

DURABILIDADE DO CONCRETO

PRINCÍPIOS FUNDAMENTAIS PARA
PROJETAR E EXECUTAR
ESTRUTURAS DURÁVEIS

Petronilho e Associados
Tecnologia das construções Ltda.



Edson Petronilho
Caio Sígolo

Outubro de 2011

Rev 01

SUMÁRIO

Sobre o Concreto.....	04
Por que o concreto deixou de ser durável.....	05
Durabilidade do concreto.....	06
Como produzir estruturas duráveis no Brasil?.....	11
Tecnologia do Concreto Durável.....	13
Definição do tempo de vida útil da estrutura.....	17
Definição da classe de exposição:.....	17
Definição da resistividade elétrica.....	22
Definição dos processos e gastos com manutenção.....	26
Tempo de penetração.....	26
Tempo de propagação.....	29
Rede de poros.....	30
Mecanismos de transporte dos fluidos.....	33
Permeação ou permeabilidade.....	34
Sucção capilar ou absorção capilar.....	38
Difusão.....	41
Carbonatação.....	42
Cloretos.....	43
Referências bibliográficas	47

Somos levados a pensar na resistência mecânica do concreto como indicador de qualidade. Afinal, é praticamente impossível imaginar que um material pétreo visivelmente resistente possa ter vida curta. Compará-lo com a pedra natural é um exercício corriqueiro para qualquer pessoa, leigo ou especialista. Desde 1824, quando foi inventado e colocado no mercado, foi assim, o concreto, produzido com cimento Portland era considerado eterno.

No final da década de 1950, o arquiteto brasileiro Oscar Niemeyer ousou ao dar formas curvas às obras da Pampulha, em Belo Horizonte, e deixar de aplicar revestimento para acabamento da superfície, boa prática exigida na época. O resultado plástico encantou o mundo pela objetividade prática do material nas mãos do jovem arquiteto e mudou a forma de se construir em todo o mundo. Fazer um molde em madeira, inserir barras de aço como reforço, moldar em concreto, remover o molde, fazer o fechamento e concluir o serviço – esta era a nova ordem da construção civil, sinônimo de avanço, progresso e novos prazos para o mundo da construção.

Em 1960 Brasília é inaugurada em tempo recorde, graças à nova maneira de se utilizar o concreto. As proporções do projeto incentivam arquitetos em todo o mundo a projetar com o recurso do concreto exposto, aparente. No entanto, o projeto mostrou-se frágil aos efeitos do tempo, revelando algo novo, o concreto se deteriorou – durou apenas 20 anos – iniciando uma onerosa vida residual. No começo da década de 1980, iniciam-se os trabalhos de recuperação do concreto de Brasília e surge a indústria de recuperação estrutural no país.

Sobre o concreto

As características fundamentais de um material estrutural de construção são sua capacidade de resistência às forças a que estará submetido e sua durabilidade.

Durante décadas, o concreto teve sua resistência à compressão amplamente estudada. No início, obtinha-se baixa resistência, em contrapartida, as cargas também eram baixas e os elementos estruturais de grandes dimensões. Grandes quantidades de cimento eram consumidas, as espessuras de recobrimento eram maiores e as armaduras, de aço macio. Todos esses fatores e as condições de cálculo e de fabricação do cimento à época concorriam para que o concreto não apresentasse fissuras ou outras patologias, levando a concluir que sua durabilidade era ilimitada, eterna.

O aprofundamento do conhecimento sobre as propriedades e microestruturas do concreto somado ao aperfeiçoamento dos métodos de cálculo e do avanço tecnológico na produção de aço propiciaram a redução das dimensões das peças e do consumo de cimento e a obtenção de elevadas resistências à compressão. As estruturas passaram a suportar maiores cargas e, por conta disso, incrementou-se a taxa de armadura e adotou-se o uso de concretos com maior *slump*. O aço ficou sujeito a tensões mais elevadas, o consumo de água aumentou e os níveis de poluição e agressividade ambiental dispararam (Coutinho, 2005).



Figura 1 – Evolução das resistências médias à compressão do concreto aos 28 dias de idade. (Adaptado de Pomeroy, 1987 e de Neville, 1995)

O elemento estrutural já não conta com a proteção natural de outrora, tornou-se mais sensível aos fenômenos da corrosão. Disso, constatou-se que o concreto também envelhece e que, além dos cuidados considerados em sua dosagem, produção e aplicação, é necessário levar em conta esse envelhecimento, a fim de aumentar sua expectativa de vida útil.

A vida útil das estruturas, notadamente nos projetos industriais e de infraestrutura, deve ser no mínimo superior aos prazos de financiamento. Há bom tempo não o é.

A garantia de durabilidade das estruturas de concreto marcará o desenvolvimento da construção civil neste século, como evidenciado pelo processo de revisão das normas em todos os países desenvolvidos e em desenvolvimento. O concreto do próximo século guardará pouca semelhança ao de hoje.



Por que o concreto deixou de ser durável:

Ao longo do tempo, o cimento foi sendo alterado, acompanhando as necessidades de incremento de produtividade impostas pela ordem econômica. Os países desenvolvidos introduziram estas alterações por volta de 1930 e no Brasil elas foram aplicadas somente a partir da segunda onda, durante os primeiros anos da década de 1960.

A ordem era aumentar a resistência inicial dos concretos e beneficiar-se com os menores prazos de execução das obras. Alterações químicas foram realizadas no cimento e deu-se início a uma nova era no mercado da construção civil com a agilização do processo de desforma, ampliação dos vãos entre os pilares e conclusão de obras em prazos nunca antes praticados. Todos os setores da cadeia produtiva avançaram neste período. Surgiram os caminhões-betoneiras, as

bombas, os superplastificantes, os sistemas de cimbramentos e formas e diversas outras facilidades.

O cimento Portland é constituído por quatro componentes básicos: C3S (silicato tricálcico), C2S (silicato dicálcico), C4AF (ferro-aluminato de cálcio) e C3A (aluminato tricálcico). Para desenvolver altas resistências nas primeiras fases do concreto e impor prazos mais rápidos de construção, elevou-se o teor de C3S e o módulo de finura do cimento Portland comum.

Embora uma resistência maior do concreto aos 28 dias, para um dado fator água/cimento, possa ser vantajosa economicamente, existem desvantagens como consequência.

O concreto moderno, tendo a mesma resistência aos 28 dias do que um concreto antigo pode ser feito com um fator água/cimento maior e um teor de cimento menor. Ou seja, mais água e menos cimento.

Essas duas mudanças simultâneas resultaram num concreto moderno mais poroso, com maior permeabilidade, e que, como consequência, é mais propício à penetração de agentes agressivos e mais sensível à carbonatação. E como não há um crescimento significativo da resistência do concreto após 28 dias, fica eliminada a melhoria da qualidade da estrutura no longo prazo. Antigamente esta era uma garantia adicional ao usuário, mesmo não sendo considerada em projeto.

O concreto moderno é um concreto menos durável.

Adam Neville – Cement and Concrete: Their Interrelation in Practice - Advances in Cement and Concrete - Editors: Michael W. Grutzeck and Shondeep L. Sarkar. – American Society of Civil Engineers – 1994.

Durabilidade do concreto

Uma estrutura é considerada durável se ao longo de sua vida conserva os requisitos de projeto em termos de segurança, funcionalidade e estética, sem gerar custos de manutenção não previstos (Andrade, 1996).

O *Eurocode 2* assim define a durabilidade: “*período durante o qual se pretende que uma estrutura ou parte da mesma seja utilizada para as funções a que se destina, com a manutenção prevista mas sem necessidade de grandes reparações*”.

O conceito de durabilidade não deve ser confundido com o período de vida útil do concreto, que é o período em que a estrutura mantém as características iniciais de projeto até o grau de deterioração atingir certo limite tolerável. A partir deste ponto, o concreto entra em sua vida residual, tornando necessária a intervenção técnica e a realização dos procedimentos de reparo, a fim de tornar as condições de segurança, funcionalidade e estética semelhantes às do projeto ou mesmo superiores.

A grande maioria dos casos de degradação de estruturas é atribuída à corrosão das armaduras por perda da passivação resultante da carbonatação ou penetração de cloretos no concreto de recobrimento.

Ao estudar as causas da corrosão de armaduras, considera-se que a vida útil é composta por dois estágios (Andrade e Alonso – 1996): o *período de iniciação* e o *período de propagação* da corrosão. O primeiro período corresponde ao intervalo de tempo entre a execução da estrutura e a destruição da película passivante da armadura, que geralmente ocorre por carbonatação do concreto de recobrimento e/ou por penetração de cloretos. Já o segundo período, o de propagação, compreende o tempo de evolução da patologia até ser atingido um limite de deterioração inaceitável dos pontos de vista de segurança, funcionalidade e estética. Neste momento, a menos que se proceda à sua recuperação, termina a vida útil da estrutura.

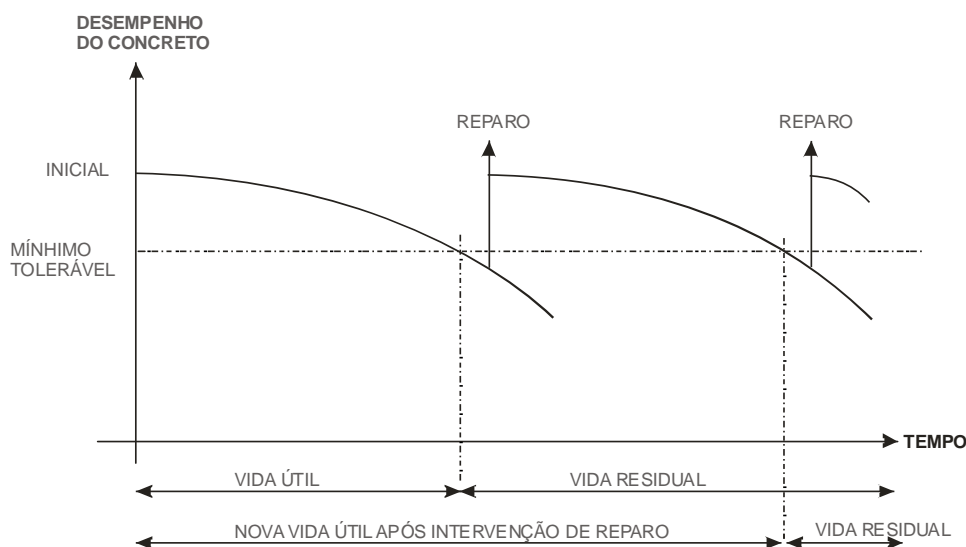


Figura 2 – Vida útil e vida residual (CEB, 1992; ANDRADE e ALONSO, 1996)

Portanto, a qualidade do concreto de recobrimento e sua resistência aos agentes agressivos, como os cloretos e dióxido de carbono, desempenham papel fundamental no prolongamento do período de iniciação das patologias de corrosão das armaduras, qualidade que pode ser traduzida em baixa permeabilidade e suficiente espessura.

