

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CONSTRUÇÃO CIVIL

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**Avaliação do desempenho de camada protetora em concreto
submetido a meio quimicamente agressivo**

Autor: Júlio Gomes do Val
Orientadora: Prof^a Dr^a Carmen Couto Ribeiro

Belo Horizonte
2007

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CONSTRUÇÃO CIVIL

Júlio Gomes do Val

**Avaliação do desempenho de camada protetora em concreto
submetido a meio quimicamente agressivo**

Dissertação de Mestrado apresentada ao
Curso de Mestrado em Materiais de Construção
da Universidade Federal de Minas Gerais

Área de Concentração: Materiais Cimentícios
Orientadora: Prof^a Dr^a Carmen Couto Ribeiro

Belo Horizonte
Escola de Engenharia da UFMG
2007

Val, Júlio Gomes

V135a Avaliação do desempenho de camada protetora em concreto submetido a meio quimicamente agressivo [manuscrito] / Júlio Gomes do Val – 2007.
72 f., enc.: il.

Orientadora: Carmen Couto Ribeiro

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Anexos: f. 69-72.

Bibliografia: f. 64-68.

1. Construção civil - Teses. 2. Concreto - Teses. 3 Materiais de construção – Durabilidade – Teses. I. Ribeiro, Carmen Couto. II. Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 691(043)

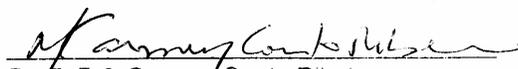
**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CONSTRUÇÃO CIVIL**

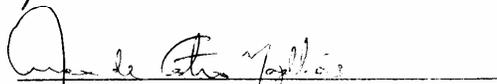
**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE CAMADA PROTETORA EM
CONCRETO SUBMETIDO A MEIO QUIMICAMENTE AGRESSIVO**

Júlio Gomes do Val

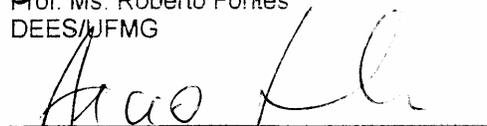
Dissertação apresentada ao Programa de Pós
Graduação em Construção Civil da Escola de
Engenharia da Universidade Federal de Minas
Gerais como requisito parcial à obtenção do
título de Mestre em Construção Civil.

Comissão examinadora:


Prof.^a. Dr.^a. Carmen Couto Ribeiro
DEMC/UFMG – (Orientadora)


Prof. Dr. Max de Castro Magalhães
DEMC/UFMG


Prof. Ms. Roberto Fontes
DEES/UFMG


Prof. Dr. Aécio Freitas Lira
Faculdade Pitágoras

Belo Horizonte, 20 de Dezembro de 2007

Aos meus pais, Manoel e Amélia,
minha irmã, Celina e
à minha namorada, Thaís.

AGRADECIMENTOS

O autor agradece a todos aqueles que, direta ou indiretamente, colaboraram na preparação deste trabalho e, em especial:

À Prof^a Carmen Couto Ribeiro, por sua dedicação em formar um pesquisador crítico e consciente do papel da academia perante a sociedade, assim como pelo exemplo de ética e compromisso com a arte do ensinar;

À Prof^a Joana Darc da Silva, da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, pelo exemplo como pesquisadora, pela oportunidade de seguir seus passos e por suas importantes considerações neste trabalho;

Ao Arquiteto Tadeu Starling, pela amizade e por sua importante contribuição neste trabalho;

À Ivonete dos Santos Magalhães, secretária da pós-graduação, pela dedicação e presteza na solução de questões acadêmicas.

Aos funcionários do Departamento de Engenharia de Materiais e Construção da UFMG, Isa Marques, Ricardo Barbosa, Adimilson Caetano e Gilmar pelo apoio e presteza.

Aos técnicos do laboratório de Materiais de Construção e de Físico-Química da PUC Minas, Roberto Mauro Lara, Misael Fernandes Barbosa e Daniele Silvério Brandão pelo apoio na produção do concreto, nos testes de resistência, absorção d'água e fornecimento da solução de ácido sulfúrico para os ataques no concreto.

Ao Valdo Andrade, da Vedacit Impermeabilizantes/Otto Baumgart, pelo fornecimento do aditivo e da tinta utilizados neste trabalho;

Ao Departamento de Engenharia de Materiais e Construção da UFMG.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	2
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
3.1 Concreto e suas propriedades	3
3.2 Materiais constituintes do concreto.....	4
3.3 Resistência à compressão.....	14
3.4 Durabilidade do concreto.....	20
3.4.1 Abordagem da durabilidade pela normalização brasileira.....	22
3.4.2 Papel da cura na durabilidade do concreto.....	23
3.5 Permeabilidade e Absorção.....	27
3.5.1 Permeabilidade	27
3.5.2 A absorção.....	27
3.6 Dosagem de concreto.....	29
3.7 Caracterização dos meios agressivos	32
3.8 Concretos submetidos a meios ácidos	34
3.9 Mecanismos de proteção do concreto	38
4. METODOLOGIA	42
4.1 Composição de métodos de dosagem.....	42
4.2 Produção do Concreto	42
4.3 Análise do concreto fresco.....	43
4.4 Análise do concreto no estado endurecido	44
4.4.1 Moldagem dos corpos de prova	44
4.4.2 Resistência à compressão	44
4.4.3 Ensaio de absorção.....	45
4.5 Ataque ao concreto.....	45
4.6 Proteção do concreto.....	46
4.7 Avaliação das proteções.....	47
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	49
5.1 Dosagem	49
5.2 Qualidade da areia.....	50

5.3 Influência da cura na resistência do concreto	51
5.4 Avaliação da eficiência da camada protetora	52
5.4.1 Influência da concentração do ácido	52
5.4.2 Inspeção visual.....	53
5.4.3 Influência da absorção	56
5.4.4 Perda de massa	58
5.4.5 Resistência à compressão	60
6. CONCLUSÕES.....	62
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	64
8. BIBLIOGRAFIA	67
ANEXOS	69

