Revista de Engenharias da Faculdade Salesiana
n. 8 (2018) pp. 14-25

http://www.fsma.edu.br/RESA

Durabilidade do Concreto: Análise dos Requisitos dos Materiais Constituintes

Helena Rodrigues Leite; Ricardo Girardi; Daniel Hastenpflug

***Resumo*—A durabilidade do concreto é dependente de diversos fatores, sendo alguns objetos de requisitos normativos, por meio de especificações para o concreto. A maioria dos parâmetros de durabilidade estão ligados ao ambiente ao qual o concreto será inserido. Entretanto, os agentes agressivos não estão apenas no ambiente, mas podem estar presentes nos materiais que compõe esse concreto. Assim, se a quantidade máxima permitida de substâncias nocivas nos insumos do concreto não for avaliada, elas podem contribuir para a deterioração da estrutura de concreto independente do ambiente onde está exposta. Este trabalho tem com objetivo apresentar os parâmetros que os materiais constituintes do concreto devem respeitar de acordo com as referências normativas e também a sua evolução, bem como a comparação entre diferentes especificações por meio de exposições. Com isso, o trabalho verificou, que mesmo com as atualizações dos requisitos normativos, as novas metodologias de ensaio e limites de agentes agressivos, os parâmetros relacionados a durabilidade dos materiais, divergem entre normas. Portanto, dificulta o controle sobre os contaminantes presentes nos materiais, bem como não é salientada a quem compete a responsabilidade para avaliação dos contaminantes presentes nos materiais, se é do fornecedor ou do consumidor.**

***Palavras-chave*—insumos para concreto; corrosão da armadura; carbonatação; ataque por sulfato; reação álcali-agregado.**

***Abstract*—The durability of the concrete depends on several factors, which some of them are normative requirements of the concrete specifications. Most durability parameters refer to the environment which the concrete will be used. However, aggressive agents are not restricted to the environment, but may be present in the materials that compose the concrete. Thus, it is mandatory the correct evaluation of maximum allowable amount those harmful substances mixed in the concrete to minimize the risks of deterioration of the material in any environment presented. The objective of this paper is to present parameters of materials which the concrete is composed. Those parameters must respect the normative references and also its evolution, as well as the comparison between different specifications through exhibitions. Thereat, this work verified that, even with the updates of the normative requirements, the new assay methodologies and limits of aggressive agents, the parameters related to the durability of the material diverge between norms. Therefore, the control of contaminants presented in the materials are very difficult, as well as to indicate who is responsible for evaluate it, the supplier or the consumer.**

***Keywords*—materials for concrete; reinforcement corrosion; carbonation; sulphate attack; alkali-aggregate reaction.**

Helena Rodrigues Leite é acadêmica do curso de Engenharia Civil da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul – Porto Alegre/RS - Brasil (e-mail: helena.leite@acad.pucrs.br).

Ricardo Girardi é mestre em construção civil, professor da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul e pesquisador da Fundação de Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul – CIENTEC (e-mail: ricardo.girardi@pucrs.br ou ricardo-girardi@cientec.rs.gov.br).

Daniel Hastenpflug é doutor em engenharia e tecnologia de materiais, professor da Universidade Federal de Santa Catarina (e-mail: hasten@gmail.com).

I. Introdução

O concreto é o material mais consumido na construção civil por apresentar grande facilidade de aplicação. Estima-se que 11 bilhões de toneladas de concreto sejam consumidos anualmente no mundo [1]. Sendo assim, é gasto, segundo a Federación Iberoamericana de Hormigón Premesclado (FIHP), em média, aproximadamente, 1,9 toneladas de concreto por habitante ao ano, perdendo somente para o consumo de água [1]. Já no Brasil, o concreto produzido nas centrais dosadoras é próximo de 30 milhões de metros cúbicos ao ano, o que corresponde, em torno de 72 milhões de toneladas [1].

Apesar do concreto ser um dos materiais mais utilizados na contrução civil, no passado, a preocupação com sua durabilidade era deixada em um segundo plano, pois acreditava-se ser um material com vida útil ilimitada [2]. Porém, diversas estruturas de concreto sofrem deteriorações precoces. E um dos principais mecanismos de degradação do concreto armado é a corrosão de armaduras e um dos

principais agentes agressivos que origina a corrosão no concreto armado é o íon cloreto [2].

Os danos que comprometem a durabilidade e a vida útil das edificações são causados principalmente pela degradação dos materiais devido a agentes agressivos, os quais estão presentes no ambiente inserido ou nos próprios materiais [3]. Com isso, a durabilidade e a vida útil do concreto passaram a ser um assunto essencial na construção civil.

É possível dosar um concreto verificando quais parâmetros que se relacionam com a durabilidade, proporcionando assim o aumento da sua vida útil [4]. Vale destacar que com a introdução da NBR 15575 [5], ficou mais evidente a preocupação com a durabilidade do concreto, pois há exigência de parâmetros mínimos de vida útil das edificações.

Um fator que influencia consideravelmente na durabilidade do concreto é o ambiente no qual está inserido, pois o nível de agressividade determinará as características que a estrutura deverá apresentar para não comprometer sua integridade. A NBR 6118 [6] e a NBR 12655 [7] fixam requisitos específicos para o concreto em função do local de aplicação, a fim de que o mesmo resista aos agentes agressivos e a vida útil seja maximizada.

Por outro lado, muitas vezes a preocupação com o material empregado para dosar o concreto é ignorado, permitindo a inserção de contaminantes através desses insumos ao concreto. Assim o estudo em tela tem o objetivo avaliar os requisitos de agentes agressivos, presentes nos materiais que compõem o concreto, com base nos valores pré-estabelecidos em referências normativas. Em paralelo, serão abordados os requisitos relativos ao ambiente onde o concreto está inserido e a evolução desses parâmetros de durabilidade, em função do tempo.

Para tanto, este artigo está organizado da seguinte maneira. A seção II apresentará a estrutura interna do concreto e sua composição, e por fim os principais ataques no concreto armado por carbonatação, sulfato e cloreto e a reação álcali-agregado. A seção III especificará os principais parâmetros de durabilidade do concreto a serem analisados. A seção IV informará os requisitos normativos referentes aos materiais constituintes do concreto e na estrutura, juntamente com sua evolução, e também as especificações por meio de exposições. A seção V apresentará a analise e a comparações dos requisitos normativos apontados na seção IV. A seção VI são as considerações finais do presente trabalho.

II. Referencial Teórico

A. Estrutura Interna do Concreto

Para entender as propriedades do concreto, é importante, compreender sua estrutura interna. O concreto tem uma estrutura heterogênea e altamente complexa, sendo difícil estabelecer modelos exatos. Entretanto é possível compreender a sua estrutura, das propriedades dos constituintes e a relação entre elas, é possível ter resultados positivos em relação às propriedades do material e prever o material com segurança [8].

O concreto é composto essencialmente de cimento, água, agregado miúdo e graúdo [9]. As características e propriedades do concreto dependerão da qualidade e das proporções dos materiais componentes, sendo o cimento o material mais responsável pela transformação da mistura [10].

O cimento é um aglomerante que envolve os agregados, influenciando no desempenho, qualidade e durabilidade do concreto [11]. Quando o cimento é misturado com a água, passa a ser chamado de pasta de cimento, e quando os agregados miúdos e graúdos são misturados na pasta, resulta no concreto [12]. Eventualmente adições minerais e aditivos químicos também são utilizados para a fabricação de concretos. As adições são acrescentadas com o objetivo de melhorar as propriedades que o aglomerante confere ao concreto [13]. Os aditivos, por sua vez, são adicionados com a intenção de modificar e melhorar uma ou mais características do concreto, tanto no estado fresco como no endurecido [9].

O cimento Portland é o mais utilizado nas construções civis, tratando-se de um aglomerante hidráulico, que tem propriedades ligantes [14]. Em contato com a água, ele endurece e fornece resistência a compressão [14]. Há no mercado diferentes tipos de cimento Portland. Cada cimento possui uma composição distinta, sendo adequado para peculiaridades específicas. A análise das propriedades do cimento a ser escolhido, aliada às características da construção, favorecerá a qualidade do concreto [15].