Mas como avaliar o tempo efetivo de vida útil de uma estrutura em concreto?

O meio técnico ainda não se sente completamente seguro para responder a esta questão. Há que se determinar o período de tempo até a destruição da película passivante da armadura e somá-lo ao período de tempo em que os efeitos da corrosão se tornarão inaceitáveis. Diversos pesquisadores propõem técnicas e métodos para o entendimento do mecanismo de propagação da corrosão e a determinação do seu tempo de ocorrência. Petronilho & Associados adota modelos matemáticos propostos internacionalmente por diversos autores e pesquisadores para estimar o tempo de vida útil da estrutura. O tema é desenvolvido em detalhes no capítulo *Tecnologia do Concreto Durável*.

O *Eurocode* estabelece as seguintes diretrizes (válidas no hemisfério norte) para categorizar as estruturas de concreto quanto à sua durabilidade:

Figura 3 - Eurocode: Categorias de vida útil das estruturas de concreto

Vida útil das obras		Obras
Categoria	Anos	
1	10	Estruturas temporárias.
2	10 a 25	Partes estruturais substituíveis, por exemplo, apoios.
3	15 a 30	Estruturas para agricultura e semelhantes.
4	50	Edifícios e outras estruturas comuns.
5	100	Edifícios monumentais, pontes e outras estruturas de engenharia civil.

Conforme a tabela acima, de forma geral as obras relevantes de engenharia pertencem às categorias 4 e 5, e têm vida útil de 50 anos para as obras de edificações e de 100 anos para as obras de infraestrutura. Os números, no entanto, são coerentes com o meio ambiente e clima europeus, muito distantes da realidade brasileira.

A norma brasileira (NBR 6118:2003) – com reconhecimento internacional – não categoriza as estruturas de concreto quanto à durabilidade nem faz menção quanto ao prazo mínimo de vida útil. No atual estágio de desenvolvimento, não pode fazê-lo. As condições ambientais e o clima tropical brasileiro representam dificuldades para se garantir desempenho de durabilidade igual ao do concreto europeu. As condições de umidade e a elevada temperatura potencializam as possibilidades de deterioração e, por isso, as exigências aqui devem ser maiores que as europeias. A solução deve vir através da implementação de medidas de melhorias no cimento – resolvendo o problema de fissuração do concreto –, seja pela correção da finura e teores de C3A reclamada pelo meio acadêmico ou por outra proposta tecnológica apresentada pela indústria cimenteira. Trata-se de um problema global que se manifesta com maior intensidade em climas tropicais.

O cimento é uma *commodity* de primeira relevância no cenário econômico global e por ser o produto mais consumido pelo ser humano depois da água, as

manobras de qualquer natureza devem ser planejadas com cautela redobrada.. Assim, por serem coerentes, as recomendações de 50 e 100 anos de durabilidade estabelecidas pelo Eurocode encontram eco e aceitação no meio técnico e acadêmico do país, embora ainda não sejam consideradas pela ABNT.

Qual o tempo de vida útil das estruturas no Brasil?

Embora deva ser ampliada com a evolução da cultura da manutenção preventiva, a vida útil das estruturas de concreto no Brasil é curta, permanecendo distante dos 50 anos propostos pelo *Eurocode 2* e irreal quando considerada a proposta de 100 anos para as obras de infraestrutura. Via de regra, aos 15 ou 20 anos surge a necessidade da primeira intervenção.

Os efeitos destrutivos da corrosão e da deterioração são vistos em qualquer parte sem grandes esforços. Manifestam-se nas estruturas de concreto aparente, como tanques das estações de tratamento de água, esgotos e efluentes, caixas d'água elevadas, infraestrutura industrial, silos de concreto, pontes, viadutos e obras de arte em geral.

O item 13.4 – *Controle da fissuração e proteção das armaduras*, da NBR 6108:2003, inicia-se com a seguinte afirmação: “A fissuração em elementos estruturais de concreto armado é inevitável”, reconhecendo os limites da tecnologia do cimento e suas consequências na produção do concreto.

O consumidor é alertado e estabelece-se certa harmonia legal nas relações entre os atores participantes do projeto, mas o ônus da falta de durabilidade da estrutura fica por conta do investidor. No curto prazo, a conta pode fechar com lucro aparente, mas logo em seguida o desempenho fica a desejar e finalmente os custos de intervenção impõem-se como realidade. A indústria de recuperação estrutural no Brasil surgiu em decorrência do final prematuro da vida útil das estruturas dos edifícios de Brasília.

A maior preocupação são as consequências macrofinanceiras dessa realidade. Tomando como exemplo a situação de países do hemisfério norte, como EUA e Inglaterra, usuários de tecnologias atualizadas e inseridos em ambientes menos agressivos que o tropical, os números apresentados por P. K. MEHTA e P. MONTEIRO, da Universidade de Berkeley, não deixam dúvidas quanto o tamanho do problema:

- Nos EUA, o setor de recuperação estrutural cresce duas vezes mais que o da construção civil;
- Em 2010, a *Federal Highway Administration* gastou 230 bilhões de dólares só na recuperação e reforço de pontes;
- Nos EUA existem 500.000 pontes, das quais 250.000 apresentam problemas estruturais. Este número aumenta à ordem de 35.000 tabuleiros por ano;
- Atualmente, 22.000 pontes de concreto, cujo principal problema é a corrosão de armaduras, estão sendo recuperadas;
- Em breve, nos EUA será gasto mais dinheiro na recuperação que na construção de novas pontes. Isto já ocorre na Inglaterra desde 1995, e no Canadá desde 1999.

Como produzir estruturas duráveis no Brasil?

No Brasil, o concreto durável é produzido com o uso de aditivos que incrementam as características relevantes das propriedades que influenciam a durabilidade e corrigem as características do cimento Portland, adaptando-o à realidade do meio ambiente e clima locais.

O concreto durável, embora apresente custo de aquisição superior em 20% a 30% ao do concreto de linha, resulta em obras mais econômicas por interferência direta em três importantes tópicos do serviço de execução da estrutura: mecanização da obra, redução do prazo e eliminação de diversas etapas executivas.

O ajuste das características relevantes das propriedades que influenciam a durabilidade do concreto permite o atendimento de diversos reclames do meio técnico e do meio acadêmico quanto à permeabilidade, deformação, fissuração e resistência química.

O enquadramento dessas propriedades dentro de parâmetros de trabalho e segurança condizentes com a prática industrial revisa e renova os procedimentos executivos dos serviços atuais, alinhando-os com boas práticas inovadoras, que atendem às imposições de mão de obra, produtividade e desempenho.

Práticas executivas baseadas no valor específico do serviço, já consolidadas no mercado, devem ser revistas pelas empresas que passam a utilizar o concreto durável, entre elas, as que dizem respeito ao *slump* de trabalho, que uma vez estabelecido acima de 15cm possibilita melhores resultados de acabamento, adensamento, resistência, permeabilidade, durabilidade e produtividade. Revisões como esta devem ocorrer, permitindo adaptar os procedimentos executivos da empresa para a nova realidade de custo e atuação.

Na prática, o uso do concreto durável tem se tornado popular em países em que a mão de obra se torna cara ou insuficiente e a economia passa a exigir índices mais eficientes de produtividade. Cenário que exige avanços e melhorias tecnológicas dos materiais para compensar a deficiência estabelecida.

A adoção do concreto durável está relacionada, portanto, à superior qualidade do material e aos elevados índices de produtividade, que, em última instância, justificam e corroboram seu uso. Geralmente a reengenharia adotada viabiliza economicamente o projeto.

Tecnologia do Concreto Durável

A deterioração das estruturas de concreto é afetada pelo transporte de gases, água e agentes agressivos dissolvidos na água. A maior ou menor facilidade deste transporte depende, basicamente, da rede porosa e das condições ambientais à superfície do concreto de recobrimento.

De pronto, evidencia-se a importância da espessura de recobrimento do concreto como elemento resistente ao ambiente. Não se garante durabilidade em estruturas cuja espessura de recobrimento seja inferior a 4cm. Os magros 2,5cm propostos pela ABNT não são suficientes para garantir durabilidade em estruturas armadas expostas, pois servem somente às estruturas de concreto revestido.

O transporte de água no seio do concreto é determinado pelo tamanho e tipo de poros, sua distribuição e pelas micro e microfissuras existentes. Por esta razão, torna-se imprescindível o controle da natureza e a distribuição dos poros e fissuras para obtenção da estrutura durável.

O estudo da durabilidade é baseado no conhecimento e entendimento dos mecanismos de transporte de gases e líquidos agressivos ao concreto através de poros e fissuras.

Essa compreensão permite associar o fator tempo aos modelos matemáticos que expressam quantitativamente esses mecanismos e, assim, avaliar a vida útil de uma estrutura de concreto armado em número de anos, em função do ambiente em que a obra está inserida.

A durabilidade da estrutura de concreto depende da deterioração física, química e biológica do concreto e da corrosão da armadura. Os ácidos, sulfatos e a reação

álcali-agregado atacam o concreto de recobrimento, já o dióxido de carbono e os íons cloreto atacam as armaduras por destruição de sua película passiva protetora, devido à diminuição da alcalinidade do concreto envolvente.

Uma vez mais, constata-se a importância do concreto de recobrimento como elemento resistente aos agentes agressivos – sobretudo aos cloretos e dióxido de carbono – como agente fundamental no prolongamento do período inicial da corrosão. Um dos aspectos primordiais em termos de durabilidade da estrutura de concreto armado é a qualidade deste concreto de recobrimento traduzida por baixa permeabilidade e suficiente espessura.