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Efeito de restrição dos pratos da prensa na ruptura do corpo de prova ..	16
Figura 3.2 – Influência da relação altura/diâmetro do corpo de prova cilíndrico na resistência (Neville, 1997)	16
Figura 3.3 – Fatores que influenciam a resistência do concreto (Mehta, 1994).....	17
Figura 3.4 – Resistência em função da relação água/cimento do concreto.....	18
Figura 3.5 – Variação da resistência em função da idade do concreto (Neville, 1997)	20
Figura 3.6 – Influência da cura úmida sobre a resistência do concreto (Mehta, 1994).	25
Figura 3.7 – Influência do tipo de cura na resistência à compressão (Ferreira, 2007).	26
Figura 3.8 – Variação da absorção em função do tempo em que o corpo de prova fica submetido a um tipo de cura (Camarini, 1999)	28
Figura 3.9 – Perda de resistência de concretos produzidos com diversos tipos de cimento quando submetidos ao ataque por ácido sulfúrico (Moreira, 2001).....	36
Figura 3.10 – Corrosão da armadura (Gentil, 2003)	37
Figura 3.11 – Aspectos da definição do sistema de proteção adequado (Isaia, 2005)	39
Figura 4.1 – Avaliação do abatimento (Neville 1997).....	43
Figura 4.2 – Ensaio de compressão.	44
Figura 4.3 – Imersão do concreto em ácido sulfúrico.....	46
Figura 4.4 – Concreto protegido com tinta epóxi e sem proteção.	47
Figura 5.1 – Evolução da resistência para concretos produzidos com duas areias diferentes.....	51
Figura 5.2 – Evolução da resistência à compressão em função do tipo de cura	52
Figura 5.3 – Concreto submetido à imersão em ácido sulfúrico por 7 e 95 dias.....	53
Figura 5.4 – Concreto submetido ao ciclo de imersão em ácido sulfúrico e secagem.	54
Figura 5.5 – Concretos submetidos ao ataque ácido por 95 dias: (A) ciclo de molhagem e secagem e (B) imersão.	54
Figura 5.6 – Comparação entre a capacidade de proteção da tinta quando submetida a diferentes formas de ataque.	55
Figura 5.7 – Massa dos corpos de prova com e sem proteção, antes e após ataque.	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 3. 1 – Compostos do cimento Portland	5
Tabela 3.2 – Tipo de cimento Portland em função das adições	6
Tabela 3.3 – Classificação dos cimentos pela ASTM.....	7
Tabela 3.4 – Propriedades típicas de rochas utilizadas como agregado.....	8
Tabela 3.5 – Classificação das areias quanto ao módulo de finura.....	10
Tabela 3.6 – Classificação das britas quanto à dimensão dos grãos	10
Tabela 3.7 – Características complementares a avaliação da qualidade do agregado	11
Tabela 3.8 – Efeitos benéficos dos aditivos sobre o concreto	12
Tabela 3.9 – Variáveis que afetam a eficácia dos aditivos.....	13
Tabela 3.10 – Comparação entre a resistência à compressão em CPs cilíndricos/prismáticos.....	15
Tabela 3.11 – Classes de agressividade ambiental	22
Tabela 3.12 – Correspondência entre classe de agressividade ambiental e fator água/cimento (a/c).....	23
Tabela 3.13 – Período mínimo de cura para concretos produzidos com diferentes tipos de cimento.....	26
Tabela 3.14 – Variação dos parâmetros de dosagem.....	30
Tabela 3.15 – Definição dos valores para o desvio padrão S_d	32
Tabela 3.16 – Caracterização de ataques ácidos	33
Tabela 3.17 – Valores limites para a classificação de ambiente de elevada agressividade química.....	34
Tabela 3.18 – Requisitos de desempenho do sistema de proteção	40
Tabela 4.1 – Escala de avaliação das proteções propostas por Amusallam	48
Tabela 5.1 – Estudo comparativo para definição da resistência a 28 dias.	49
Tabela 5.2 – Dosagem do concreto	50
Tabela 5.3 – Variação da absorção e do índice de vazios para concretos produzidos com areias diferentes	50
Tabela 5.4 – Perda de massa do concreto em função da concentração do ácido.....	52
Tabela 5.5 – Avaliação da eficiência da proteção segundo classificação proposta por ALMUSALLAM (2003)	55
Tabela 5.6 – Absorção d'água, o índice de vazios e a massa específica do concreto	56
Tabela 5.7 – Variação da absorção para o ataque por imersão.....	56
Tabela 5.8 – Variação da absorção para o ataque por ciclo de imersão e secagem...	57

Tabela 5.9 – Variação da massa para o ataque por imersão	58
Tabela 5.10 – Variação da massa para o ataque por ciclo de imersão e secagem.....	59
Tabela 5.11 – Avaliação da resistência à compressão antes e após imersão em ácido	60
Tabela 5.12 – Avaliação da resistência à compressão antes e após ciclo de imersão	60
Tabela A13 – Produção dos corpos de prova	69
Tabela A14 – Amostra dos corpos de prova	71
Tabela A15 – Estatística aplicada.....	72

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo avaliar o desempenho de um concreto com proteção epóxi submetido a meio agressivo ácido. Foi produzido um concreto com 35MPa, fator água cimento de 0,50 e aditivo polifuncional. O desempenho da tinta epóxi foi avaliado através da comparação entre um concreto protegido e um concreto sem proteção, antes e após serem submetidos a diferentes graus de agressividade. Foram realizados ensaios de resistência à compressão e de absorção d'água do concreto, por imersão de corpos de prova, assim como foram avaliadas as perdas de massas decorrentes do ataque químico por ácido sulfúrico em concentrações de 2,5 e 3,0%. Os resultados obtidos demonstram que os concretos sem proteção submetidos a ataque tiveram uma perda de resistência maior que 22%, e que com proteção houve uma menor perda de resistência. No que se refere à absorção, a variação foi da ordem de 6,6%, para o concreto sem proteção, e de 2,1%, para o concreto com proteção. As perdas de massa mostram que, para o concreto sem proteção, a perda é da ordem de 4,3%, enquanto que, para o concreto protegido, é de 2,1%. Além do ataque convencional, por imersão em ácido sulfúrico, foi feito um ataque intercalando-se imersão e secagem dos corpos de prova, que causou uma deterioração ao concreto consideravelmente maior que o primeiro. Também nesta segunda situação, o uso da proteção reduziu o impacto do contato com o ácido. A pesquisa realizada permite comprovar a eficiência da proteção epóxi em concretos submetidos a diferentes graus de agressividade.

Palavra-chave: concreto, durabilidade, camada protetora.