Os agregados correspondem ao material granular, e incluem as areias, os pedregulhos, pedras britadas ou a escória de alto forno, utilizados com um meio cimentante, para criar um concreto ou argamassa de cimento hidráulico [14].

Em suma, o concreto é formado por agregados, cobertos por uma matriz porosa de pasta de cimento, com uma zona de transição entre elas [11]. É importante que se tenha uma boa aderência entre a pasta de cimento e o agregado, pois geralmente essa zona tem resistência menor do que a do agregado ou da pasta, contribuindo assim na redução da durabilidade [8].

Para alcançar a qualidade e preservar a durabilidade do concreto, é importante conhecer as características de cada material e suas influências nas propriedades do concreto fresco e endurecido.

Composição

O concreto possui uma estrutura composta por materiais com diversas propriedades. A composição desses materiais influencia diretamente nas propriedades físicas e químicas que são primordiais para durabilidade e resistência da estrutura de concreto armado.

O cimento Portland é um pó cinza, sendo resultado da moagem do clínquer com uma pequena quantidade de sulfato de cálcio [8]. O clínquer constitui-se de uma mistura heterogênea com diversos minerais processados pelas reações a alta temperatura entre óxido de cálcio e sílica, alumina e

óxido de ferro, presentes respectivamente, na rocha carbonática e argila [8].

Os quatro principais compostos do clínquer são o C_3S (alita), C_2S (belita), C_3A (celita), C_4AF (ferrita), os quais representam, aproximadamente, 90% em massa [11]. A Tabela I apresenta as notações abreviadas, utilizadas pela química do cimento.

Tabela I – Compostos principais do clínquer

Nome do composto	Fórmula	Abreviatura
Silicato tricálcico	$3CaO.SiO_2$	C_3S
Silicato dicálcico	$2CaO.SiO_2$	C_2S
Aluminato tricálcico	$3CaO.Al_2O_3$	C_3A
Ferroaluminato tetracálcico	$4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$	C_4AF

Fonte: Adaptado de Neville (2016) [12]

Outros compostos também são encontrados no cimento, sendo denominados de secundários, são os MgO, TiO_2, MnO_2, K_2O e Na_2O, os quais representam uma pequena porcentagem da massa do clínquer [14]. Apesar de o Na_2O e o K_2O serem compostos secundários, o seu nível de importância é o mesmo que dos compostos que estão em maior porcentagem, pois quando reagem com alguns agregados, os produtos dessa reação podem causar a desintegração do concreto, além de influenciarem na velocidade de hidratação [14].

No momento em que esses compostos entram em contato com a água, originam compostos hidratados [13]. O clínquer desenvolve uma reação química com a água, tornando-se pastoso e, em seguida, endurece, adquirindo elevada resistência e durabilidade [10].

Os componentes do clínquer atuam de diferentes maneiras no processo químico de hidratação e cada um contribui da sua maneira para a constituição das propriedades do concreto e argamassa, tanto no estado fresco e endurecido. Quando acontece a hidratação do cimento Portland, aparecem os primeiros cristais acirculares de um sulfoaluminato de cálcio hidratado, favorecendo a formação da etringita [8]. Depois de algumas horas, cristais prismáticos grandes de hidróxido de cálcio ($Ca(OH)_2$) e pequenos cristais fibrilares de silicato de cálcio hidratado (C-S-H), precipitam, ocupando os espaços vazios [8]. Depois de um tempo, há o decréscimo da quantidade de sulfato dissolvido e a etringita instabiliza-se e converte-se em monossulfato (C_4ASH_{18}) [10].

Os principais compostos gerados na hidratação do cimento Portland são explicados a seguir [8]:

a) Silicato de Cálcio Hidratado (C-S-H): É o composto essencial para definição das propriedades da pasta. É originário da hidratação do C_3S e C_2S;

b) Hidróxido de Cálcio: Também conhecido como Portlandita, forma cristais grandes, formado a partir da hidratação do C_3S e C_2S. Em grandes quantidades, pode prejudicar a resistência química a soluções ácidas, por ser mais solúvel que o C-S-H e ser o responsável pelo pH básico do composto cimentício;

c) Sulfoaluminato de Cálcio: Na hidratação do cimento Portland, a relação iônica entre o sulfato/alumina, favorece a formação de etringita ($C_6AS_3H_{32}$). A etringita geralmente se converte em monossulfato hidratado (C_4ASH_{18}), o qual cristaliza em placas hexagonais, tornando o concreto vulnerável ao ataque por sulfato. O processo de hidratação ocorre com o composto C_3A e posteriormente em contato com a fonte de sulfato de cálcio (gesso).

Os agregados são materiais que não tem reações significativas quimicamente com a água [8]. Entretanto, dada a evolução da compreensão da influência do agregado na determinação de muitas propriedades do concreto, está sendo seriamente questionado se esse insumo é realmente inerte [8].

Os agregados possuem diversos tamanhos, formas e mineralogias, devendo ser formados por grãos de minerais duros, compactos, estáveis, duráveis e limpos [14]. Também, não podem possuir substâncias de natureza e em quantidade que prejudiquem a hidratação e o endurecimento do cimento, a proteção da armadura contra a corrosão, a durabilidade ou, quando for exigido, o aspecto visual externo do concreto [16].

É relevante ter um cuidado na escolha do agregado para não comprometer a durabilidade da estrutura. Eles são geralmente inertes por não possuírem propriedades ligantes [15]. Porém se forem utilizados materiais contaminados ou com características mineralógicas inapropriadas, é possível ocasionar ao concreto uma série de condições desfavoráveis, causando patologias e até o colapso da estrutura [15]. Mehta e Monteiro [8] e Neville [14] destacam que os principais contaminantes químicos presentes nos agregados, são os íons cloretos, sulfatos e até a própria sílica presente nos mesmos pode ter reatividade.

Por outro lado, os aditivos podem apresentar substâncias químicas nocivas, do tipo cloreto ou sulfato, provenientes da fabricação [14]. Já a água de amassamento do concreto, contem íons agressivos (cloretos e sulfatos) como apresenta a NBR 15900-1 [17], sendo os produtos químicos usados no tratamento da água a principal fonte de inserção desses íons.

Porosidade e Permeabilidade

A porosidade e permeabilidade são características fundamentais da qualidade do concreto, que estão relacionadas entre si. A permeabilidade é estabelecida como a capacidade com que o fluido pode escoar através de um sólido, e seu grau é determinado pelo tamanho e pela continuidade dos poros na estrutura do sólido [8].

A permeabilidade e a porosidade estão também relacionadas com a resistência do concreto a ataques químicos. Recena [3] informa que em um concreto com muitos poros pode haver a penetração de água do meio externo, podendo assim levar, em solução, agentes agressivos, diminuindo a sua durabilidade.

A permeabilidade é proveniente da relação água/cimento e do grau de hidratação do cimento [18]. Quando a relação água/cimento aumenta e o grau de hidratação for baixo, haverá elevação dos poros na pasta de cimento, portanto, ocorre a elevação da permeabilidade do concreto [8].

Petrucci [9] e Isaia [11] explicam que a relação água/cimento varia na razão inversa à resistência mecânica, pois à medida que esta relação aumenta, o concreto se torna mais poroso, reduzindo a resistência mecânica, aumentando a permeabilidade, e, por conseguinte, reduzindo a durabilidade.

Deve se ter, também, um cuidado na compactação e cura do concreto, pois concretos bem executados com bom adensamento e cura apropriada, tendem a ser menos porosos, e, portanto com baixa permeabilidade [18].

Os principais fluídos que podem ingressar pelo concreto e se deslocar pelo seu interior são a água, pura ou com íons agressivos de dióxido de carbono sulfatos e cloretos [14]. Dessa forma, a baixa permeabilidade e porosidade são determinantes para que essas substâncias não afetem a durabilidade das estruturas em concreto. Em suma, todos esses fatores são de grande importância para o concreto, a fim de proporcionar uma vida útil duradoura a estrutura.

