildings and other structures. Virginia, 2005.
- [16] MEHTA, P.K. E MONTEIRO, P.J.M. Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais. 3. Ed. São Paulo: IBRACON, 2014.
- [17] ISAIA, Geraldo Cechella. A água no Concreto. In: ISAIA, Geraldo Cechella. Concreto: Ciência e Tecnologia. São Paulo: Ipsilon. 2011. V.1. Cap. 09.
- [18] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5736: Cimento Portland pozolânico. Rio de Janeiro, 1999.
- [19] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5735: Cimento Portland de alto-forno. Rio de Janeiro, 1991.
- [20] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15577: Agregados - Reatividade álcali-agregado. Parte 1: Guia para avaliação da reatividade potencial e medidas preventivas para uso de agregados em concreto. Rio de Janeiro, 2013.
- [21] NAGESH, M. Notes on concrete durability chapter. Government Engineering College: Ramanagar, 2012.
- [22] MEDEIROS, Marcelo Henrique Farias de; ANDRADE, Jairo José de Oliveira; HELENE, Paulo. Durabilidade e vida útil das estruturas de concreto. In: ISAIA, Geraldo Cechella. Concreto: Ciência e Tecnologia. São Paulo: Ipsilon. 2011. V.1. Cap. 16. P.773-808.
- [23] BOLINA, F. L.; TUTIKIAN, B. F. Parâmetros da estrutura de concreto armado Segundo os preceitos de desempenho, durabilidade e segurança contra incêndio. Concreto & Construção, n.76, p.133-147, 2014.
- [24] HELENE, P. Contribuição ao Estudo da Corrosão em Armaduras de Concreto Armado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.
- [25] BOB, C. Probabilistic Assessment of Reinforced Corrosion. In: Existing Structures. In: International Conference: Concrete Repair, Rehabilitation and Protection. Proceedings. Dundee, 1996.p.17-28.
- [26] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15577-1: Agregados - Reatividade álcali-agregado. Parte 2: Guia para avaliação da reatividade potencial e medidas preventivas para uso de agregados em concreto. Rio de Janeiro, 2008.