ABSTRACT

This work has as objective evaluates the performance of a concrete with epoxy protection submitted to acid aggressive environment. A concrete was produced with 35MPa, water-cement ratio of 0,50 and polifuncional additive. The performance of the epoxy ink, it was evaluated through the comparison between a protected concrete and a concrete without protection, before and after they were submitted to different aggressiveness degrees. Tests of concrete strength compression and water absorption, by immersion of specimens, were made, and, also, the concrete mass losses, owned to sulfuric acid chemical attack, in concentrations of 2,5 and 3,0%, were evaluated. The results demonstrate that concretes without protection, submitted to attack, had a loss of resistance larger than 22% and that, with the protection, the resistance loss was smaller. In what refers to the absorption, the variation was of 6,6%, for the concrete without protection, to 2,1%, for the concrete with protection. The mass losses show that for the concrete without protection the loss is of the order of 4,3%, while, for the protected concrete, it is of 2,1%. Besides the conventional attack, for immersion in sulfuric acid, it was made an attack being inserted immersion and dryness of the specimens, which caused deterioration considerably to the concrete larger than the first. Also in this second situation, the use of the protection reduced the impact of the contact with the acid. The research allows to prove the efficiency of epoxy protection in concretes submitted to different aggressiveness degrees.

Keywords: concrete, durability, surface coating.

1.INTRODUÇÃO

Este trabalho aborda a durabilidade do concreto, visando atender à demanda por estudos que considerem as características do material face à agressividade do meio no qual ele possa estar inserido, em consonância com as questões que vêm sendo colocadas como fundamentais para aumentar a vida útil das estruturas.

Em inúmeros casos, a vida útil das estruturas vem sendo afetada pela elevada agressividade do meio, mesmo para concretos com características satisfatórias de resistência e durabilidade, o que justifica a importância de se proporem estudos de avaliação da eficiência de camada protetora, visando dificultar a penetração de agentes agressivos no concreto.

O uso de tintas industriais na proteção do concreto vem sendo cada vez mais difundido, uma vez que a tinta utilizada como camada protetora forma um filme contínuo de baixa permeabilidade e com uma boa adesão à superfície do concreto.

Neste contexto, este trabalho se propõe a fazer uma avaliação da eficiência da tinta epóxi como camada protetora, em concreto submetido a meio agressivo ácido, verificando o desempenho dessa proteção no aumento da durabilidade do concreto através da redução da absorção de líquidos. Dentro desta proposta, foi feito um estudo comparativo da degradação do concreto submetido a diferentes concentrações de ácido sulfúrico (H_2SO_4), visando avaliar a minimização dos efeitos deste tipo de ataque químico ao concreto.

2.OBJETIVOS

Esta dissertação tem como objetivo principal avaliar o desempenho de camada protetora na durabilidade do concreto submetido a um meio quimicamente agressivo, a partir das seguintes diretrizes:

- Realizar estudos de dosagem visando a produção de um concreto durável, com características de resistência e absorção que atendam aos principais requisitos de durabilidade;
- Avaliar as dosagens realizadas quanto às características de resistência e durabilidade propostas;
- Avaliar a influência dos processos de produção e cura na durabilidade do concreto;
- Verificar a degradação do concreto em função da concentração do ácido sulfúrico e dos processos de ataque propostos;
- Verificar a relação entre a absorção do concreto sua degradação;
- Avaliar o desempenho de camada protetora de tinta epóxi na redução do impacto por ataque com solução ácida, a partir da comparação de concretos com e sem proteção.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O concreto pode ser focado sob diversos aspectos, a partir de seus materiais constituintes, da resistência à compressão e da durabilidade.

Este trabalho aborda a durabilidade do concreto que está diretamente ligada à qualidade dos materiais, ao processo de produção, aos cuidados na utilização e, nos dias de hoje, ao uso de proteções.

Após se constatar diversos problemas, tanto em edificações de concreto novas quanto nas mais antigas, a questão da durabilidade vem sendo estudada em diversos trabalhos, de forma a garantir que as estruturas permaneçam em boas condições de utilização por longos períodos de tempo.

Esta revisão bibliográfica apresenta estudos relevantes à elaboração deste trabalho, abordando conceitos sobre o concreto, seus materiais constituintes, sua estrutura e análise de algumas de suas propriedades como resistência, impermeabilidade e durabilidade. Além disto, é realizada uma abordagem sobre ataques químicos sofridos pelo concreto e sobre as principais formas de aumentar a sua resistência química.

3.1 Concreto e suas propriedades

O concreto, material largamente utilizado na construção civil, é composto essencialmente de um meio contínuo aglomerante formado por uma mistura de cimento hidráulico e água, dentro do qual estão mergulhadas partículas ou fragmentos de agregados. Sua ampla utilização se deve tanto a características que apresenta em estado fresco, como sua trabalhabilidade e consistência - que permitem que o concreto seja moldado nas mais diferentes formas - como a resistência a esforços, que este apresenta quando endurecido (Couto et al 2006; Mehta, 1994).

Para atender às principais condições requeridas de resistência, trabalhabilidade, impermeabilidade e durabilidade, que são propriedades fundamentais do concreto, deve-se, através do estudo de dosagem, encontrar uma proporção "ideal" de seus componentes (Couto et al, 2006; Neville 1997).

3.2 Materiais constituintes do concreto

Para o estudo do concreto e de suas propriedades, faz-se necessário conhecer seus materiais constituintes e algumas de suas propriedades que influem no comportamento final do material.

Cimento Portland

O cimento é um aglomerante hidráulico, que se apresenta como um pó fino de cor cinza e que em contato com a água reage quimicamente, tornando-se primeiramente pastoso. Ao longo do tempo, desenvolve elevada resistência mecânica e durabilidade, à medida que vai secando. Mundialmente, denomina-se este material como cimento Portland devido à semelhança da cor do cimento hidratado com um calcário conhecido como pedra Portland, extraído em Dorset, na Inglaterra (Couto et al, 2006; Neville, 1997).

A fabricação do cimento Portland consiste, essencialmente, no resfriamento e na moagem de um material denominado clínquer. Este, por sua vez, é resultado de um processo de moagem da matéria prima, de sua mistura em devida proporção e da queima em forno rotativo a uma temperatura superior a 1280°C. Uma adição de gesso (CaSO_4) é feita durante a queima do clínquer com o objetivo de retardar as reações de hidratação do cimento, que geralmente ocorrem instantaneamente. As matérias-primas usadas na fabricação de cimento Portland se constituem, principalmente, de calcário, sílica, alumina e óxido de ferro (Neville, 1997).