B. Degradação do Concreto

Algumas manifestações patológicas são vistas nas construções civis em virtude de não se ter um bom projeto e cuidados na execução. Antes da elaboração do concreto, é importante analisar o ambiente, no qual serão contruídas as estruturas de concreto e os materiais que comporão o concreto, porque eles podem possuir agentes agressivos que podem comprometer a resistência mecânica e química da estrutura de concreto, ocasionando sua degradação e comprometendo assim sua vida útil.

Ataque por Carbonatação

Em uma estrutura de concreto armado, o concreto proporciona proteção à armadura devido ao seu pH acima de 11,5 na solução dos poros do concreto [19]. Assim, a película de passivação que envolve o aço, a qual é uma camada proporcionada pelo concreto, se mantem inalterada e o processo de corrosão não acontece [19]. A estrutura possui proteção física e química, sendo cada uma responsável, respectivamente, pelo cobrimento e pelo pH básico do concreto [20].

Os ambientes, que possuem altas concentrações de CO_2, comprometem a durabilidade das estruturas de concreto armado, por causa da penetração desta substância nos poros do concreto. A alcalinidade do concreto, obtida pela presença do hidróxido de cálcio ($Ca(OH)_2$), pode ser reduzida pela reação com o CO_2 presente na atmosfera [14]. O CO_2, juntamente com a umidade, reage com o $Ca(OH)_2$, que é solúvel em água, formando o carbonato de cálcio ($CaCO_3$) [12]. Girardi [21] apresenta a reação entre o CO_2, água e a portlandita:

$$CO_2 + H_2O \rightarrow H_2CO_3 \text{ (Ácido carbônico)}$$

$$2H_2CO_3 + Ca(OH)_2 \rightarrow Ca(HCO_3)_2 + 2H_2O \text{ (Bicarbonato de cálcio)}$$

$$Ca(HCO_3)_2 + Ca(OH)_2 \rightarrow 2CaCO_3 + 2H_2O$$

As maiores taxas de carbonatação ocorrem quando a umidade relativa está entre 50% a 65%, pois a reação acontece progressivamente no exterior do concreto e ao avançar para seu interior, só há carbonatação se houver ar e água nos poros da pasta de cimento [22]. A carbonatação reduz o pH da água dos poros da pasta de cimento para cerca de 9, e quando todo o $Ca(OH)_2$ é carbonatado, o pH diminui para 8,3 [12].

A carbonatação é uma reação progressiva. Quando o baixo pH atinge as proximidades da superfície da armadura, a película protetora do aço é removida, e inicia-se, então, a corrosão do aço se houver oxigênio e umidade suficientes para as reações de corrosão [12]. E se o concreto apresentar fissuras pode haver a corrosão do aço antes da frente de carbonatação atingir a superfície do aço [12].

Isaia [19] cita que a lixiviação do hidróxido de cálcio traz como consequências a formação do carbonato de cálcio, o surgimento de eflorescência (depósitos de cor branca) que conforme Dórea *et al.* [23] são sais que se depositam na superfície do concreto e podem alterar sua aparência e, em alguns casos, podem ser agressivos, causando desagregação.

Ataque por Sulfatos

Os íons sulfato são altamente prejudiciais às estruturas de concreto. Os íons de sulfato estão presentes nos solos, agregados, na água do mar e em águas subterrâneas, e reagem com os produtos de hidratação do cimento, formando a gipsita e etringita secundária, as quais têm propriedades expansivas, provocando fissurações, expansões e comprometimento da vida útil do concreto [24].

Os íons sulfato, em contato com o concreto, reagem com o $Ca(OH)_2$ e constitui o sulfato de cálcio, que combinado com o C_3A, ocasiona o sulfoaluminato de cálcio (etringita ($C_6AS_3H_{32}$)) que é expansivo e provoca a degradação do concreto [13].

Medidas preventivas devem ser feitas para estruturas em concreto que estão sujeitas a íons de sulfato. As fases de aluminato de cálcio são as responsáveis pelo evento e, por isso, cimentos com escória ou pozolana possuem melhor resistência aos sulfatos por apresentarem baixo teor em aluminato de cálcio (C_3A) e baixa disponibilidade de $Ca(OH)_2$, os quais são componentes importantes para a reação com o sulfato que produz a etringita expansiva [24].

Ataque por Cloretos

Assim como o ataque por carbonatação, o concreto que envolve o aço, nas estruturas de concreto armado, pode sofrer degradação devido aos íons de cloreto. O concreto, quando não executado de maneira cuidadosa, pode não ser uma barreira perfeita, permitindo que agentes agressivos como carbonatação ($CaCO_3$) e os íons cloreto (Cl^-) danifiquem a camada passivante ou protetora permitindo a corrosão da armadura [25]. A ação principal do ataque por cloretos é a corrosão do aço, pois somente com a corrosão da armadura, que se inicia a degradação no concreto [14].

Isaia [22] menciona que os íons de cloreto podem entrar em contato com concreto de diferentes formas, como por exemplo, com aceleradores de pega que possuem $CaCl_2$, agregados, na água de amassamento, atmosfera marinha, água do mar, etc. A

reação somente acontece com a presença de água e oxigênio na estrutura. A reação depende da água, mas, quando o concreto está completamente saturado, não há corrosão, devido à ausência de oxigênio que é fundamental para o processo [12].

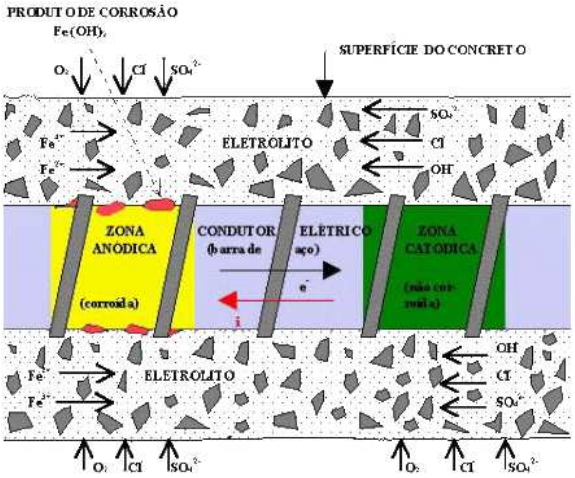
Se a relação de Cl^-/OH^- for maior que 0,6, o filme protetor de óxido de ferro torna-se permeável ou instável permitindo que os íons de cloreto destruam essa camada, e com a presença de água e oxigênio começa a corrosão do aço [8]. Neville [12] cita que a camada passivadora precisa ser penetrada para que aconteça a corrosão da armadura, assim os íons de cloreto em contato com a superfície do aço, formam um ânodo, e a camada de passivação representando o cátodo. Neville [12] apresenta estas reações:

$$Fe^{++} + 2Cl^- \rightarrow FeCl_2$$

$$FeCl_2 + 2H_2O \rightarrow Fe\,(OH)_2 + 2HCl$$

O processo de corrosão começa quando a película passivante da armadura é destruída pela ação combinada da umidade, oxigênio e íons de cloreto que penetram no concreto [25]. A concentração desses elementos é desigual ao longo da armadura, conferindo o aparecimento de uma pilha de corrosão, por causa da diferença de potencial (*ddp*) entre trechos diferentes (ânodo e cátodo) [25]. Com isso, manifesta-se uma corrente elétrica (fluxo de íons), que percorre das áreas anódicas para o concreto (eletrólito), corroendo a armadura, em seguida, penetra nas áreas catódicas, protegendo-a, e retorna às áreas anódicas, pela armadura, fechando o circuito [25]. Esse processo é ilustrado na Figura 1 e tem suas equações dadas por:

Figura 1: Formação de pilha de corrosão em concreto armado. O concreto representa o eletrólito. Na armadura, a zona anódica está na cor amarela e a zona catódica na cor verde.