A corrosão nas armaduras de concreto é um processo eletroquímico, um anodo, um catodo e a água presente atuam como eletrólito, dando origem à uma pilha ou célula de corrosão. Pela diferença de potencial entre trechos da superfície do aço, esse processo gera fluxos de corrente e corrói as armaduras. Quanto menor a resistência elétrica do concreto, mais rapidamente a corrente flui e maiores serão as chances de corrosão, implicando em maior perda de seção do aço. Recomendações internacionais editadas em países do hemisfério norte estabelecem os seguintes limites para a resistividade (ρ):

Resistividade elétrica do concreto - k Ω .cm	Indicação de probabilidade de corrosão
$\rho \geq 20$ k Ω cm	desprezível
$10 \leq \rho \leq 20$ k Ω cm	baixa
$5 \leq \rho \leq 10$ k Ω cm	alta
$\rho \leq 5$ k Ω cm	Muito alta
TND = teste não destrutivo	
Obs.: Critério de avaliação em conformidade com o CEB 192 (1988)	

Figura 4 – Critérios de avaliação da resistividade (SMITH ET AL., 2004)

No Brasil, devido às características ambientais, a corrosão é possível quando este número fica abaixo de 40 $k\Omega cm$.

Os produtos da corrosão são uma gama variada de óxido e hidróxido de ferro, que permanece depositada no perímetro da armadura e passa a ocupar, no interior do concreto, volumes de três a 10 vezes maiores que o volume original do aço da armadura, causando tensões internas maiores que 15MPa.

Com o avanço do processo, os produtos expansivos vão se acumulando ao redor das armaduras, gerando esforços no concreto na direção radial das barras, que exercem tração nas peças de concreto e culminam em fissuração.

As fissuras estabelecem-se na direção paralela à barra corroída e são classificadas como fissuras ativas progressivas, porque têm aberturas que vão aumentando com o decorrer do processo corrosivo, acelerando o efeito da propagação.

Assim, o processo do estudo de dosagem do concreto, com o intuito de ampliar sua vida útil impedindo a corrosão da armadura, deve ser iniciado obedecendo a procedimentos de cuidados básicos, porém mandatórios, a partir do planejamento estratégico de suas características.

O quadro abaixo é proposto no sentido de se estabelecer um instrumento formal que pode ser incorporado nos processos de estudos de dosagens de concreteiras, projetistas e gerenciadoras.

Estratégia	Critérios
Estratégia descritiva	<ol style="list-style-type: none"> 1 Definição do tempo de vida útil da estrutura. 2 Definição da classe de exposição. 3 Definição da resistividade elétrica. 4 Definição dos processos e gastos de manutenção. 5 Dosagem e procedimentos executivos orientados por regulamentos normativos e recomendações de organizações internacionais especializadas no assunto.

Figura 5a – Planejamento básico proposto para o estudo e desenvolvimento de concreto durável

Estratégia de execução	<p>A dosagem do concreto é elaborada para atender o tempo de vida útil definida.</p> <p>Os gastos de manutenção são detalhados.</p> <p>Os períodos de iniciação e de propagação da corrosão são calculados.</p> <p>A resistividade elétrica é ensaiada.</p> <p>O tempo de vida útil calculado é determinado com base no padrão de comportamento dos agentes agressivos, da resistência, da resistividade e ajustado após análise crítica de falhas.</p> <p>Verificação: Vida útil calculada \geq Vida útil definida.</p>
-------------------------------	---

Figura 5b – Planejamento básico proposto para o estudo e desenvolvimento de concreto durável

Os temas da estratégia proposta devem ser discutidos considerando diretrizes determinantes de prazos em anos e podem ser auferidos a partir do entendimento das seguintes considerações:

1 - Definição do tempo de vida útil da estrutura:

A definição do tempo de vida útil da estrutura deve ser fixada em 50 ou 100 anos, conforme o interesse do usuário. O tema não admite discussão, se tratamos da durabilidade do concreto, é imperativo arguir qual o seu tempo de vida e, uma vez que a ANBT não faz menção a esta importante característica, adotam-se as definições do *Eurocode*.

2 - Definição da classe de exposição:

A agressividade do meio ambiente está relacionada às ações físicas e químicas que atuam sobre as estruturas de concreto, organizadas em classes de exposição.

Para orientar este assunto, a NBR adota a seguinte tabela:

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	

Figura 6 – Tabela 6.1 (NBR 6118) – Classes de agressividade ambiental

Em função da classe de agressividade ambiental, determina-se a qualidade do concreto, conforme as recomendações da tabela seguinte:

Concreto	Tipo	Classe de agressividade (Tabela 6.1)			
		I	II	III	IV
Relação A/C	CA	$\leq 0,65$	$\leq 0,60$	$\leq 0,55$	$\leq 0,45$
	CP	$\leq 0,60$	$\leq 0,55$	$\leq 0,50$	$\leq 0,40$
Classe de concreto (NBR 8953)	CA	≥ 20	≥ 25	≥ 30	≥ 40
	CP	≥ 25	≥ 30	≥ 35	≥ 40

NOTAS:
 1 O concreto empregado na execução das estruturas deve cumprir com os requisitos estabelecidos na NBR 12655
 2 CA corresponde a componentes e elementos estruturais de *concreto armado*.
 3 CP corresponde a componentes e elementos estruturais de *concreto protendido*.

Figura 7 - Tabela 7.1 (NBR 6118) – Correspondência entre classes de agressividade e qualidade do concreto

A proposta do *Eurocode* é mais abrangente, pois permite ao projetista melhor entendimento e aplicações práticas, delimita muito bem o microambiente e o ilustra com exemplos. Esta proposta quase didática é saudável ao profissional que busca resposta nas normas pela primeira vez, tanto pelo valor do seu conteúdo como pela fidelização do consultente.

O cruzamento das duas informações normativas, se bem interpretado pelo tecnólogo, com certeza indicará a melhor opção para a correta e segura definição da classe de exposição.

Designação da classe	Descrição do ambiente	Exemplos informativos onde podem ocorrer as classes de exposição
1 – Sem risco de corrosão ou ataque		
X0	Para concreto não armado e sem inserts metálicos instalados: todas as exposições, exceto ao gelo/degelo, à abrasão ou ao ataque químico. Para concreto armado ou com inserts metálicos instalados: ambiente muito seco.	Concreto no interior de edifícios com muita baixa umidade do ar.
2 – Corrosão induzida por carbonatação Quando o concreto, armado ou contendo inserts metálicos, encontrar-se exposto ao ar ou umidade, a exposição ambiental deve ser classificada como segue:		
XC1	Seco ou permanentemente úmido	Concreto no interior de edifícios com baixa umidade do ar. Concreto permanentemente submerso em água.
XC2	Úmido, raramente seco	Superfícies de concreto sujeitas a longos períodos de contato com água. Muitas fundações.
XC3	Moderadamente úmido	Concreto no interior de edifícios com moderada ou elevada umidade do ar. Concreto no exterior protegido da chuva.
XC4	Ciclicamente úmido e seco	Superfícies de concreto sujeitas ao contato com a água, fora do âmbito da classe XC2.
3 – Corrosão induzida por cloretos não provenientes da água do mar Quando o concreto, armado ou contendo inserts metálicos, encontrar-se em contato com água, que não água do mar, contendo cloretos, incluindo sais descongelantes, a exposição ambiental deve ser classificada como segue:		
XD1	Moderadamente úmido	Superfícies de concreto expostas a cloretos transportados pelo ar.
XD2	Úmido, raramente seco	Piscinas; Concretos expostos a águas industriais contendo cloretos.
XD3	Ciclicamente úmido e seco	Partes de pontes expostas a salpicos de água contendo cloretos; Pavimentos; lajes de parques de estacionamento de automóveis.
4 – Corrosão induzida por cloretos da água do mar Quando o concreto, armado ou contendo inserts metálicos, se encontrar em contato com cloretos provenientes da água do mar ou exposto ao ar transportando sais marinhos, a exposição ambiental deve ser classificada como segue:		
XS1	Ar transportando sais marinhos, mas sem contato direto com a água do mar	Estruturas na zona costeira ou na sua proximidade
XS2	Submersão permanente	Partes de estruturas marítimas
XS3	Zonas de mares, de rebentação ou de salpicos	Partes de estruturas marítimas

Figura 8 - classificação de agressividade ambiental proposto pelo Eurocode (continua)

5 – Ataque pelo gelo/degelo com ou sem produtos descongelantes		
Quando o concreto, enquanto úmido, encontrar-se exposto a um significativo ataque por ciclos de gelo e degelo, a exposição ambiental deve ser classificada como segue:		
XF1	Moderadamente saturado de água, sem produtos descongelantes	Superfícies verticais de concreto expostas à chuva e ao gelo.
XF2	Moderadamente saturado de água, com produtos descongelantes	Superfícies verticais de concreto de estruturas rodoviárias expostas ao gelo e a produtos descongelantes transportados pelo ar.
XF3	Fortemente saturado de água, sem produtos descongelantes	Superfícies horizontais de concreto expostas à chuva e ao gelo.
XF4	Fortemente saturado de água, com produtos descongelantes	Estradas e tabuleiros de pontes expostos a produtos descongelantes; Superfícies de concreto expostas ao gelo e salpicos de água contendo produtos descongelantes; Zonas de estruturas marítimas expostas à rebentação e ao gelo.
6 – Ataque químico		
Quando o concreto se encontrar exposto ao ataque químico proveniente de solos naturais e de águas subterrâneas, conforme indicado no <i>Quadro 2</i> , a exposição ambiental deve ser classificada como estabelecido abaixo. A classificação da água do mar depende da localização geográfica, aplicando-se, assim, a classificação válida no local de utilização do concreto.		
XA1	Ligeiramente agressivo, de acordo com o <i>Quadro 2</i>	
XA2	Moderadamente agressivo, de acordo com o <i>Quadro 2</i>	
XA3	Fortemente agressivo, de acordo com o <i>Quadro 2</i>	

Figura 9 - classificação de agressividade ambiental proposto pelo Eurocode

Os ambientes com agressividade química classificados a seguir têm como base o solo e a água nele contidos, com temperaturas do solo ou da água entre 5°C e 25°C e com velocidade da água suficientemente lenta para ser considerada próxima das condições estáticas.