Os materiais utilizados como matéria prima, quando submetidos à alta temperatura dentro do forno, reagem entre si, dando origem a uma série de produtos complexos que compõem o cimento Portland (Neville, 1997).

Os principais compostos do cimento são mostrados na tabela 3.1.

Tabela 3. 1 – Compostos do cimento Portland

Compostos	Fórmula química	Abrev.	Propriedades específicas decorrentes dos compostos do clínquer
Silicato tricálcico	$3\text{CaO}.\text{SiO}_2$	C_3S	Endurecimento rápido, alto calor de hidratação, alta resistência inicial.
Silicato dicálcico	$2\text{CaO}.\text{SiO}_2$	C_2S	Endurecimento lento, baixo calor de hidratação, baixa resistência inicial.
Aluminato tricálcico	$3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A	Pega muito rápida controlada com adição de gesso, suscetível ao ataque de sulfatos, alto calor de hidratação, alta retração, baixa resistência final.
Ferro aluminato tetracálcico	$4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$ Fe_2O_3	C_4AF	Endurecimento lento, resistente a meios sulfatados, não tem contribuição para resistência, cor escura.
Cal livre	CaO	C	Aceitável somente em pequenas quantidades; em maiores quantidades, causa aumento de volume e fissuras.

Fonte: Couto et al, 2006.

Além destes compostos, no cimento Portland são encontrados compostos secundários, que se apresentam em pequenas proporções, como MgO , TiO_2 , Mn_2O_3 , K_2O e Na_2O . Os dois últimos compostos, os óxidos de sódio e potássio, conhecidos como álcalis do cimento, são considerados importantes no estudo do concreto por serem responsáveis por reações álcalis/agregado, quando em contato com alguns tipos de agregados, resultando em produtos expansivos (Neville, 1997).

Apesar de todo cimento apresentar estes constituintes, os cimentos se diferenciam em relação às suas propriedades, não só pela proporção de seus compostos, mas também por algumas adições, tais como, escória de alto-forno, pozolana, materiais carbonáticos e outros (Couto et al, 2006).

O cuidado na produção do cimento exige, além do controle da proporção dos componentes, um cuidado especial com a moagem do clínquer. Como o processo de hidratação do cimento se dá pelo contato da água com a superfície das partículas, quanto menor forem os grãos do cimento, maior será a velocidade de hidratação e, conseqüentemente, mais rápido se dará o desenvolvimento da resistência mecânica.

Porém, cimentos mais finos geralmente resultam em uma retração elevada e grande tendência à fissuração (Neville, 1997; Mehta, 1994).

Os principais tipos de cimento Portland, normalizados pela ABNT, estão relacionados abaixo, e as diferenças entre eles são mostradas na tabela 3.2:

Tabela 3.2 – Tipo de cimento Portland em função das adições

Tipos de Cimento Portland	Sigla	Composição (% de massa)				Norma Brasileira
		Clínquer	Escória	Pozolana	Mat. carbonáticos	
CP comum	CP I	100	0	0	0	NBR 5732
CP com adição	CP I - S	95 – 99		1 – 5		
CP com escória	CP II - E	56 – 94	6 – 34	-	0 – 10	NBR 11578
CP com pozolana	CP II - Z	76 – 94	-	6 – 14	0 – 10	
CP com filer	CP II - F	90 – 94	-	-	6 – 10	
CP de alto-forno	CP III	25 – 65	35 – 70	-	0 – 5	NBR 5735
CP pozolânico	CP IV	50 – 85	-	15 – 50	0 – 5	NBR 5736
CP de alta resistência inicial	CP V	95 – 100	0	0	0 – 5	NBR 5733

Fonte: NBR 5732; NBR 5733; NBR 5735; NBR 11578.

Além dos tipos de cimento Portland apresentados, são produzidos em menor escala os seguintes tipos de cimento com características especiais:

- Cimento Portland resistente aos sulfatos;
- Cimento Portland branco;
- Cimento Portland de baixo calor de hidratação;
- Cimento para poços petrolíferos.

Internacionalmente, encontramos classificações diferenciadas para os cimentos, sendo a mais conhecida a designação dada pela ASTM (American Society for Testing and Materials, EUA), apresentada na tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Classificação dos cimentos pela ASTM

Denominação Americana	Tipo	Norma Americana	Denominação Brasileira	Tipo
Portland	I	ASTM C 150	Portland Comum	CPI
	–	–	Portland Comum com adição	CPI-S
Slag-Modified Portland	I(SM)	ASTM C 595	Portland Composto com Escória	CP II - E
Pozzolan-Modified Portland	I(MP)		Portland Composto com Pozzolana	CP II - Z
	–	–	Portland Composto com Filler	CP II - F
Portland Blafurmace Slag	IS	ASTM C 595	Portland de Alto Forno	CP III
Portland Pozzolan	IP	ASTM C 595	Portland Pozolânico	CP IV
Portland with High Early Streng	III	ASTM C 150	Portland de Alta Resistência Inicial	CP V
Portland with Moderate Sulfate Resistance	II	ASTM C 150		
Portland with High Sulfate Resistance	V	ASTM C 150		
Slag Modified Portland - Moderate Sulfate Resistance	I(SM) MS	ASTM C 595		
Pozzolan-Modified Portland - Moderate Sulfate Resistance	I(PM) MS	ASTM C 595		
Portland Blafurmace Slag - Moderate Sulfate Resistance	IS(MS)	ASTM C 595		
Portland Pozzolan - Moderate Sulfate Resistance	IP(MS)	ASTM C 595		

Fonte: Mehta, 1994.

Agregados

Responsáveis por aproximadamente 70% do volume total do concreto, os agregados, tais como areias e britas, possuem uma considerável importância para as características do produto final e devem ser inertes, ou seja, não devem provocar reações indesejáveis.

Segundo NEVILLE (1997), a utilização do agregado confere características extremamente vantajosas ao concreto, que passa a ter maior estabilidade dimensional e maior durabilidade em relação à pasta de cimento pura, além de reduzir a quantidade de cimento e, por consequência, o custo final da estrutura. O uso do agregado na produção do concreto ainda contribui para menor retração da pasta e maior resistência ao desgaste superficial das peças (Couto et al, 2006).