Fonte: Vieira (2003) [25]

Reações anódicas:

$$Fe \rightarrow Fe^{++} + 2e^-$$

$$Fe^{++} + 2(OH^-) \rightarrow Fe(OH)_2 \text{ (hidróxido ferroso)}$$

$$4Fe(OH)_2 + 2H_2O + O_2 \rightarrow 4Fe(OH)_3 \text{ (hidróxido férrico)}$$

Reação catódica:

$$4e^- + O_2 + 2H_2O \rightarrow 4(OH^-)$$

A corrosão do aço traz consequências, como fissuração, lascamento ou delaminação do concreto devido ao aumento do volume dos produtos gerados pela reação e também a redução da seção transversal do aço, reduzindo a resistência mecânica [14]. Por isso é importante que a estrutura de concreto esteja bem executada para impedir que o cloreto penetre no cobrimento, atingindo, então o aço.

Reação Alcáli-Agregado

Agregados reativos a álcalis podem reagir com o cimento e danificar o concreto. A reação álcali-agregado, conhecida também como álcali-sílica, é uma reação química que envolve íons alcalinos do cimento Portland (Na e K), íons hidroxilas (OH-) e outros constituintes silicosos, os quais podem estar presentes nos agregados [8]. Essa reação forma um gel de silicato alcalino em volta dos agregados reativos, provocando expansão e fissuração, e por fim, gera perda de resistência, elasticidade e durabilidade do concreto [8].

Essa reação ocorre devido ao contato do cimento Portland, que possui mais do que 0,6% de Na_2O equivalente (Na_2O + 0,658 K_2O), com agregado reativo a álcalis [8]. A reação só ocorre com a presença de água, para que o gel formado absorva umidade e aumente de volume, resultando, assim, em pressão interna e na perda da aderência entre o agregado e a pasta de cimento [14].

III. Metodologia de Pesquisa

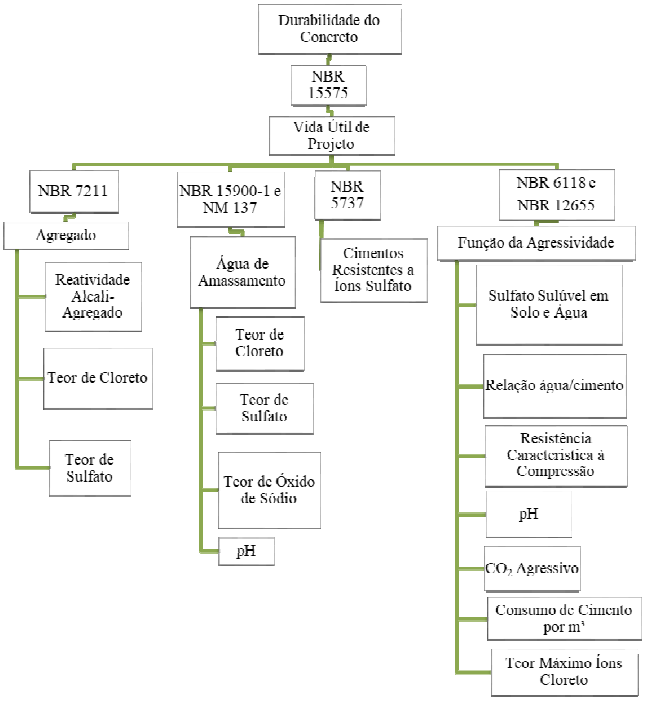
Diante do referencial teórico apresentado é possível elencar os principais problemas ocasionados por agentes agressivos externos, e também a ocorrência de contaminantes nos materiais que constituem o concreto. As medidas correlativas ou preventivas para os ataques por agentes externos são de maior controle, visto que avalia o local de aplicação e facilmente pode ser controlada através dos requisitos de projeto.

Em contrapartida, ao que tange os materiais é mais difícil a administração, pois engloba diferentes jazidas ou pontos de captação dos materiais que uma vez utilizados para a produção de concretos podem comprometer a estrutura no geral, sendo a recuperação mais onerosa. Dessa forma, serão analisados os requisitos e a evolução dos parâmetros normativos, referente aos materiais que constituem o concreto.

Assim, é possível elencar os principais parâmetros a serem analisados em forma de organograma. Verificaram-se os agentes nocivos em agregados e na água de amassamento, os cimentos resistentes a sulfato e a função de agressividade o

qual determina alguns limites máximos de substâncias nas estruturas de concreto, a fim de facilitar a interpretação dos requisitos normativos, focando no aumento na vida útil da estrutura, conforme recomendado pela NBR 15575-1 [5]. A Figura 2 ilustra o organograma.

Figura 2 – Organograma dos principais parâmetros da durabilidade da estrutura de concreto



IV. Requisitos de Durabilidade

A. Requisitos dos Materiais

Agregados

Atualmente a NBR 7211 (ABNT, 2009) [16] expõem limites de aceitação dos agregados miúdos e graúdos, ambos de origem naturais, não obtidos por processos químicos, destinados à produção de concretos de cimento Portland.

A Tabela II apresenta os limites máximos de substâncias nocivas nos agregados graúdos e miúdos, segundo as NBR 7211 (ABNT, 1983; 2005; 2009) [28] [29] [16]. A norma, ao ser revisada em 2005 e 2009, passou a especificar que nos agregados oriundos de regiões litorâneas, águas salobras ou se houver suspeita de contaminação natural (regiões onde ocorrem sulfatos naturais como a gipsita) ou industrial (água do lençol freático contaminada por efluentes industriais), os teores de cloretos e sulfatos não devem exceder os limites estabelecidos na Tabela II.

Tabela II — Limites máximos para a expansão devida à reação álcali-agregado e teores de cloretos e sulfatos presentes nos agregados

ANO	1983	2005 e 2009	2005	2009
Determinação	Limites	Método de ensaio	Limites	Limites
Reatividade álcali-agregado	Expansões máxima de 0,05% aos 3 meses e de 0,10% a seis meses. Contudo, se exceder 0,05% aos 3 meses e for menor que 0,1% aos seis meses, é considerada como expansão não excessiva.	ASTM C 1260	Expansão máxima de 0,10% aos 14 dias de cura agressiva	Expansão máxima de 0,19% aos 30 dias de idade (*)
		ABNT NBR 9773	Expansão máxima de 0,05% aos três meses	-
			Expansão máxima de 0,10% aos seis meses	-
Teor de cloretos (Cl-)	-	ABNT NBR 9917 ABNT NBR 14832	< 0,2% concreto simples	< 0,2% concreto simples
	-		< 0,1% concreto armado	< 0,1% concreto armado
	-		< 0,01% concreto protendido	< 0,01% concreto protendido
Teor de sulfatos solúveis (SO_4^{2-})	-	ABNT NBR 9917	< 0,1%	< 0,1%
(*) Avaliado na NBR 15577-1 (ABNT, 2008) [30].				

Fonte: Elaborado com base na NBR 7211 (ABNT, 1983; 2005; 2009) [28] [29] [16]

A NBR 7211 (ABNT, 1983) [28] não apresentava valores máximos de íons cloretos e sulfatos em agregados, apenas delimitava expansões excessivas à reação álcali- agregado, sem especificar o método de ensaio empregado para verificação dessa reação. A partir da NBR 7211 (ABNT, 2005) [29] foram fixados limites para a presença dos íons agressivos, cloretos e sulfatos, em função do tipo de concreto utilizado.

Além do mais a NBR 7211 (ABNT, 2005; 2009) [29] [16] passou a informar os dois ensaios empregados para reação álcali-agregado. A norma, nas duas atualizações, enfatiza que se os agregados ultrapassarem os limites estabelecidos para cloretos, eles ainda podem ser usados em concreto, desde que o teor total levado ao concreto pelos materiais que o compõe, verificado por ensaio realizado pelo método NBR 14832 ou ASTM C 1218, não excedam os limites sobre a massa de cimento a seguir:

a) Concreto armado exposto a cloretos nas condições de serviço da estrutura ≤ 0,15%;

b) Concreto armado em condições de exposição não severas (seco ou protegido da umidade nas condições de serviço da estrutura) ≤ 0,40%;

c) Outros tipos de construção com concreto armado ≤ 0,30%.