A classe de exposição é determinada pelo valor mais elevado para qualquer característica química.

Quando duas ou mais características agressivas conduzirem à mesma classe, o ambiente deve ser enquadrado na classe imediatamente superior, a menos que um estudo especial para o caso específico prove que não é necessário.

Característica química	Método de ensaio	XA1	XA2	XA3
1 - Águas				
So ₄ ²⁻ mg/l	EN 196-2	≥200 e ≤600	>600 e ≤3000	>3000 e ≤6000
pH	ISSO 4316	≥5,5 e ≤6,5	≥4,5 e <5,5	≥4,0 e <4,5
CO ₂ agressivo mg/l	EN 13577	≥15 e ≤40	>40 e ≤100	>100
NH ₄ ⁺ mg/l	ISO 7150	≥15 e ≤30	>30 e ≤60	>60 e ≤100
Mg ²⁺ mg/l	ISSO 7980	≥300 e ≤1000	>1000 e ≤3000	>3000
2 - Solos				
So ₄ ²⁻ mg/kg	EM 196	≥2000 e ≤3000	>3000 e ≤12000	>12000 e ≤24000
Acidez ml/kg	DIN 4030	>200 Baumann Gully	Não encontrado na prática	

Figura 10 - classificação de agressividade ambiental proposto pelo Eurocode

Assim como ocorre na NBR, em função da classe de agressividade ambiental, determina-se a qualidade do concreto conforme as recomendações da tabela seguinte:

	Carbonatação				Cloretos provenientes						Ambientes químicos agressivos		
					Água do mar			Outras origens					
	XC1	XC2	XC3	XC4	XS1	XS2	XS3	XD1	XD2	XD3	XA1	XA2	XA3
A/C	0,65	0,60	0,55	0,50	0,50	0,45	0,45	0,55	0,55	0,45	0,55	0,50	0,45
Resistência	C20	C25	C30	C30	C30	C35	C35	C30	C30	C35	C30	C30	C35
Consumo Min CP/M ³	260	280	280	300	300	320	340	300	300	320	300	320	360

Figura 11 – Qualidade do concreto em função da classe de agressividade ambiental

3 - Definição da resistividade elétrica:

Resistividade elétrica é a propriedade que define a dificuldade com que os íons se movimentam no concreto, ou seja, controla o fluxo de difusão dos íons através da solução aquosa presente nos poros do concreto, sendo altamente sensível ao teor de umidade de equilíbrio e à temperatura do concreto. É também chamada de resistência específica e definida como a resistência elétrica de um material homogêneo e isotrópico, de seção reta e comprimento unitário. Por condutividade elétrica, entende-se o inverso da resistividade elétrica (HELENE, 1993).

A resistividade elétrica do concreto e o acesso de oxigênio à armadura constituem os dois principais elementos controladores do processo eletroquímico que gera o fenômeno da corrosão de armaduras. Dessa forma, a velocidade de corrosão do aço no concreto depende muito da resistividade elétrica ou, por outro lado, da condutividade elétrica do eletrólito (fase líquida do concreto). É importante lembrar que Monfore (1968) estudou o efeito do teor de álcalis do cimento na resistividade elétrica de concretos feitos com cimentos Portland comuns de diferentes teores. O cimento com baixo teor continha 0,11% de K_2O , o com alto teor, 1,3% de K_2O . Os resultados mostraram que o teor de álcalis do cimento não exerce influência significativa na resistividade elétrica do concreto.

Baweja *et al.* (1996 *apud* WHITING e NAGI, 2003) monitoraram o efeito do teor de aluminato tricálcico (C_3A) do cimento na resistividade elétrica do concreto. Os resultados obtidos durante mais de 1.000 dias levaram à conclusão de que o teor de C_3A também não causa efeitos significativos na resistividade elétrica do concreto.

Já as adições de substâncias, como sílica ativa, escória de alto forno e cinza volante, influenciam significativamente na resistividade elétrica do concreto, tanto mais quanto maior o seu módulo de finura.

Recomendações internacionais editadas em países do hemisfério norte estabelecem os seguintes limites para a resistividade (ρ):

Resistividade elétrica do concreto - k Ω .cm	Indicação de probabilidade de corrosão
$\rho \geq 20$ k Ω cm	desprezível
$10 \leq \rho \leq 20$ k Ω cm	baixa
$5 \leq \rho \leq 10$ k Ω cm	alta
$\rho \leq 5$ k Ω cm	muito alta
TND = teste não destrutivo Obs.: Critério de avaliação em conformidade com o CEB 192 (1988)	

Figura 12 – Critérios de avaliação da resistividade (SMITH et al., 2004)

No Brasil, devido às características ambientais, a corrosão é possível quando este número fica abaixo de 40 k Ω cm.

Quanto maior a atividade iônica do eletrólito, menor a resistividade elétrica do concreto, sendo que um aumento na relação água/aglomerante na umidade relativa do ambiente ou eventual presença de íons agressivos, como Cl^- , SO_4^{2-} , H^+ e outros, reduzirá significativamente a resistividade do concreto.

Apenas 0,6% de Cl^- é suficiente para diminuir a resistividade de uma argamassa em cerca de 15 vezes (NEVILLE, 1997). Helene (1986) afirma ainda que “a resistividade de um líquido é inversamente proporcional ao teor de sais dissolvidos enquanto a de materiais porosos é inversamente proporcional à umidade salina absorvida”.

A durabilidade das estruturas de concreto armado é resultado da ação protetora do concreto sobre o aço. Quando esta proteção deixa de existir, a estrutura torna-se vulnerável ao fenômeno de corrosão e, nestas condições, é controlada pela resistividade elétrica do concreto e pela disponibilidade de oxigênio ao redor da armadura (ANDRADE, 1995).

Portanto, a resistividade elétrica é altamente influenciada pelo teor de umidade do concreto. Diante desse fato, é necessário distinguir pelo menos duas regiões: uma superficial, que corresponde ao concreto de cobrimento da armadura sujeita a ciclos permanentes de molhagem e secagem e outra interna, onde o teor de umidade do concreto é muito mais estável. Do ponto de vista da corrosão das armaduras, há um interesse maior no controle da região superficial, que pode ser obtido através da determinação da resistividade elétrica do concreto.

Hansson e Hansson (1983) atribuem a resistividade do concreto ao grau de intercomunicação da rede de poros e à elevada concentração de íons Na^+ , K^+ , Ca^{++} , OH^- e Cl^- na solução dos poros. Ao estudarem o efeito da composição química do cimento sobre a resistividade elétrica em pasta, constataram que, em

pastas de cimento de alto forno, a resistividade era superior à resistividade das pastas de cimento resistente a sulfato e também aos cimentos comuns. A redução na concentração de íon OH (íon de maior condutibilidade elétrica) é responsável pela diminuição da condutividade elétrica dos concretos que contêm escória de alto forno.

O resultado do estudo pode ser observado na figura que se segue.

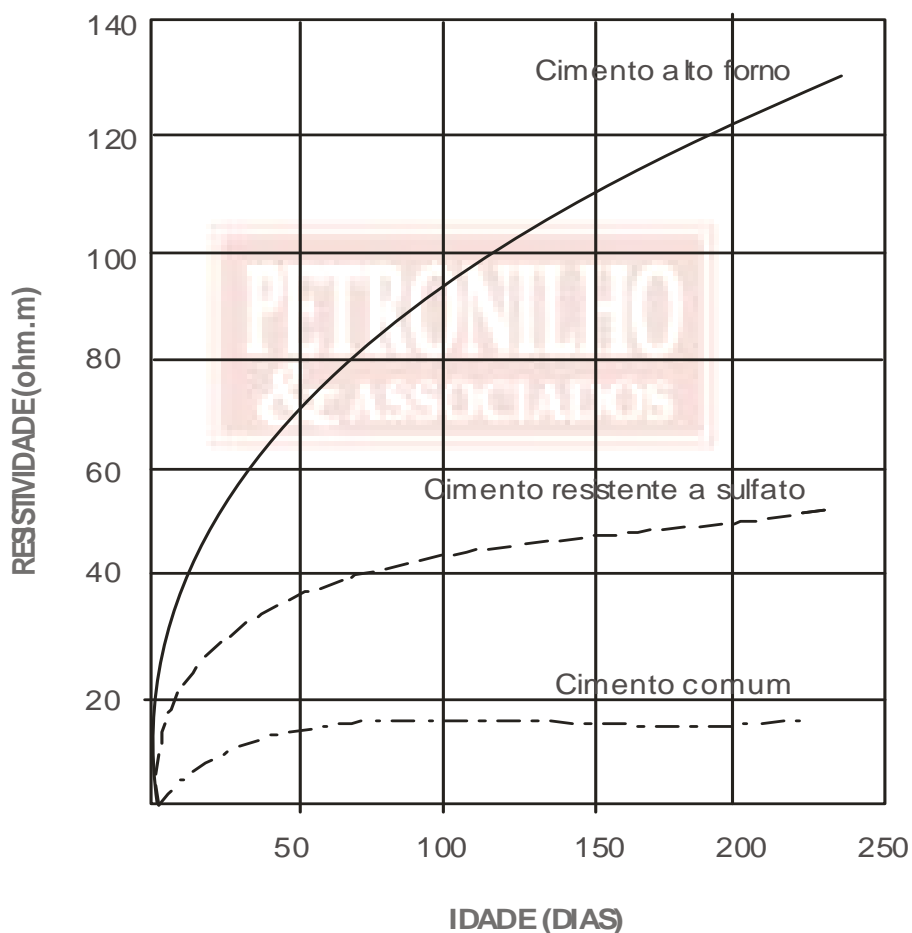


Figura 13 - Resistividade elétrica de pastas de diferentes tipos de cimentos à temperatura de 22°C e umidade relativa de 100% (HANSSON & HANSSON, 1983)

É consenso, entretanto, que a penetração de eletrólitos e gases como o O_2 e o CO_2 irá ocorrer em regiões mais permeáveis e porosas, diminuindo a resistividade do concreto. O que equivale a dizer que um concreto com alta resistividade elétrica é obtido com baixa porosidade (GENTIL, 1996). A presença de íons cloretos e dióxido de carbono aumenta a condutividade elétrica do eletrólito, acelerando a corrosão.