A resistência do agregado aos esforços mecânicos deve ser pelo menos superior à da pasta de cimento para que não se rompa primeiro, sendo seu valor bastante influenciado pela porosidade de seus grãos. Os agregados naturais utilizados na produção do concreto normal são geralmente densos e resistentes, apresentando características como as mostradas na tabela 3.4 e sendo raramente um fator limitante da resistência final do concreto (Couto et al, 2006; Mehta, 1994; Isaia, 2005).

Tabela 3.4 – Propriedades típicas de rochas utilizadas como agregado

Tipo de Rocha	Resistência à compressão (MPa)			Absorção (%)	Massa específica (Kg/m ³)	Módulo de Deformação (GPa)
	Mínima	Média	Máxima			
Granito	100	150	240	0,1 a 0,8	2600 / 2700	40 / 70
Basalto compacto	180	220	280	0,1 a 0,6	2750 / 2950	60 / 100
Gnaisse	100	150	240	0,2 a 0,8	2550 / 2700	40 / 70
Calcário	90	120	200	0,2 a 4,5	2600 / 2800	30 / 50
Xisto	100	120	180	1,2 a 4,5	2300 / 2500	25 / 40
Quartzito	130	260	400	0,1 a 0,8	2550 / 2700	50 / 100
Arenito	50	70	150	1,2 a 8,5	2200 / 2400	20 / 40

Fonte: Isaia, 2005

As principais bibliografias apresentam algumas características dos agregados que são importantes para a tecnologia do concreto, uma vez que influenciam suas

propriedades desde seu processo de produção até o fim de sua vida útil. No estudo de dosagem, a massa específica, a composição granulométrica e o teor de umidade dos agregados já devem estar determinados. Algumas das propriedades do concreto fresco são diretamente afetadas pela porosidade ou pela massa específica, tais como a composição granulométrica, a forma e a textura superficial dos agregados. A composição mineralógica do agregado e sua porosidade influenciam na resistência, na dureza e no módulo de elasticidade do concreto, que afetam seu comportamento quando endurecido (Mehta, 1994).

A correta especificação do agregado demanda o conhecimento de algumas de suas propriedades, tipos e origem. Em relação à origem e/ou forma de obtenção, os agregados são classificados como:

- Naturais, como areia de rio, pedregulhos e outros materiais já encontrados na natureza prontos para serem utilizados, sendo normalmente apenas lavados;
- Britados, como a pedra britada, pedregulho britado e outros materiais que sofrem um processo de britagem para adquirirem a forma e as dimensões ideais para sua utilização no concreto;
- Artificiais, que são os agregados derivados de processos industriais, como a argila expandida, o folhelho expandido por tratamento térmico, a vermiculita expandida e outros;
- Reciclados, que podem ser tanto resíduos industriais granulares com características adequadas para o uso como agregado, como a escória de alto-forno, até entulhos de construção ou demolição selecionados para esta aplicação.

Os agregados são ainda classificados quanto à sua composição granulométrica, que expressa a proporção dos grãos de diferentes tamanhos que os compõem. Esta é obtida através de um ensaio laboratorial normatizado pela ABNT, que consiste no levantamento da massa dos grãos retidos em cada uma das peneiras da série. A granulometria do agregado tem influência direta sobre algumas das propriedades do concreto tanto fresco quanto endurecido, destacando-se a trabalhabilidade, a resistência aos esforços mecânicos e a sua compacidade (Couto et al, 2006).

Além de mostrar as faixas de granulometria, este ensaio permite definir outras duas propriedades do agregado de extrema relevância no estudo de dosagem do concreto: a dimensão máxima característica e o módulo de finura.

A dimensão característica corresponde à abertura de malha quadrada, em mm, que retém uma porcentagem acumulada igual ou imediatamente inferior a 5% em massa (Couto et al, 2006).

Já o Módulo de Finura (MF) é utilizado na classificação dos agregados miúdos, conforme tabela 3.5, e corresponde à soma das porcentagens retidas acumuladas em massa de agregado, nas peneiras da série normal, dividida por 100 (Couto et al, 2006).

Tabela 3.5 – Classificação das areias quanto ao módulo de finura

Tipos	Módulo de Finura - MF
Areia grossa	MF > 3,3
Areia média	2,4 < MF < 3,3
Areia fina	MF < 2,4

Fonte: Couto et al, 2006.

As britas são classificadas segundo faixas determinadas na série de peneiras conforme mostrado na tabela 3.6.

Tabela 3.6 – Classificação das britas quanto à dimensão dos grãos

Classificação	Peneiras Normalizadas
Brita 0	4,8 – 9,5mm
Brita 1	9,5 – 19,0mm
Brita 2	19,0 – 25,0mm
Brita 3	25,0 – 38,0mm
Brita 4	38,0 – 64,0mm
Pedra de mão	> 76mm

Fonte: Couto et al, 2006.

Além destes parâmetros, outras características podem ser avaliadas a fim de garantir a qualidade dos agregados, tabela 3.7

Tabela 3.7 – Características complementares a avaliação da qualidade do agregado

Característica	Descrição	Norma
Massa Unitária	Definida como a massa das partículas do agregado que ocupam uma unidade de volume.	NBR 7251
Massa Específica	É a massa do material por unidade de volume, incluindo os poros internos das partículas.	NBR 9776
Torrões de Argila	Os agregados têm um limite estabelecido por norma para a porcentagem em massa de teores de argila sob a forma de torrões. A argila cobre os grãos do agregado e prejudica a aderência com a pasta de cimento	NBR 7218
Materiais Pulverulentos	Limitados por normas os materiais pulverulentos são partículas menores que 0,075mm.	NBR 7219
Impurezas Orgânicas	Deteção de substâncias orgânicas, normalmente de origem vegetal, que afetam a qualidade do concreto.	NBR 7221

Fonte: Couto et al, 2006; Mehta, 1994;

Aditivos

A norma brasileira (NBR 1763/92 – Aditivos para concreto de cimento Portland) define aditivos como produtos adicionados ao concreto em pequenas quantidades que modificam algumas de suas propriedades, no sentido de melhor adequar o concreto a determinadas condições.