Do mesmo modo, a NBR 7211 (ABNT, 2005; 2009) [29] [16] determinou que agregados que ultrapassam o limite estabelecido para sulfatos solúveis são permitidos em concreto, contanto que o teor total transferido ao concreto pelos seus componentes, não exceda 0,2% ou que se utilize cimento Portland resistente a sulfatos conforme a NBR 5737 (ABNT, 1992) [31].

A NBR 7211 (ABNT, 2005) [29] salientava que agregados altamente reativos deveriam ser analisados em um ensaio que siga o método estabelecido na ASTM C 1260, não podendo apresentar expansão maior que a estabelecida na Tabela II. Caso os agregados fossem analisados pelo método ASTM C 1260, e apresentassem barras de argamassa com expansões superiores a 0,10%, só poderiam ser usados em concretos com teor total de álcalis menor ou igual a 3kg/m^3 ou quando comprovado que o cimento utilizado impossibilita a reação álcali-agregado, como por exemplo o cimento Portland de alto-forno e o cimento Portland pozolânico. Do mesmo modo, poderia ser analisada a reatividade do agregado de acordo com a ABNT NBR 9773 (ABNT, 1987), devendo ser respeitado os limites da Tabela II.

Cimento Portland

Conforme a NBR 6118 (ABNT, 2014) [6] a expansão por sulfato pela ação de águas ou solos que contenham ou estejam contaminados com sulfatos, desencadeiam reações expansivas e deletérias na pasta de cimento hidratado. O uso de cimento resistente a sulfatos impede que esse fenômeno ocorra, conforme NBR 5737 (ABNT, 1992) [31].

A NBR 5737 (ABNT, 1992) [31] informa que no cimento Portland, durante a moagem do clínquer, são aceitos adições de escórias granuladas de alto-forno ou materiais pozolânicos e/ou materiais carbonáticos para resistir aos sulfatos. De acordo com a NBR 5737 (ABNT, 1992) [31] os cimentos resistentes aos sulfatos devem apresentar:

a) Teor de C_3A do clínquer menor ou igual a 8% e cujo teor de adições carbonáticas seja igual ou inferior a 5% da massa do aglomerante total e/ou;

b) Cimentos Portland de alto-forno (CP III) cujo teor de escória de alto-forno esteja entre 60% e 70% e/ou;

c) Cimentos Portland pozolânicos (CP IV) cujo teor de material pozolânico esteja entre 25% e 40% e/ou;

d) Antecedentes com base em resultados de ensaios de longa duração ou referências de obras que comprovadamente indiquem resistência a sulfatos.

Água de Amassamento

As NBR NM 137 (ABNT, 1997) [32] e NBR 15900-1 (ABNT, 2009) [17] estabelecem os requisitos para a água de amassamento ser adequada à preparação de argamassa e concreto de cimento Portland. A Tabela III apresenta as quantidades de íons cloreto, sulfato e o pH máximo que a água de amassamento deve conter na preparação do concreto, além de, fornecer também o teor máximo de equivalente alcalino (óxido de sódio), caso sejam utilizados agregados reativos a álcalis na preparação do concreto.

Tabela III — Requisitos químicos para a água de amassamento

NORMA E ANO				NBR NM 137 (1997)	NBR 15900-1 (2009)
Determinação	**Método de ensaio**		**Tipo de estrutura**	**Teor máximo**	**Teor máximo**
	NBR NM 137 (1997)	**NBR 15900-1 (2009)**			
Teor de cloretos (Cl-)	NM 10	NBR 15900-6	Concreto protendido e graute	500 mg/L	500 mg/L
			Concreto armado	700 mg/L	1000 mg/L
			Concreto simples (sem armadura)	2000 mg/L	4500 mg/L
Teor de sulfatos (SO_4^{2-})	NM 137	NBR 15900-7	Todos	2000 mg/L	2000 mg/L
pH	Utiliza-se um potenciômetro para determinação do pH, com precisão de 0,1 unidades de pH.	-	Todos	de 5,5 a 9	-
Equivalente alcalino de óxido de sódio (Na_2O)	-	NBR 9917	Se utilizado agregados potencialmente reativos a álcalis	-	1500 mg/L

Fonte: Elaborado com base na NBR 15900-1 (ABNT, 2009) [17] e NBR NM 137 (ABNT, 1997) [32].

Por outro lado, a NBR 15900-1 (ABNT, 2009) [17] cita que se os teores de cloreto excederem os valores da Tabela III, a água de amassamento pode ser utilizada apenas se o teor de cloreto do concreto não ultrapassar os limites permitido na NBR 12655 (ABNT, 2015) [7]. Entretanto, se o equivalente alcalino de óxido de sódio resultar em teores maiores que os especificados na Tabela III, a água só é usada se for comprovado que foram tomadas ações preventivas quanto à reação álcali-agregado, conforme ABNT NBR 15577-1 (ABNT, 2008) [30].

B. Requisitos de Projeto

A NBR 6118 (ABNT, 2014) [6] informa medidas específicas para impossibilitar o ingresso de agentes agressivos ao interior do concreto. Ela explica que a as estruturas em concreto devem ser projetadas sob as condições ambientais do local para serem mais duráveis. A Tabela IV apresenta os requisitos objeto de especificações dos projetos em concreto armado.

Tabela IV – Classes de agressividade ambiental (CAA)

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 [a, b]	Pequeno
III	Forte	Marinha [a]	Grande
		Industrial [a, b]	
IV	Muito forte	Industrial [a, c]	Elevado
		Respingos de maré	

a) Pode-se admitir um microclima com uma classe de agressividade mais branda (uma classe acima) para ambientes internos secos (salas, dormitórios, banheiros, cozinhas e áreas de serviço de apartamentos residenciais e conjuntos comerciais ou ambientes com concreto revestido com argamassa e pintura).
b) Pode-se admitir uma classe de agressividade mais branda (uma classe acima) em obras em regiões de clima seco, com umidade média relativa do ar menor ou igual a 65 %, partes da estrutura protegidas de chuva em ambientes predominantemente secos ou regiões onde raramente chove.
c) Ambientes quimicamente agressivos, tanques industriais, galvanoplastia, branqueamento em indústrias de celulose e papel, armazéns de fertilizantes, indústrias químicas.

Fonte: Adaptado da NBR 6118 (ABNT, 2014) [6]

As NBR 6118 (ABNT, 2014) [6] e NBR 12655 (ABNT, 2015) [7] classificam os parâmetros do concreto, como relação água-cimento, classe do concreto e consumo de cimento Portland por metro cúbico de concreto conforme a classe de agressividade. Todos esses fatores estão expostos na Tabela V.

Tabela V- Classe de agressividade *versus* requisitos do concreto

NORMA	CONCRETO	TIPO	CLASSE DE AGRESSIVIDADE			
			I	II	III	IV
NBR 6118 NBR 12655	Relação água/cimento (em massa)	CA	≤ 0,65	≤ 0,60	≤ 0,55	≤ 0,45
		CP	≤ 0,60	≤ 0,55	≤ 0,50	≤ 0,45
	Classe de concreto (ABNT NBR 8953)	CA	≥ C20	≥ C25	≥ C30	≥ C40
		CP	≥ C25	≥ C30	≥ C35	≥ C40
NBR 12655	Consumo de cimento Portland (kg/m³)	CA E CP	≥ 260	≥ 280	≥ 320	≥ 360

CA: Componentes e elementos estruturais do concreto armado.
CP: Componentes e elementos estruturais do concreto protendido.

Fonte: Adaptado da NBR 6118 (ABNT, 2014) [6] e NBR 12655 (ABNT, 2015) [7]

Ademais, a NBR 12655 (ABNT, 2015) [7] determina outros requisitos para a relação água/cimento e a resistência característica que o concreto deve dispor para condições especiais de exposição. A Tabela VI expõe essas condições.