4 – Definição dos processos e gastos com manutenção

A definição dos processos e gastos com manutenção deve ser sustentada pelo estudo do tempo de penetração e propagação dos agentes agressivos, bem como pelo entendimento de seu mecanismo de mobilização pela rede de poros do concreto.

4.1 - Tempo de penetração

O tempo de penetração no concreto de recobrimento dos agentes agressivos, como dióxido de carbono e íons cloreto, pode ser representado pelo seguinte modelo:

$$X = K\sqrt{t}$$

Sendo:

x = profundidade de penetração do agente agressivo

t = tempo

K = coeficiente de durabilidade das variáveis dependentes da agressividade ambiental e do próprio concreto

Admitindo X como a espessura de recobrimento, t corresponde ao tempo que os agentes agressivos (cloreto e dióxido de carbono) despenderão para transpor a

espessura de recobrimento e despassivar a armadura, ou seja, o tempo de iniciação. Quanto maior o valor de K , menor o tempo de iniciação.

Logaritmizando a expressão, tem-se:

$$\log x = \log k + 0,5 \log t$$

desta forma,

$$\text{Recobrimento} = K + 0,5t$$

Adotando escalas logarítmicas para os valores de recobrimento e do tempo, obtêm-se retas de inclinação 0.5, cujas ordenadas em $t = 1$ ano correspondem aos vários valores de K , como esquematizado no ábaco a seguir (Andrade e Alonso, 1996).

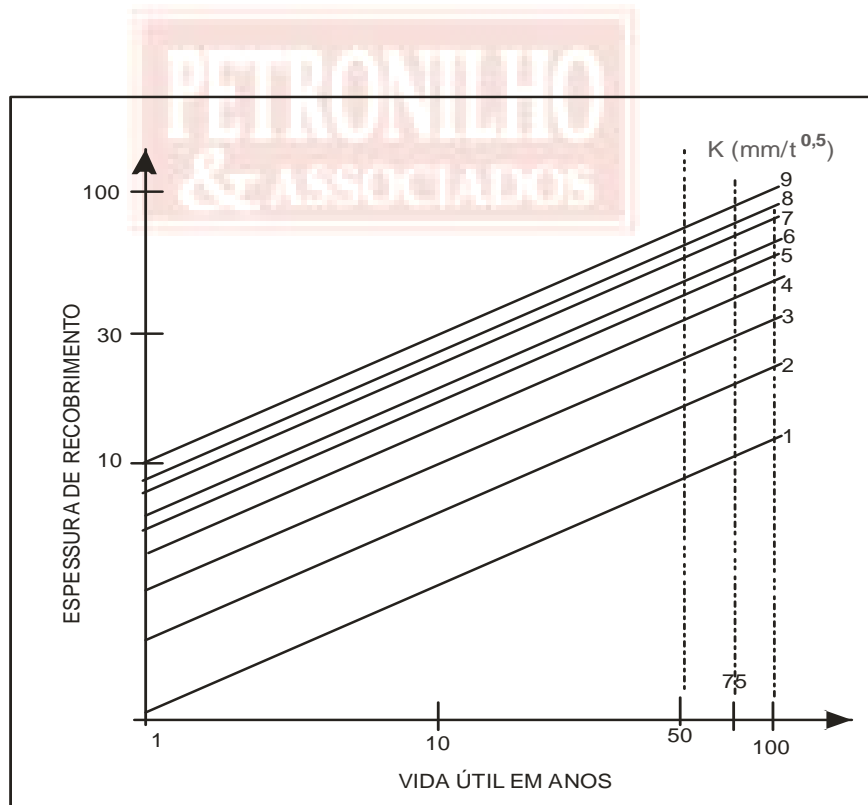


Figura 13 – Representação de $x = K\sqrt{t}$ em escalas logarítmicas (ANDRADE e ALONSO, 1996)

Em estudo realizado por Ivan Ramalho (UFF) em concretos com relação A/C variando entre 0,24 e 0,40 e com utilização de sílica, cinza e pozolana natural, os valores de K em ambiente de cura com 50% de umidade do ar variaram entre 4,889 a 9,507 na cidade de Niterói, Rio de Janeiro, como mostrado na tabela conclusiva a seguir:

Concretos (CP I-32)	Insumos	A / (C+A)	Coeficientes de carbonatação K (mm.ano ^{0,5})	
			Ao ar	A 50% HR
B1	Ref.: 500kg/m ³ A/C=0,36	0,36	3,785	8,517
B2	Ref. + SPL	0,24	0,000	6,393
B5	Ref. + sílica A (sem SPL)	0,42	0,858	9,507
B6	Ref. + sílica B (sem SPL)	0,42	2,081	9,494
B9	Ref. + cinza vol. (sem SPL)	0,36	1,470	8,271
B10	Ref. + poz. nat. (sem SPL)	0,40	1,470	9,362
B3	Ref. + sílica A (com SPL)	0,25	0,612	4,889
B4	Ref. + sílica B (com SPL)	0,24	0,612	4,889
B7	Ref. + cinza vol. (com SPL)	0,24	0,000	5,123
B8	Ref. + poz. nat. (com SPL)	0,25	0,000	5,123

Figura 14 – Variação do coeficiente de carbonatação de concretos com o uso de diferentes adições (RAMALHO, 2001)

Para estes coeficientes de carbonatação apurados por Ramalho, o recobrimento deve variar entre 3,5cm e 6cm de espessura, conforme ábaco traçado na Figura 13, para garantir durabilidade de 50 anos.

4.2 - Tempo de propagação

Nesse período ocorre a dissolução do aço, provocando a redução de seção das armaduras e a formação de óxidos que exercem tensões no concreto, originando fissuração, perda de aderência aço/concreto e, eventualmente, destacamentos.

O período de propagação tem início após a despassivação das armaduras e prolonga-se até os efeitos da corrosão tornarem-se inaceitáveis.

É a velocidade de corrosão, V_{corr} , que determina o período de propagação, ela depende das velocidades do processo anódico e catódico e da resistividade do concreto, sendo corrente considerar que a velocidade de corrosão é inversamente proporcional à resistividade do concreto.

Para determinar o tempo de propagação a partir da resistência à compressão em estudos de dosagem de concretos duráveis, com obediência às recomendações normativas e de organismos internacionais especializados na disciplina, é possível adotar, por sua objetividade, o modelo de Polder (SALTA, 1996). Modelos mais complexos e de maior confiabilidade são apresentados para esse fim, porém, num cenário de tantas variáveis e muitas incertezas, a proposta de Polder ganha sentido por estabelecer-se na média dos resultados apurados em estudos comparativos das diversas propostas.

$$tp = 12.5 \times 10^{-3} f \times \rho$$

tp - Tempo de propagação

f - Resistência do concreto à compressão (N/mm²)

ρ - Resistividade do concreto ($\Omega.m$)

4.3 - Rede de poros

A maioria das propriedades do concreto depende mais da estrutura física dos produtos de hidratação – a rede porosa – que da sua composição química. Depois do início de pega do concreto e durante a fase de hidratação, a pasta de cimento endurecida é composta por hidratos pouco cristalizados de diversos compostos, que constituem um material coloidal com superfície específica com massa cerca de 500 vezes maior que a do cimento que lhe deu origem (POWERS, 1967), contendo gel, cristais de hidróxido de cálcio Ca(OH)_2 , cimento não hidratado, vazios cheios de água e outros componentes.

Vazios são designados por poros capilares e têm diâmetros a partir das dezenas de nanômetros (média de 1.300 nanômetros), enquanto que os vazios existentes no próprio gel (microporos ou poros do gel) têm dimensões mais reduzidas e de poucos nanômetros (NEVILLE, 1995).

A rede porosa da pasta de cimento de um concreto é constituída pelos poros descritos anteriormente – os poros do gel e os poros capilares – e, ainda, pelo poros de maior dimensão, macroporos resultantes da granulometria e do ar emulsionado com os componentes durante a amassadura que não foram liberados durante a fase de compactação (Coutinho e Gonçalves, 1994).

A quantidade de água necessária para hidratar o cimento corresponde, em geral, a 23% da massa do cimento anidro. A solução, denominada água não evaporável, é combinado ou hidrata o cimento, no entanto, para que se dê a hidratação total do cimento é necessário que exista água suficiente não só para reagir quimicamente com o cimento formando o gel, mas para encher os microporos que se vão formando (a água existente no gel não consegue se deslocar para o interior dos capilares e reagir com o cimento ainda não hidratado).

Para relações água/cimento baixas (0,20 a 0,38), o volume de capilares é reduzido, produzindo-se uma pasta de cimento muito densa, o que é francamente vantajoso em termos de durabilidade. Se o concreto fissurar, as partículas de cimento não hidratadas poderão reagir com a água, que vai penetrando nas fissuras e contribui para a sua colmatação. Em termos de resistência, o fato de existirem partículas de cimento não hidratadas totalmente é benéfico (NEVILLE, 1995), atuando como inclusões na matriz de hidrossilicatos (ALMEIDA, 1990).

A densidade da pasta de cimento hidratado traz consequências mecânicas em nível de transferência de tensões na interface com o inerte, pois o concreto funciona como verdadeiro material compósito, onde os inertes são componentes ativos cujas propriedades elásticas influenciam as respectivas propriedades do concreto (AITCIN, 1997).

Para relações água/cimento superiores a 0,38, o cimento é totalmente hidratado, transformando-se em gel cujo volume não preenche todo o espaço livre. A proporção final de poros capilares (após hidratação total) será tanto maior quanto maior a relação água/cimento (NEVILLE, 1995).

O volume de poros capilares aumenta muito a partir da relação água/cimento entre 0,4 e 0,5 e uma cura inadequada pode levar a uma hidratação incompleta com um volume enorme de rede capilar (RICHARDSON, 1992/93).

Portanto, a quantidade de poros capilares da pasta de cimento depende não só da relação água/cimento, mas também do grau de hidratação.