A norma européia EM 934 de 2001 define que a quantidade de aditivo no concreto deve ser inferior a 5% relativa à massa do cimento. (Isaia, 2005).

Dentre os diversos tipos de aditivos, os mais utilizados visam retardar ou acelerar o tempo de pega, reduzir a exsudação e a segregação, retardar a taxa de evolução do calor de hidratação, acelerar a velocidade de desenvolvimento da resistência nas primeiras idades, aumentar a plasticidade do concreto sem aumentar a quantidade de água, assim como o aumento da durabilidade em determinadas condições específicas de exposição. A tabela 3.8 apresenta os diversos efeitos nas propriedades do concreto do uso de aditivos.

Tabela 3.8 – Efeitos benéficos dos aditivos sobre o concreto

Propriedades do Concreto	Aditivos – Adições Tipos	Categoria
Trabalhabilidade	- Redutores de água; ▪ Fluidificantes, superfluidificantes, etc.	Químico
	- Incorporadores de Ar;	Químico
	- Plastificantes: - Polímeros	Mineral Químico
Tempo de Pega	- Aceleradores	Químico
	- Retardadores	Químico
Resistências Mecânicas	- Redutores de água	Químico
	- Plastificantes	Mineral
	- Modificadores de pega	Químico
	- Geradores de ar	Químico
	- Polímeros	Químico
Durabilidade	- Protetores contra as geadas	Químico
	- Incorporadores de ar ▪ Fluidificantes ▪ Superfluidificantes	Químico
	- Aceleradores de pega	Químico
	- Aceleradores de endurecimento	Químico
	- Anti-congelantes	Químico
	- Impermeabilizantes	Químico + Outros
	- Inibidores de corrosão de armaduras	Químico
	- Inibidores de reação álcalis-agregados	Químico + Outros
	- Polímeros (látex)	Químico
Argamassas ou Pastas Especiais	- Geradores de expansão	Químico + Outros
	- Formadores de gás – espuma, etc.	Químico + Outros
	- Aditivos para injeções	Químico
	- Aditivos para bombear	Químico + Outros
	- Aditivos para concreto e argamassa projetada	Químico
	- Corantes	Químico
	- Polímeros (látex)	Químico

Fonte: Isaia, 2005.

Para que um aditivo atenda a finalidade proposta, deve-se ter um cuidado especial com a quantidade utilizada, uma vez que a eficácia do efeito depende da escolha e da quantidade do aditivo, conforme mostrado na tabela 3.9. Como exemplo, o tipo de cimento utilizado uma vez que aditivos redutores de água são menos eficazes para cimentos com alto conteúdo de C_3A .

Tabela 3.9 – Variáveis que afetam a eficácia dos aditivos

Variáveis	Características a serem levantadas
Cimento	Tipo de cimento e quantidade; Composição do clínquer, especialmente conteúdo de C_3A e C_3S ; Adições: classe, características (composição química e/ou estrutural, finura, forma, etc.) e quantidade; Conteúdo de compostos alcalinos Quantidade de gesso; Finura; Quantidade de cimento;
Agregados	Tipo Características: diâmetro máximo, granulometria e conteúdos de finos, porosidade e forma, etc.
Outros	Fatores que afetam a cinética da hidratação do cimento (Exemplo: Temperatura, condições seguidas para realizar a mistura, etc.)

Fonte: Isaia, 2005; Couto et al, 2006.

Adições

A incorporação de adições minerais ao concreto, seja na produção do concreto ou no processo de fabricação do cimento, em geral, resulta na melhoria das características do produto final, por modificar a estrutura interna da pasta de cimento. O uso de adições, em geral, tem como objetivo reduzir a porosidade capilar do concreto e, em alguns casos, proporcionar um ganho de resistência, além de diminuir o calor de hidratação e, por consequência, reduzir as fissuras de origem térmica (Neville 1997; Isaia, 2005).

A incorporação de adições minerais no cimento, substituindo parte do clínquer, contribui na diminuição do impacto da construção civil e de outras indústrias sobre o meio ambiente, ao reduzir o volume de extração de matéria-prima e ao utilizar grandes quantidades de resíduos que seriam descartados.

As adições minerais são comumente classificadas conforme sua ação físico-química em:

- a) Material pozolânico, definido pela NBR 12653 (1992) como um material silicoso ou sílico-aluminoso finamente moído, que, na presença de água, reage quimicamente com o hidróxido de cálcio, resultando em compostos com propriedades cimentantes. Os materiais pozolânicos podem ser naturais ou artificiais como a sílica ativa, a casca de arroz e o metacaulim;
- b) Material cimentante é um material que forma produtos cimentantes, como o C-S-H, sem necessariamente ter que entrar em contato com o do hidróxido de cálcio presente no cimento Portland, como, por exemplo, a escória granulada de alto-forno;
- c) Fíler, material finamente dividido que não apresenta nenhuma atividade química, contribuindo na continuidade granulométrica servindo como pontos de nucleação para a hidratação dos grãos de cimento.

3.3 Resistência à compressão

A resistência à compressão, considerada como a propriedade fundamental do concreto, pode ser definida como a capacidade do material de suportar ações aplicadas sem que entre em colapso e é utilizada como parâmetro que indica a qualidade do concreto, por estar diretamente relacionada com a estrutura da pasta de cimento endurecida (Neville, 1982; Isaia, 2005). O valor da resistência obtida depende não só das características do concreto, mas também do tipo de ensaio à compressão.

Ensaio de resistência à compressão

A resistência à compressão é usualmente determinada por meio de solicitação monoaxial em um ensaio de curta duração, sendo o resultado influenciado pelo tamanho e pela forma dos corpos de prova (Leonhardt, 1977). Os dois tipos de corpos de prova mais utilizados são:

- Cilindros padronizados: Brasil, França, Estados Unidos e Canadá;
- Prismáticos: Alemanha, Inglaterra e outros países.

É possível fazer uma correlação entre as resistências à compressão obtidas em corpos de prova cilíndricos e prismáticos, tabela 3.10. Pode-se observar uma maior proximidade entre os resultados para os valores de resistência da ordem de 50MPa.