Tabela VI - Requisitos para o concreto, em condições especiais de exposição

ANO	2006		2015	
Condições de exposição	Máxima relação água/cimento, em massa, para concreto com agregado normal	Mínimo valor de f_{ck} (para concreto com agregado normal ou leve)	Máxima relação água/cimento, em massa, para concreto com agregado normal	Mínimo valor de f_{ck} (para concreto com agregado normal ou leve)
Condições em que é necessário um concreto de baixa permeabilidade à água, por exemplo, em caixas d'água	0,5	35	0,5	35
Exposição a processos de congelamento e descongelamento em condições de umidade ou a agentes químicos de degelo	0,45	40	0,45	40
Exposição a cloretos provenientes de agentes químicos de degelo, sais, água salgada, água do mar, ou respingos ou borrifação desses agentes	0,4	45	0,45	40

Fonte: Elaborado com base na NBR 12655 (ABNT, 2015) [7]

A estrutura de concreto também deve se adequar quando exposta a solos ou soluções contendo sulfato. Com base nisso, a NBR 12655 (ABNT, 2015) [7] expõe requisitos de relação água/cimento e resistência característica a compressão do concreto para a estrutura de concreto resistir aos íons de sulfato, representados na Tabela VII.

Tabela VII – 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 água/ cimento, em massa, para concreto com agregado normal[a]	Mínimo f_{ck} (para concreto com agregado normal ou leve) MPa
Fraca	0,00 a 0,10	0 a 150	Conforme Tabela 5	Conforme Tabela 5
Moderada[b]	0,10 a 0,20	150 a 1500	0,5	35
Severa[c]	Acima de 0,20	Acima de 1500	0,45	40

a) Baixa relação água/cimento 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.
b) A água do mar é considerada para efeito do ataque de sulfatos como condição de agressividade moderada, embora o seu conteúdo de SO_4 seja acima de 1500 ppm, devido ao fato de que a etringita é solubilizada na presença de cloretos.
c) Para condições severas de agressividade, devem ser obrigatoriamente usados cimentos resistentes a sulfatos.

Fonte: Elaborado com base na NBR 12655 (ABNT, 2015) [7]

Para a estrutura resistir a ataque por cloreto, a NBR 12655 (ABNT, 2015) [7] apresenta valor máximo de concentração de íons presentes no concreto endurecido, considerando a contribuição de todos os insumos, não podendo exceder os limites estabelecidos na Tabela VIII. Ao efetuar ensaios para

determinação do teor de íons cloreto solúveis em água, deve ser adotado o procedimento da ASTM C 1218.

Tabela VIII - Teor máximo de íons de cloreto para proteção das armaduras do concreto

Tipo de estrutura NBR 12655:2006	Condições de serviço da estrutura NBR 12655:2015	Classe de agressividade NBR 12655:2015	Teor máximo de íons cloreto (Cl-) no concreto % sobre a massa do cimento
Concreto Protendido	Concreto Protendido	Todas	0,05
Concreto armado exposto a cloretos nas condições de serviço da estrutura	Concreto armado exposto a cloretos nas condições de serviço da estrutura	III e IV	0,15
Concreto armado em condições de exposição não severas (seco ou protegido da umidade nas condições de serviço da estrutura)	-	-	0,40
Outros tipos de construção com concreto armado	-	-	0,30
-	Concreto Armado em brandas condições de exposição (seco ou protegido da umidade nas condições de serviço da estrutura)	I	0,40
-	Concreto armado não exposto a cloretos nas condições de serviço da estrutura	II	0,30

Fonte: Elaborado da NBR 12655 (ABNT, 2006; 2015) [33] [7]

Ainda as NBR 12655 (ABNT, 2006; 2015) [33] [7] mencionam que se um concreto armado for exposto a cloretos originados de agentes químicos de degelo, sal, água salgada, água do mar ou respingos ou borrifação desses três agentes, a relação água/cimento e a resistência característica à compressão do concreto devem ser satisfeitas conforme a Tabela VI.

A NBR 12655 (ABNT, 2015) [7] passou a recomendar que a estrutura de concreto deve possuir algumas propriedades para resistir a soluções aquosas agressivas. As recomendações desta norma são resultantes de uma compilação de procedimentos e normas internacionais, em função dos níveis de agressividade ambiental, como medidas preventivas para evitar a deterioração precoce das estruturas, em conformidade com a Tabela IX.

Tabela IX - Características recomendadas para concreto exposto a soluções aquosas agressivas

Condições de exposição em função da agressividade	pH	CO_2 agressivo (mg/L)
Fraca	6 a 7	< 30
Moderada	5,5 a 6	30 a 45
Severa	< 5,5	> 45

Fonte: Elaborado da NBR 12655 (ABNT, 2015) [7]

Antes da NBR 12655 (ABNT, 2015) [7], utilizava-se a NBR 12654 (ABNT, 1992) [34]. Ela foi substituída, pois a NBR 12655 (ABNT, 2015) [7] passou a referenciar as mesmas condições exigíveis para o controle da qualidade dos materiais componentes do concreto, além de detalhar os valores para as características que o concreto deve dispor e os teores máximos de agentes agressivos que é permitido na composição do concreto, o que não era visto na NBR 12654 (ABNT, 1992) [34]. A antiga NBR 12654 (ABNT 1992) [34] apenas referenciava quais normas seguir para o controle dos materiais e quais os agentes deveriam ser verificados para a qualidade dos materiais.

V. Análise dos Requisitos

A. Agregados

Foram verificados na Tabela II, os limites máximos para a expansão álcali-agregado e teores de cloreto e sulfato nos agregados. Nela houve inserções e poucas modificações na NBR 7211, entre as versões de 2005 e 2009.

Verifica-se que na atualização da NBR 7211 (ABNT, 2005) [29] houve a inclusão, da expansão causada pela reação álcali-agregado, de dois métodos de ensaio e as máximas expansões permitidas pelos mesmos. Também, atribuiram-se teores máximos de cloreto e sulfato para os agregados que contribuíram com a durabilidade da estrutura de concreto e por consequência em uma sua maior segurança.

Já na atualização da NBR 7211 (ABNT, 2009) [16], a primeira modificação encontra-se na determinação da reatividade álcali-agregado. Ela está sendo estipulada na NBR 15577-1 (ABNT, 2008) [30] com limites menores que 0,19% aos 30 dias de idade. A segunda modificação foi a remoção do ensaio facultativo. Ela recomendava que agregados altamente reativos deveriam ser analisados pelo método estabelecido na ASTM C 1260 e que a reatividade do agregado poderia ser analisada pelo método da NBR 9773 (ABNT, 1987), que inclusive, em 2008, foi cancelada e substituída pela NBR 15577-4 (ABNT, 2008).

B. Cimento Portland

Os responsáveis pela modificação na estrutura interna do concreto, que reagem com os componentes do cimento, e por consequência levam a sua deterioração, são os íons de sulfato. Portanto, no Brasil há uma norma de cimento resistente a sulfatos, a NBR 5737 (ABNT, 1992) [31].

Como analisado, deve-se ter uma atenção nos componentes do cimento ao escolhê-lo, para que o mesmo resista a águas ou solos que possuam sulfatos. Conforme a NBR 5737 (ABNT, 1992) [30] os cimentos mais adequados para resistir a ataques por sulfato são o CPIII (Cimento Portland de Alto Forno), CP IV (Cimento Portland Pozôlanico), ou que contenham materiais carbonáticos e possuem teor de C_3A baixo.

Cimentos com escória ou pozolana possuem baixo teor em aluminato (C_3A) e baixa formação de $Ca(OH)_2$, os quais reagem com o sulfato e produzem a etringita expansiva [24]. Por isso, a NBR 5737 (ABNT, 1992) [30] indica cimentos com baixo teor de C_3A, pois eles proporcionam alta resistência

a ataques por sulfato, reduzindo assim a degradação do concreto por sulfatos.

C. Água de Amassamento

A água de amassamento não pode conter teores elevados de cloreto e sulfato, também, quando utilizado agregados que são reativos a álcali, o equivalente alcalino de óxido de sódio da água de amassamento não deve possuir altos valores, e se o mesmo for maior que um determinado limite, a água só poderá ser utilizada se for comprovado que foram tomadas ações preventivas quanto à reação álcali-agregado, segundo NBR 15577-1 (ABNT, 2008) [30].