Em pastas já "maduras" (com elevado grau de hidratação), os poros capilares podem ficar bloqueados pela formação do gel, segmentando a rede porosa capilar de tal modo que os capilares fiquem ligados apenas pelos microporos. A ausência

de continuidade na rede porosa capilar é, portanto, causada pela combinação adequada da relação água/cimento e um tempo suficientemente longo de cura úmida (NEVILLE, 1995).

A figura a seguir ilustra a situação exposta:

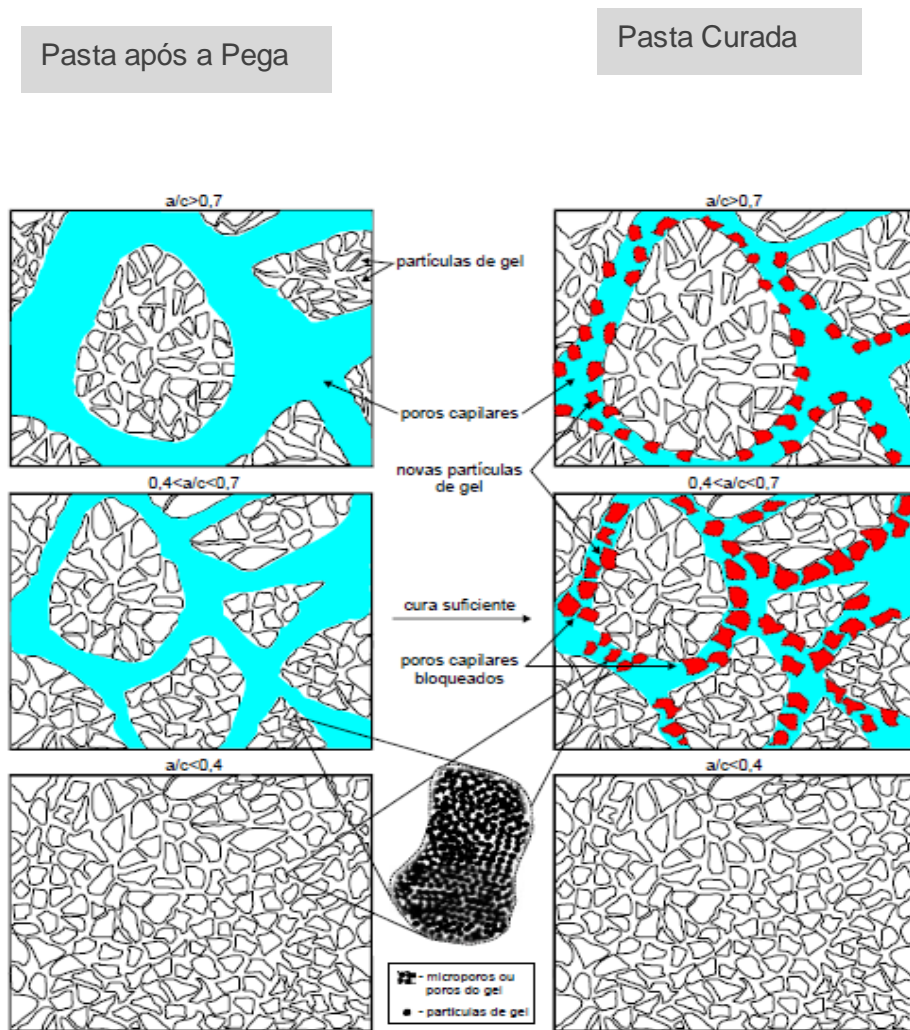


Figura 15 - Representação esquemática da influência da relação água/cimento e cura na rede porosa capilar (NEVILLE, 1955)

Adota-se preferencialmente o processo de cura úmida com o emprego de mantas que aprisionam água sobre a superfície do concreto até que este atinja o mínimo de 50% de sua resistência final projetada. Esse procedimento é eficiente para a segmentação da rede porosa capilar do concreto.

Observe, na Figura 15, que para relações água/cimento superiores a 0,7, mesmo após a hidratação total do cimento, não se produz quantidade de gel suficiente para segmentar a rede capilar.

Assim, é da maior importância, em termos de durabilidade do concreto, eliminar a continuidade da rede capilar, bloqueando-a com as partículas do gel cimentício.

Uma alternativa para conhecer melhor a estrutura porosa do concreto é recorrer a curvas porométricas obtidas por ensaios de porometria de mercúrio.

4.4 - Mecanismos de transporte dos fluidos

A estrutura porosa do concreto endurecido, sobretudo da rede capilar, é fator decisivo em termos de permeabilidade e durabilidade. Dela depende a facilidade com que os fluídos, como água pura ou com substâncias dissolvidas, dióxido de carbono e oxigênio, penetram e se movimentam através da rede porosa, sobretudo nos capilares que formam uma rede contínua.

A esta "facilidade" ou "penetrabilidade" é, em geral, associado o termo *permeabilidade do concreto*, envolvendo os seguintes mecanismos de transporte através da rede porosa:

- a) permeação ou permeabilidade;*
- b) sucção capilar (ou absorção capilar);*
- c) difusão.*

a) Permeação ou permeabilidade

No sentido restrito das palavras, diz respeito ao volume de fluido viscoso escoado através de sistema poroso, em regime laminar e permanente, com vazão de água numa direção, causado por um gradiente de pressão que atravessa uma seção do concreto (gradiente hidráulico, no caso de concreto submerso). Esse fenômeno é regido pela lei de Darcy, sendo o escoamento laminar não turbulento e permanente (deduzida para um maciço incoerente por Darcy).

$$V = ki$$

em que:

V – velocidade da circulação da água (m/s)

$i = \frac{H}{L}$ – gradiente de pressão hidráulica (adimensional)

k – coeficiente de permeabilidade (dimensões de uma velocidade) à água (m/s)

Permite-se, então, determinar o coeficiente de permeabilidade, sendo o fluido em estudo a água em regime permanente, o que certamente é uma abordagem simplificada, pois o gradiente hidráulico não é constante e não se conhece ainda a lei de variação de pressão no interior do concreto (COUTINHO e GONÇALVES, 1994).

Os valores do coeficiente de permeabilidade para o concreto variam sensivelmente de 10^{-16} a 10^{-10} m/s (GEIKER *et al*, 1995).

Para determinar o coeficiente de permeabilidade à água é necessário que o concreto esteja saturado, evitando, assim, o mecanismo de absorção por capilaridade para que atinja, ao fim de mais ou menos tempo, um fluxo estacionário. No entanto, muitas vezes não é possível atingir o fluxo estacionário

em concretos menos permeáveis, mesmo empregando pressões elevadas (3,5 MPa) durante longos períodos (500 horas). Nesses casos, emprega-se um método não estacionário, que consiste de medir a profundidade de penetração da água sob pressão (KHATRI e SIRIVAVTNANON, 1997).

Portanto, os métodos para determinação da permeabilidade à água dividem-se em duas categorias:

1)- Método de **escoamento** de água sob pressão, que consiste de submeter um corpo de prova de concreto, de preferência de pequena espessura, a um determinado gradiente hidráulico, de modo a que o fluxo se dê em condições estacionárias, o que em geral se torna possível quando o corpo de prova está totalmente saturado, anulando-se as forças capilares e verificando na prática uma diminuição de pressão inicial e sua posterior estabilização. Existem diferentes tipos de equipamentos apropriados para aplicação deste método de cálculo do coeficiente de permeabilidade do concreto à água.

A NBR 10787 adota um aparato simples e eficiente, em que a pressão hidrostática pode atingir até 30bar e a água que transpassa os corpos de prova é transportada diretamente para uma proveta graduada, o que permite determinar a permeabilidade em cm/s, conforme a lei de Darcy, aplicando-se a fórmula a seguir:

$$K = \frac{cc.h}{A.t.P}$$

Onde:

cc = água permeada (cm³)

h = altura do corpo de prova (cm)

A = área do corpo de prova (cm²)

T = tempo do ensaio (s)

P = pressão hidrostática em centímetros de coluna d'água

O método acima é usado para concretos de permeabilidade (K) relativa, com coeficientes superiores a 1.3×10^{-13} m/s (KHATRI e SIRIVAVTNANON, 1997).

A figura abaixo determina os limites de seu uso.

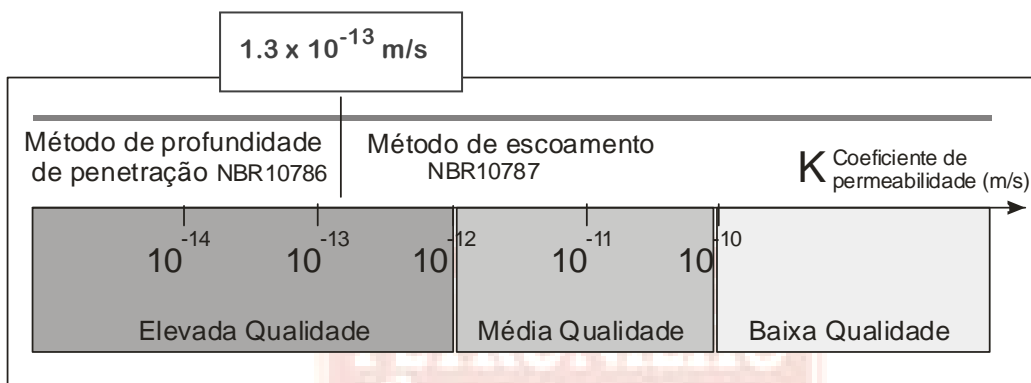


Figura 16 - Qualidade do concreto em função do coeficiente de permeabilidade à água k. (a partir de BROWNE, 1991, KHATRI e SIRIVAVTNANON, 1997 e APPLETON, 1997)

2)- Método de **profundidade de penetração** de água sob pressão usado para concretos pouco permeáveis ($k < 1.3 \times 10^{-13}$ m/s), em que não é estabelecido um fluxo estacionário, pois a água não chega a atravessar o corpo de prova. Neste tipo de ensaio, é necessário garantir que o escoamento seja uniaxial, o que se consegue, na prática, se a profundidade de penetração da água for consideravelmente inferior à largura do corpo de prova (KHATRI e SIRIVAVTNANON, 1997).