Tabela 3.10 – Comparação entre a resistência à compressão em CPs cilíndricos/prismáticos

Resistência à compressão (MPa)		Relação entre resistências cilíndricos/ prismáticos
Prismáticos	Cilindros	
9,0	6,9	0,77
15,2	11,7	0,77
20,0	15,2	0,76
24,8	20,0	0,81
27,6	24,1	0,87
29,0	26,2	0,91
29,6	26,9	0,91
35,8	31,7	0,89
36,5	34,5	0,94
42,1	36,5	0,87
44,1	40,7	0,92
48,3	44,1	0,91
52,4	50,3	0,96

Fonte: Neville, 1982.

Os corpos de prova cilíndricos são mais utilizados em pesquisas por apresentarem maior uniformidade de resultados para um mesmo concreto, comparativamente aos corpos de prova cúbicos, uma vez que a ruptura sofre uma menor influência de efeitos como, por exemplo, a restrição dos pratos da prensa, que impedem que ocorra uma deformação transversal do corpo de prova (figura 3.1). Além disto, os corpos de prova cilíndricos proporcionam uma maior uniformidade da distribuição das tensões no plano horizontal (Leonhardt, 1977; Neville, 1982).

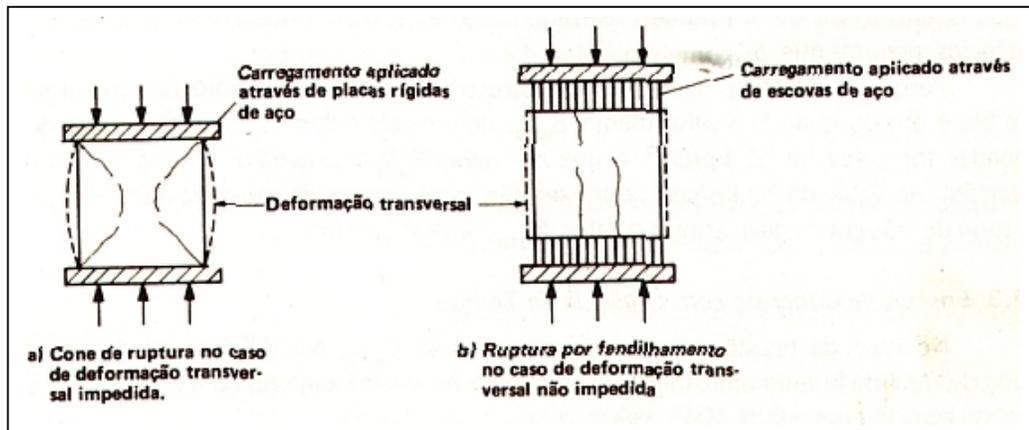


Figura 3.1 – Efeito de restrição dos pratos da prensa na ruptura do corpo de prova (Leonhardt, 1977)

As dimensões dos corpos de prova cilíndricos são 15x30cm, 10x20cm para concreto e 5x10cm para argamassas, sendo mantida uma relação altura/diâmetro (h/d) igual a 2. A relação h/d igual a 2 reduz a distorção dos resultados que pode ser causada por irregularidades nas superfícies dos topos, proporcionando uma região de compressão uniaxial no interior do corpo de prova e reduzindo a influência de um pequeno desalinhamento entre o centro do corpo de prova e o centro da prensa (Leonhardt, 1977; Neville, 1982).

A figura 3.2 apresenta a influência da variação da relação altura/diâmetro do corpo de prova cilíndrico na resistência.

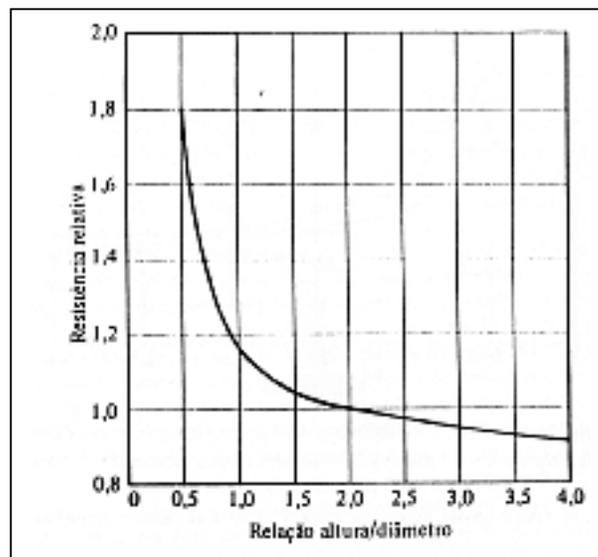


Figura 3.2 – Influência da relação altura/diâmetro do corpo de prova cilíndrico na resistência (Neville, 1997)

Para valores inferiores que a 1,5, a resistência obtida aumenta rapidamente devido à restrição do efeito de topo sobre o elemento. Já para valores de h/d superiores a 5, observa-se uma redução brusca da resistência devido ao efeito da esbeltez (Leonhardt, 1977; Mehta, 1994; Neville, 1982).

Outro fator que influencia os resultados obtidos pelo ensaio de compressão é a umidade do concreto, que deve estar de preferência seco na ocasião. (Mehta, 1994; Neville, 1982).

Características do Concreto

A figura 3.3 apresenta os diversos fatores que influenciam a resistência à compressão do concreto, sendo estes divididos em três grandes grupos: relativos aos corpos de prova, características do concreto e características do ensaio de resistência e idade do concreto.