Conforme visto na Tabela III a NBR 15900-1 (ABNT, 2009) [17] e a NBR NM 137 (ABNT, 1997) [32] os teores de cloreto na água de amassamento diferem para concreto armado de 700mg/L para 1000mg/L e no concreto simples de 2000mg/L para 4500mg/L. Além disso, o pH da água de amassamento só é referenciado na NBR NM 137 (ABNT, 1997) [32] e o equivalente alcalino de óxido de sódio na NBR 15900-1 (ABNT, 2009) [17]. Deve se ter um cuidado com estes teores na água de amassamento, pois esses componentes reagem com a estrutura interna do concreto, levando a sua deterioração.

D. Concreto

Nas NBR 6118 (ABNT, 2014) [6] e 12655 (ABNT, 2015) [7] sugerem os limites de relação água/cimento, classe do concreto e consumo de cimento Portland por m³ de concreto, conforme a Tabela V. Observa-se que a razão água/cimento decai conforme a classe de agressividade se agrava. Isto ocorre porque quanto menor a relação água/cimento menos poroso e permeável será o concreto, desta forma impedindo que agentes agressivos ingressem na estrutura.

Entretanto, a classe de concreto e o consumo de cimento aumentam logo que a classe de agressividade se agrava porque para locais mais agressivos o concreto deve possuir mais resistência à compressão, e o alto consumo de aglomerante hidráulico torna o concreto menos poroso e permeável, impedindo a entrada dos agentes agressivos na estrutura de concreto. É questionável o consumo de cimento não estar presente na NBR 6118 (ABNT, 2014) [6], somente na NBR 12655 (ABNT, 2015) [7], visto que é um requisito importante que deveria estar incluído em projetos assegurando a resistência química e física na garantia da maior vida útil da estrutura.

Logo a Tabela VI, que informa os requisitos para condições especiais de exposição, na atualização da NBR 12655 (ABNT, 2015) [7] sofreu mudanças nos valores de relação água/cimento e de resistência característica à compressão para estruturas de concreto expostos a cloretos provenientes de agentes químicos de degelo, sais, água salgada, água do mar, ou respingos ou borrifação desses agentes. Foram alterados a máxima relação água/cimento em massa para 0,45 e o valor mínimo de resistência à compressão característica de 40 MPa do concreto. Dessa maneira, conclui-se que as duas modificações concordam com os valores da Tabela IV, para classe de agressividade tipo IV, que é classificada como ambiente com respingos de maré, que contêm íons cloreto em grande quantidade. Vale ressaltar, que se deve ter cautela para a resistência característica à compressão específica para caixas d'água executada em concreto armado, pois é indicado que seja maior ou igual a 35 MPa, conforme a Tabela VI, pois ela independe da classe de concreto estabelecido para obra.

Já a Tabela VII, que se refere aos requisitos para concreto exposto a soluções contendo sulfatos, não houve modificações na sua atualização. Entretanto, as condições de exposição diferem das classes de agressividade, apresentadas na Tabela IV. Então, para compreender suas semelhanças, verificaram-se os seguintes detalhes:

a) Na Tabela VII, a condição de exposição moderada, tange aos ambientes com água do mar, o qual se relaciona com os ambientes marinhos da Tabela IV. Os ambientes marinhos são classificados na tabela IV como agressividade forte a muito forte às estruturas de concreto.

b) Verifica-se na Tabela VII que para condições severas de agressividade, os valores de máxima relação água/cimento e resistência característica à compressão da Tabela V, são iguais a classe de agressividade tipo IV, muito forte, da Tabela IV.

Então, fica evidente que as condições de exposição em função da agressividade, da Tabela VII, têm similaridades com as seguintes classes de agressividade da Tabela IV. A Tabela X apresenta essa relação.

Tabela X – Similaridades entre as condições de exposição em função da agressividade e classes de agressividade ambiental/agressividade

NBR 6118 NBR 12655	NBR 12655
Classe de agressividade ambiental/Agressividade	Condições de exposição em função da agressividade
I / Fraca	Fraca
III e IV / Forte a Muito forte	Moderada
IV / Muito forte	Severa

Fonte: Elaborado com base na NBR 6118 (ABNT, 2014) [6] e NBR 12655 (ABNT, 2015) [7]

A Tabela VIII equivale aos teores máximos de íons de cloreto para proteção das armaduras do concreto, que variam de 0,05% a 0,40% sobre a massa de cimento. Na atualização de 2015, percebe-se que as condições de serviço da estrutura passaram a concordar com as classes de agressividade, da Tabela IV, bem como, a designação do tipo de estrutura alterou para condições de serviço da estrutura.

Algumas dessas condições de serviço da estrutura foram alteradas na NBR 12655 (ABNT, 2015) [7]. Verifica-se que foram substituídos por outra nomenclatura, que são as seguintes:

a) Concreto armado em condições de exposição não severas (seco ou protegido da umidade nas condições de serviço da estrutura) na NBR 12655 (ABNT, 2006) [33] modificou para concreto armado em brandas condições de exposição (seco ou protegido da umidade nas

condições de serviço da estrutura) na NBR 12655 (ABNT, 2015) [7];

b) Os outros tipos de construção com concreto armado na NBR 12655 (ABNT, 2006) [33], a qual alterou para concreto armado não exposto a cloretos nas condições de serviço da estrutura na NBR 12655 (ABNT, 2015) [7].

Então, verifica-se que alguns tipos de estruturas foram substituídos por outras condições de serviço da estrutura. Essas mudanças de nomenclaturas e suas respectivas classes de agressividade e teores máximos de íons cloreto estão representadas na Tabela XI.

Tabela XI – Teor máximo de íons de cloreto para proteção das armaduras do concreto

Tipo de estrutura (NBR 12655:2006)	Condições de serviço da estrutura (NBR 12655:2015)	Classe de agressividade NBR 12655:2015	Teor máximo de íons cloreto (Cl-) no concreto (% da massa do cimento)
Concreto armado em condições de exposição não severas (seco ou protegido da umidade nas condições de serviço da estrutura)	Concreto armado em brandas condições de exposição (seco ou protegido da umidade nas condições de serviço da estrutura)	I	0,40
Outros tipos de construção com concreto armado	Concreto armado não exposto a cloretos nas condições de serviço da estrutura	II	0,30

Fonte: Elaborado com base na NBR 12655 (ABNT, 2006; 2015) [33] [7]

Ainda, a NBR 12655 (ABNT, 2015) [7] informa o ensaio para determinação do teor de íons cloreto solúveis na água, o qual diverge dos ensaios sugeridos na NM 137 (ABNT, 1997) [32] e na NBR 15900-1 (ABNT, 2009) [17]. A norma indica que deve seguir o procedimento da ASTM C 1218.

Foi verificado que na reformulação da NBR 12655 (ABNT, 2015) [7] foi adicionado o anexo referente a estruturas de concreto em solo agressivo, que corresponde a Tabela IX. O pH e a concentração de CO_2 foram determinados pelas condições de exposição em função da agressividade. Identifica-se que conforme a condição de exposição vai piorando, o pH diminui e o CO_2 agressivo aumenta.

VI. Considerações Finais

O trabalho teve como objetivo verificar os requisitos e evolução dos agentes agressivos, tanto do ambiente, quanto os presentes nos insumos de produção do concreto. Assim, é possível inferir que a durabilidade do concreto pode estar associada ao ambiente onde será empregado, ou às possíveis contaminações que o material pode apresentar.

A partir do estudo realizado, foi verificado que muitas vezes diferentes normas divergem ou omitem a especificação de um dos parâmetros de análise. No caso da água de amassamento, as metodologias de ensaios, que determinam a quantidade de agentes agressivos, e os teores máximos de agentes deletérios, divergem em comparação com a NBR 137 (ABNT, 1997) [32], NBR 15900-1 (ABNT, 2009) [17] e NBR 12655 (ABNT, 2015) [7]. Além disso, alguns parâmetros apenas são informados em uma das normas, por exemplo, a NBR 15900-1 (ABNT, 2009) [17] a qual apresenta teores máximos de equivalente alcalino. Assim, seria compreensível e melhor controlado pelo meio técnico, se houvesse uma convergência das metodologias a serem utilizadas, tanto para o ensaio, quanto para os limites de especificação.