Concomitantemente às recomendações e normas sobre ensaios de profundidade de penetração de água sob pressão, existem as normas SS 137214 e Din 1048/1 e a recomendação ISO/DIS 7031 (GEIKER *et al*, 95), baseada na recomendação RILEM CPC 13.1.

Os procedimentos destas normas e recomendações são equivalentes à NBR 10786 e têm a finalidade de forçar a água através do corpo de prova e medir a velocidade de percolação a uma determinada pressão que pode ser facilmente controlada e regulada. Os aparelhos são projetados para permitir que sejam medidas as vazões de entrada e saída de água. O corpo de prova é submetido à pressão contínua de 2MPa por um período de aproximadamente 500 horas.

O coeficiente de permeabilidade é calculado pela expressão:

$$K = \frac{Q \cdot L}{A \cdot H}$$

Onde:

K = coeficiente de permeabilidade (cm/s)

Q = vazão de entrada (cm³/s)

L = altura do corpo de prova (cm)

A = área da seção transversal do CP (cm²)

H = altura da coluna d'água correspondente à pressão utilizada (cm)

É comum alterar esse ensaio para determinar mais rapidamente a profundidade de penetração pura e simples como parâmetro de qualidade do concreto. Nesta versão, o corpo de prova é sujeito a uma pressão de 0,1MPa nas primeiras 48 horas do ensaio, nas 24 horas seguintes a uma pressão de 0,3 MPa e, finalmente, nas últimas 24 horas a uma pressão de 0,7 MPa. A ISO 7031 esclarece que um concreto é considerado impermeável se sua profundidade média for inferior a 20mm e a máxima, inferior a 50mm aos 28 dias de idade.

Essa alteração não permite a determinação do coeficiente de permeabilidade do concreto à água, apenas determina qualitativamente sua resistência à penetração.

b) Sucção capilar ou absorção capilar

Os ensaios de sucção ou absorção capilar consideram e estudam as características de absorção relativa ao concreto de recobrimento das armaduras. E medem a absorção superficial – ou perto da superfície do concreto – com uma pressão de água ou ar ligeiramente superior à que seria causada pela chuva batida. Os ensaios não são de absorção pura, pois envolvem também o mecanismo de permeação, porém, fornecem indicações confiáveis relativas à qualidade do concreto.

O mecanismo da absorção por capilaridade é verificado quando um líquido em contato com um capilar estabelece uma diferença de pressão entre a sua superfície livre e a superfície da água dentro do capilar. Refere-se, portanto, ao processo pelo qual o concreto drena água para seus poros. Já a diferença de pressão é abordada pela lei de Jurin.

É necessário distinguir o termo absorção capilar do termo "absorção" (por imersão). Absorção por imersão corresponde à quantidade de volume poroso, em geral obtido após secagem de um corpo de prova e posterior imersão em água até massa constante, medido pelo aumento de massa expresso em função da massa do corpo de prova seco, em percentagem.

De acordo com o procedimento adotado (temperatura e duração de secagem, tempo de imersão, temperatura da água), os resultados para o mesmo concreto diferem (por exemplo, de 3% a 18% - *Concrete Society, 1987*), motivo pelo qual os valores da absorção por imersão não são, em geral, usados para medir a qualidade do concreto. No entanto, a maioria dos concretos de boa qualidade

apresenta valores de absorção inferiores a 10%, segundo Neville (1995), enquanto outros pesquisadores limitam este valor a 5%.

Em relação à absorção capilar propriamente dita, esta propriedade é muito importante às obras de concreto na medida em que constitui um dos mecanismos relevantes da entrada de água e de agentes agressivos nela dissolvidos na capa de recobrimento das armaduras.

Diversos métodos são propostos para esse ensaio, a maioria por meio de equipamentos eletrônicos, e as unidades de medidas propostas como resultado nem sempre atendem ao interesse do tecnologista.

O método ISAT – *Initial Surface Absorption Test* – é uma das técnicas utilizadas para medir a sucção capilar e é descrito na norma britânica BS-1881- Parte 5. De acordo com esse método, submete-se a superfície do concreto a uma pressão correspondente a uma coluna d'água de 200mm.

O equipamento ISAT, mostrado na Figura 18, pode ser encontrado comercialmente no Brasil. O resultado é expresso numa escala de capilaridade em função do tempo necessário para o deslocamento do menisco d'água por certa distância sob 200mm de coluna d'água. A absorção será elevada se os capilares forem maiores e será lenta se forem de dimensões reduzidas, o que permite inferir a qualidade do concreto.

Um método não destrutivo e bastante aplicado no Brasil para se verificar a permeabilidade ao ar do concreto é o *Torrent Permeability Tester*, que é composto por uma célula de câmara dupla e um regulador de pressão que balanceia a pressão das câmaras interna e externa. Desta forma, o fluxo de ar unidirecional é obtido, eliminando-se qualquer suposto fluxo de ar lateral, possibilitando a aplicação de um modelo físico para o cálculo do coeficiente de permeabilidade ao ar. O método consiste de aplicar vácuo dentro desta célula

previamente acoplada na superfície do concreto e medir o grau em que a pressão no interior da célula aumenta. Como o ar dentro dos poros do concreto está, a princípio, submetido à pressão atmosférica, ele fluirá para a célula de vácuo na intensidade indicada por sua permeabilidade. Desta forma, quanto maior o aumento de pressão no interior da célula, maior será a permeabilidade ao ar deste concreto.

A qualidade do concreto testado pode ser aferida com base na tabela a seguir, desenvolvida pela Holderbank Suíça (Holcim no Brasil):

Índice	Classificação	Permeabilidade por difusão de ar (10^{-16} m^2)
0	Muito pobre	>10
1	Pobre	2,5 - 10
2	Médio	0,5 - 2,5
3	Bom	0,1 - 0,5
4	Muito bom	0,025 - 0,1
5	Excelente	< 0,025

Figura 17 – Índices de qualidade do concreto para método “KT” PERMEATOR TORRENT. Holderbank Suíça (Holcim no Brasil)

Adota-se absorção capilar $< 18\text{g/m}^2/\text{s}^{0,5}$ como referência de boa qualidade da capa de recobrimento de concreto.

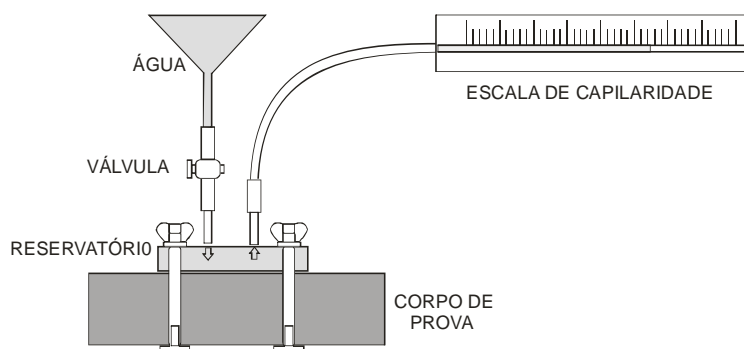


Figura 18 - ISAT Initial Surface Absorption Test – Equipamento

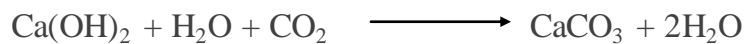
c) Difusão

A difusão é um processo secundário verificado quando se estabiliza o movimento de absorção d'água. Corresponde à penetração de íons líquidos ou gases decorrentes de gradientes de concentração, verificando apenas na ausência de gradientes de pressão hidráulica (COUTINHO e GONÇALVES, 1994). É um processo muito mais intenso que a perda d'água por evaporação, por isso o concreto apresenta, em geral, mais umidade que o meio ambiente no qual se insere. As substâncias agressivas presentes na umidade são, sobretudo, o dióxido de carbono, que provoca a carbonatação do concreto; o oxigênio e os cloretos, que promovem a corrosão das armaduras; os ácidos, que atacam o cimento; os sulfatos, que podem reagir expansivamente com o cimento, e os álcalis, que podem reagir com os agregados também de um modo expansivo. O processo destrutivo avança até o comprometimento total da armadura.

Em estruturas imersas, a água começa a penetrar por absorção capilar e por pressão hidráulica. Com a água penetram os íons deletérios anteriormente citados, que ficarão retidos nas zonas superficiais onde se dá a evaporação e onde aparecerão as eflorescências. Na medida em que faz variar a umidade no interior do concreto, a umidade ambiental interfere em todo o processo de deterioração do concreto e de corrosão das armaduras,.

Em relação à temperatura, é sabido que ela influencia significativamente a velocidade das reações químicas. Pode-se afirmar que cada aumento de 10°C corresponde à duplicação da velocidade de reação. Por essa razão, em ambientes tropicais a agressividade é considerada mais elevada quando comparada com a dos climas do hemisfério norte.

Carbonatação - Em climas tropicais, em que as temperaturas e os níveis de umidade relativa são elevados, os requisitos para a composição do concreto são bem mais rigorosos. O concreto absorve anidrido carbônico, CO₂, presente naturalmente no ar; por ação da umidade este pode se transformar numa solução diluída de ácido carbônico, que se difunde nos capilares do concreto, reage com o hidróxido de cálcio e produz carbonato de cálcio. É a este fenômeno que se denomina carbonatação do concreto. Podemos descrevê-lo através da seguinte reação química:



A carbonatação é uma reação natural do concreto e no caso do concreto normal não armado é útil, pois ajuda no endurecimento e, no longo prazo, promove a obtenção de uma estanqueidade suplementar, uma vez que o carbonato de cálcio ocupa um volume maior que a cal e isso ajuda a fechar o sistema de poros natural do concreto.

No caso do concreto armado, quando a profundidade de carbonatação atinge a zona das armaduras, elas entram em risco imediato de corrosão, que pelo aumento de volume provoca fissuração da estrutura e sua consequente destruição. A elevada alcalinidade da água saturada com hidróxido de cálcio retida nos poros do concreto protege as armaduras contra a corrosão devido à formação de um óxido de ferro alcalino que impede a difusão do oxigênio e, como consequência, conduz à passivação da superfície do aço. Essa proteção contra a corrosão é verificada para valores de pH de 9,5 a 13,0.