Também é possível verificar que as atualizações das normas são periódicas, mostrando assim a preocupação e necessidade de revisão dos limites ora impostos, tanto para o concreto em função do ambiente, quanto dos insumos utilizados na produção. Ao estudar os parâmetros, verificamos que muitos deles são dependentes do ambiente no qual a estrutura de concreto está inserida. Com isso, este trabalho também comparou as semelhanças das classes de agressividade ambiental com as condições de exposição em função da agressividade, para que os engenheiros e arquitetos determinem, de forma correta quais valores adotar para cada característica que deve compor o concreto de acordo com o ambiente que esta sujeita à estrutura de concreto.

Apesar disso, o trabalho evidenciou que os materiais, contituintes do concreto e a própria estrutura, também podem interferir na durabilidade do concreto. Durante o trabalho foi perceptível que o controle sobre os requisitos de projeto, conforme a NBR 6118 (ABNT, 2014) [6], é superior se comparado com dos materiais, pois a análise dos constituintes do concreto é mais complexa, dependendo de ensaios, e por isso, não é visto tanta ênfase desses agentes agressivos na preparação do concreto.

Vale ressaltar que os aditivos não foram analisados neste trabalho, pois os que contêm cloretos na sua composição não são permitidos em estruturas de concreto armado e protendido, de acordo com a NBR 12655 (ABNT, 2015) [7]. Ademais, fica subtendida a responsabilidade pelos ensaios para a verificação dos teores das substâncias agressivas nos materiais (se é do fornecedor ou do consumidor final). Com isso, o trabalho destacou que é imprescindível também essa verificação, e que não meramente a determinação da classe do ambiente protegerá as estruturas de concreto das substâncias nocivas.

De maneira geral, as referências normativas vêm evoluindo, orientando para as metodologias de ensaios e assumindo novos limites para agentes agressivos. Dessa forma há uma convergência para elevar a durabilidade das estruturas, já que a NBR 15575-1 (ABNT, 2013) [5] estabelece vida útil de projeto mínima de 50 anos.

Por fim, apesar de proceder com os controles necessários dos teores de agentes agressivos nas estruturas de concreto e definir os parâmetros corretos a partir da classe de agressividade, manifestações patológicas podem se manifestar devido a outros motivos, como a própria execução, o

armazenamento dos materiais não ser adequado ou não haver fiscalização para preservar a durabilidade da construção.

Assim, como sugestão para trabalhos futuros aplicar os ensaios nos materiais do canteiro de obras, verificar se confere com as normas descritas neste trabalho e analisar a influência da correta estocagem dos mesmos, os quais podem afetar a durabilidade e consequentemente a vida útil da edificação.

VII. Referências Bibliográficas

[1] PEDROSO, F. L.: Concreto: material construtivo mais consumido no mundo. Revista Concreto & Construções. Ano XXXVII, nº 53. São Paulo, 2009.

[2] MEDEIROS, M. H. F.; GOBBI, A.; GROENWOLD, J. A.; HELENE, P. Previsão da vida útil de concreto armado de alta resistência com adição de metacaulim e sílica ativa em ambientes marinhos. Revista Escola de Minas, vol. 66, num. 1, enero-marzo, pp. 53-65. Escola de Minas. Ouro Preto, 2013.

[3] RECENA, F. A. P.: Retração do concreto. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2014. 151p.

[4] RECENA, F. A. P.: Dosagem e controle da qualidade de concretos convencionais de cimento Portland. 3º ed. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2015. 120 p.

[5] Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 15575-1: Edificações habitacionais – Desempenho – Parte 1: Requisitos gerais. Rio de Janeiro, 2013.

[6] Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto — Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

[7] Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 12655: Concreto de cimento Portland — Preparo, controle, recebimento e aceitação – Procedimento. Rio de Janeiro, 2015.

[8] MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M.: Concreto: estrutura, propriedades e materiais. São Paulo: Pini, 1994.

[9] PETRUCCI, E.G.R.: Concreto de cimento Portland. 14º. ed. São Paulo: Globo, 2005. 307 p.

[10] Associação Brasileira de Cimento Portland: Guia básico de utilização do cimento Portland. 7ªed. São Paulo, 2002. 28p.

[11] ISAIA, G. C. (Ed.).: Concreto: ensino, pesquisa e realizações. São Paulo: IBRACON, 2005a. vol. 1; 1.600p.

[12] NEVILLE, A. M.: Propriedades do concreto. 5ª ed. Porto Alegre: Bookman, 2016.

[13] PRUDÊNCIO JÚNIOR, L.R. ECV 5302- Materiais de construção civil I. Grupo de tecnologia em materiais e componentes à base de cimento Portland. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011.

[14] NEVILLE, A. M.: Propriedades do concreto. 2ª ed. São Paulo: Pini, 1997.

[15] RIBEIRO JÚNIOR, E.: Propriedades dos materiais constituintes do concreto. Revista especialize on-line. MBA Gerenciamento de obra, tecnologia & qualidade da construção, Instituto de Pós-Graduação – IPOG. Goiânia, 2015. 15p.

[16] Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7211: Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro, 2009.

[17] Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 15900-1: Água para amassamento do concreto – Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro, 2009.

[18] HELENE, P. R. L.: Corrosão em armaduras para concreto armado. São Paulo: PINI, 1986.

[19] MEIRA, G. R.: Corrosão de armaduras em estruturas de concreto: fundamentos, diagnóstico e prevenção. João Pessoa: IFPB, 2017. 130p.

[20] GOMES, N. A.; SALES, A.: Avaliação da carbonatação do concreto em obras interrompidas na cidade de ribeirão preto. I Conferência latino-americana de construção sustentável x encontro nacional de tecnologia do ambiente construído. São Paulo, 2004. 12p.

[21] GIRARDI, R.: Aglomerantes para a construção civil – cal. Materiais de Construção Civil I. Escola Politécnica PUCRS. Porto Alegre/RS, 2018.

[22] ISAIA, G. C. (Ed.): Concreto: ensino, pesquisa e realizações. São Paulo: IBRACON, 2005b. vol. 2; 1.600p.

[23] DÓREA, C. L. SANTOS, G. SALES, A. T. C. SILVEIRA, P. M. D.: Avaliação patológica da estrutura de concreto armado e dos componentes de uma edificação construída em 1914. SCIENTIA PLENA VOL. 6, NUM. 12. São Cristóvão-SE, 2010.

[24] CENTURIONE, S. L.; KIHARA, Y.; BATTAGIN, A. F.: Durabilidade de concreto submetido a ataques de íons sulfato. Anais do 47º Congresso Brasileiro de Cerâmica. João Pessoa, 2003.

[25] VIEIRA, G. L.: Estudo do processo de corrosão sob a ação de íons cloreto em concretos obtidos a partir de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição. Porto Alegre: PPGEC/UFRGS, 2003. 150p.

[26] PRODANOV, C. C.; FREITAS, E. C.: Metodologia do trabalho científico [recurso eletrônico]: métodos e técnicas da pesquisa e do trabalho acadêmico. 2ªed. Novo Hamburgo: Feevale, 2013.

[27] SILVA, E. L.; MENEZES, E. M.: Metodologia da pesquisa e elaboração de dissertação. 4ª ed. Florianópolis: UFSC, 2005. 138p.

[28] Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7211: Agregados para concreto. Rio de Janeiro, 1983.

[29] Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7211: Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro, 2005.

[30] Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR15577-1: Agregados – Reatividade álcali-agregado. Parte 1: Guia para avaliação da reatividade potencial e medidas preventivas para uso de agregados em concreto. Rio de Janeiro, 2008.

[31] Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 5737: Cimentos Portland resistentes a sulfatos. Rio de Janeiro, 1992.

[32] Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR NM 137: Argamassa e concreto – Água para amassamento e cura de argamassa e concreto de cimento Portland. Rio de Janeiro, 1997.

[33] Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 12655: Concreto de cimento Portland — Preparo, controle, recebimento e aceitação – Procedimento. Rio de Janeiro, 2006.

[34] Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 12654: Controle tecnológico de materiais componentes do concreto. Rio de Janeiro, 1992.