A velocidade de carbonatação está condicionada à velocidade de difusão do dióxido de carbono no interior do concreto, que depende, por um lado, da

qualidade do concreto e, principalmente, de seu grau de porosidade e de conexão entre os poros e, por outro lado, de fatores ambientais, como temperatura e umidade. Se as estruturas de concreto encontram-se mergulhadas em água ou a atmosfera envolvente é muito úmida (umidade relativa superior a 80%), a velocidade de carbonatação é muito pequena e mesmo após longos períodos de tempo, a profundidade de carbonatação é praticamente nula.

Se a atmosfera envolvente é seca (umidade relativa inferior a 30%), a umidade necessária à reação de carbonatação é insuficiente e a velocidade de reação é igualmente muito baixa ou nula. Isto explica porque, por exemplo, a velocidade de carbonatação das partes das estruturas colocadas no interior de edifícios em que a atmosfera é seca é muito menor que a velocidade de carbonatação das partes das mesmas estruturas viradas para o exterior e expostas à intempérie.

Se as estruturas de concreto estão expostas num ambiente em que a umidade relativa do ar permanece entre 30% e 80% e estão normalmente expostas às intempéries, a concentração de água nos poros do concreto é suficiente para que a velocidade de reação de carbonatação tenda para o seu valor máximo.

Na medida em que a reação de carbonatação vai ocorrendo, a profundidade de carbonatação vai aumentando e a alcalinidade diminui progressivamente da superfície para o interior da estrutura. Se a zona de carbonatação atinge as armaduras e o pH baixa para valores inferiores a 9,5, a passivação deixa de se fazer e, em presença de umidade e oxigênio, tem início o processo de corrosão.

Cloretos – O mecanismo de transporte dos cloretos dentro do concreto é regido pela difusão iônica. Valores típicos da taxa de difusão para pastas de cimentos plenamente saturadas são da ordem de 10-12 m²/s e, portanto, a penetração de cloretos numa espessura de 10mm de pasta de cimento demandaria muitos meses (CASCUDO, 1997).

Para que tenha início a corrosão, a camada de passivação da barra de aço deve ser atravessada. Os íons cloretos ativam a superfície do aço, formando o anodo, sendo o catodo formado na superfície passivada. Como a célula eletroquímica precisa de uma conexão entre o anodo e o catodo pela água dos poros, bem como pela própria armadura, o sistema de poros na pasta de cimento endurecida é um fator importante, que influencia na corrosão. Em termos elétricos, é a resistência da conexão pelo concreto que controla a passagem da corrente. A resistividade elétrica é fortemente influenciada pelo seu teor de umidade, pela composição iônica da água dos poros e pela continuidade do sistema de poros da pasta endurecida.

A resistividade regula a mobilidade dos íons, dificultando sua circulação, enquanto a ausência de oxigênio próximo à superfície do aço interrompe o processo (ABREU, 1998). Para controlar esse processo, é fundamental monitorar o coeficiente de difusão dos cloretos e do oxigênio na solução aquosa dos poros e o aumento da resistividade elétrica do concreto.

Os cloretos podem ser encontrados no concreto na forma de íons livres na água dos poros ou como cloreto combinado como parte das fases hidratadas do cimento. O primeiro apresenta-se realmente agressivo à armadura, o segundo nem tanto. Geralmente, os íons cloretos são provenientes do meio ambiente (HELENE, 1993) e ingressam no concreto de várias maneiras, uma das principais é através dos aditivos, dos agregados contaminados em regiões litorâneas, em lençóis freáticos formados por águas salobras ou excessivamente cloradas, nos próprios cimentos, já que contribuem para as resistências iniciais, e na água da rede pública.. Em ambientes marinhos, é normalmente maior na zona de respingos que na zona de névoa, e é maior na zona de maré que na zona submersa.

Em regiões litorâneas, a proximidade do mar faz com que a própria atmosfera contenha íons cloreto. As partículas de água do mar contendo sais dissolvidos, quando em suspensão na atmosfera, são arrastadas pelo vento e podem ser depositadas nas estruturas, possibilitando sua penetração por absorção capilar ou difusão.

A água é considerada adequada se atende à exigência do apêndice da BS 3148 BSI (1980), que recomenda os limites de 500ppm para cloreto e 1.000ppm para sulfato. A água potável, por política de saúde pública, contém um teor muito baixo de cloro (< 1,4ppm), que não afeta o concreto.

Local	Norma	Limite Máximo de Cloretos		Limite referido a:
		Concreto armado	Concreto protendido	
Brasil	NBR 6118	0,05	-	Água de amassamento
	NBR 7197	-	0,05	
	NBR 9062	-	0,05	
Espanha	EH- 88	0,40%	-	Cimento
	EP-88	-	0,10%	
EUA	ACI 222	0,20%	0,08%	Cimento
	ACI 201	0,20%	0,08%	
	ACI 318	0,30% ambiente normal	0,006%	
		0,15% ambiente cloreto		
1% ambiente seco				
Europa	CEB	0,05%	0,025%	Concreto
	CEB-FIP	0,40%	0,20%	Cimento
	ENV 206	1% conc. simples	0,20%	
0,40%				
Japão	JSCE SP-2	0,60 KG/M ³	0,30 KG/M ³	Concreto

Figura 18 – Limites máximos dos teores de cloretos nos cimentos e concretos, de acordo com diversas normas

Adota-se a norma ASTM C 1202-94 para o ensaio de permeabilidade por difusão de íons cloretos. Este método consiste em submeter um corpo de prova à passagem de corrente elétrica por um período de seis horas, sob uma diferença de potencial de 60V. O corpo de prova tem uma das extremidades imersa em solução de hidróxido de sódio e a outra em solução de cloreto de sódio. A carga

total passante é medida em Coulomb (C) e é relacionada com a resistência do concreto à penetração dos íons cloreto, sendo estes resultados classificados segundo os valores referenciais do quadro a seguir:

Carga Passante (C)	Risco de penetração do íon cloreto
>4.000	Alto
2.000 - 4.000	Moderado
1.000 - 2.000	Baixo
100 - 1.000	Muito Baixo
>100	Desprezível

Figura 19 – Qualidade do concreto em função da concentração de cloreto determinada pela carga passante em Coulomb (C)



Referências Bibliográficas:

- Aitcin P. C. Concreto de Alto Desempenho, 2008
- Andrade, C (1992), Manual para diagnóstico de obras deterioradas por corrosão de armaduras. Carmona, Antônio e Helene, Paulo R.L. São Paulo: Editora Pini, 1992.
- Andrade, M.C. Calculation of chloride diffusion coefficients in concrete from ionic migration measurements. Cement and Concrete Research, Pergamon Press
- Baweja, D. Durable Concrete: Historical Perspective and Future, 2002
- Cascudo, O. O controle da corrosão de armaduras em concreto – inspeção e técnicas eletroquímicas. Goiânia, 1997.
- Cascudo, O. Inspeção e Diagnóstico de estrutura de concreto com problemas de corrosão de armadura, Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações, IBRACON, 2005
- Coutinho, J.S. (1998), “Melhoria da Durabilidade dos Betões por Tratamento da Cofragem”, Tese de Doutorado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Gentil, V Corrosão. 4^a ed. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2003.
- Guimarães, A. T. C. Desempenho do concreto em ambiente marítimo na região do extremo sul do Brasil. Rio Grande, 1997. Dissertação (Mestrado), Fundação Universidade do Rio Grande, Engenharia Oceânica.
- Gonçalves, A.; Andrade, C.; Castellote, M. Procedimientos de reparación y protección de armaduras. Manual de rehabilitación de estructuras de hormigón. 2003.
- Helene, P. R.L. Tecnologia de edificações. Corrosão de armaduras para concreto armado. São Paulo: Editora Pini, p. 597-602 1988.
- Mehta, P. K.; Monteiro, P. J. M. Concreto: estrutura, propriedades e materiais. São Paulo, Pini, 1994.
- Mehta, P. K.; Schiessl, P.; Raupach, M. Performance and Durability of Concrete Systems. In: International Congress on the Chemistry of cement, New Delhi, nov./1992.

- Mehta, P. K.; Manmohan, D. Pore size distribution and permeability of hardened cement paste. In: 7th International Congress on the Chemistry of cement. Paris, 1980.
- Neville, A. M. (1995), Properties of concrete, Fourth edition, Longman, Edinburgh.
- Neville, A. M (1994), Cement and Concrete: Their interrelation in Practice
- Noguchi, T. e Mori, H. (1998), “State-of-the-art Report: Evaluation of Fresh Properties of Self-Compacting Concrete in Laboratory and on Site”, *International Workshop on Self-compacting Concrete*, www.infra.kochi-tech.ac.jp/sccnet/,
- Nunes, S., Coutinho, J. S., Sampaio, J. e Figueiras, J. (2000), “Betão Auto-Compactável (BAC): uma composição.”, *Encontro Nacional Betão Estrutural 2000*,
- Page, C. L.; Short, N. R.; El Tarras, A. Diffusion of chloride ions in hardened cement pastes. Cement and Concrete Research, Pergamon Press,
- Paulon, V A. A micro estrutura do concreto convencional, Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações, IBRACON, São Paulo.
- Properties of Self-Compacting Concrete”, *International Workshop on Self-compacting Concrete*, www.infra.kochi-tech.ac.jp/sccnet/,
- Prudêncio JR, L.R. Durabilidade de concreto frente ao ataque de cloretos e sulfatos. In: Qualidade e Durabilidade das estruturas de concreto, Seminário NORIE-UFRS, Porto Alegre, 1993.
- Roncero, J., Gettu, R. e Vilarasau, I. C. (2000), “Effect of superplasticizer on the behavior of concrete in the fresh and hardened states: implications for high performance concretes”, Universitat Politècnica de Catalunya, Escola Tècnica Superior D’Enginyers de Camins, Canals I Ports de Barcelons.
- RILEM TC116-PCD (1999), “Permeability of concrete as a criterion of its durability: Determination of the absorption of water of hardened concrete”.
- Skarendahl, Å. e Petersson, O. (2001), “Self-Compacting Concrete”, *State-of-Art report of RILEM Committee 174-SCC*, Report 23, RILEM Publications.