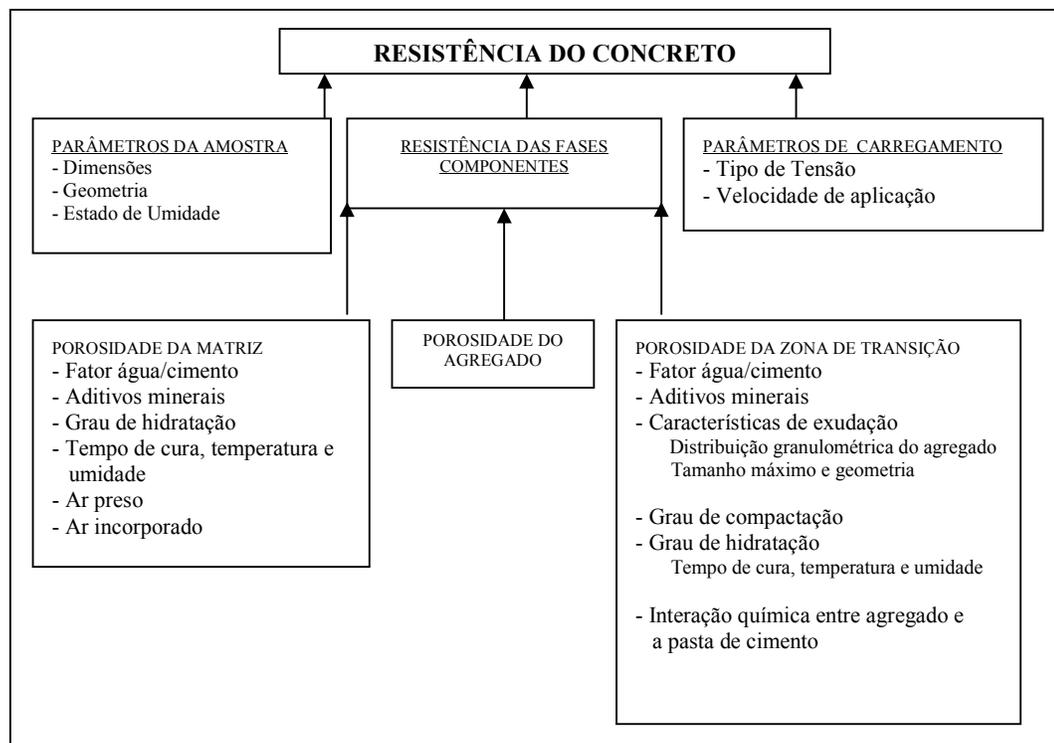


Figura 3.3 – Fatores que influenciam a resistência do concreto (Mehta, 1994)

No concreto, a resistência é resultado da forte ligação entre a matriz (material ligante e areia) e o agregado graúdo. Esta ligação ocorre devido à propriedade de alguns produtos da hidratação do cimento Portland, como os pequenos cristais de C-S-H, de sulfoaluminatos de cálcio hidratados e de aluminatos de cálcio hidratados, de se

aderirem fortemente, não somente uns aos outros, mas também a sólidos de área específica baixa, tais como o hidróxido de cálcio, grãos de clínquer anidro e partículas de agregado miúdo e graúdo (Mehta, 1994).

A resistência da matriz como de qualquer outro sólido é influenciada pelo volume total de vazios: ar aprisionado, poros capilares, poros de gel e ar incorporado. O concreto, quando corretamente produzido e curado, apresenta um valor de resistência no tempo, que depende principalmente da relação água-cimento e de sua porosidade. Admite-se que, para um concreto corretamente adensado, a resistência é inversamente proporcional à relação água/cimento, conforme mostrado na figura 3.4. A relação água/cimento-resistência no concreto pode ser facilmente entendida como uma consequência natural do progressivo enfraquecimento da matriz, devido ao aumento da porosidade resultante do aumento do fator água/cimento. (Mehta, 1994; Neville, 1997).

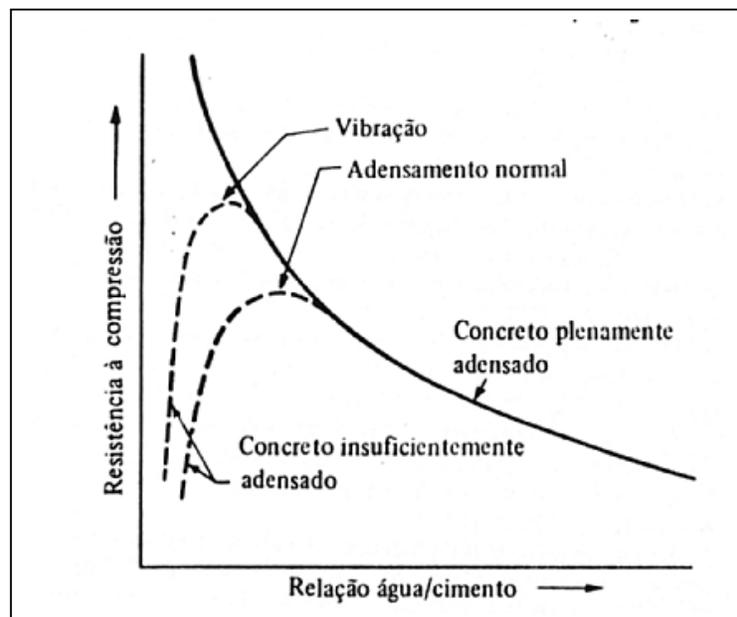


Figura 3.4 – Resistência em função da relação água/cimento do concreto (Neville, 1997)

A influência do fator água/cimento foi estabelecida através da lei de Abrams, resultado de uma extensa pesquisa feita em 1918 na Universidade de Illinois nos Estados Unidos, que considera que para um concreto plenamente adensado a sua resistência é inversamente proporcional à relação água/cimento segundo a fórmula abaixo:

$$f_c = \frac{K_1}{K_2^{a/c}} \quad (1)$$

Onde, f_c representa a resistência do concreto; a/c , a relação água/cimento (originalmente em volume) e K_1 e K_2 , constantes empíricas.

Além do fator água/cimento, quanto maior for a quantidade de cimento, maior será a probabilidade de hidratação, produzindo mais gel e reduzindo os vazios no concreto (Mehta, 1994).

Para se obter um ganho de resistência, além do aumento da quantidade de cimento, pode-se utilizar cimentos com adições, uma vez que o emprego destes materiais resulta num processo de refinamento dos poros e dos cristais presentes na pasta de cimento, gerando um aumento da resistência tanto da matriz quanto da zona de transição (Isaia, 2005).

Além destes parâmetros citados, a existência de microfissuras na interface entre a argamassa de cimento e os agregados graúdos, também afeta o valor final da resistência do concreto. Quando o concreto está submetido a uma carga equivalente ao intervalo de 70 a 90% de sua resistência final, as fissuras se abrem através da pasta e a ruptura do material pode ocorrer antes que a resistência esperada seja atingida (Neville, 1997).

Evolução da Resistência em função da idade do Concreto

A resistência do concreto aumenta com o tempo, em função da velocidade de formação dos produtos da hidratação do cimento e da relação água/cimento. Cada tipo de cimento, devido à proporção de seus compostos químicos, apresenta diferentes tempos de evolução da resistência. Como exemplo, pode-se citar o cimento CP V-ARI, que contém uma maior proporção de C_3S e menor índice de finura, desenvolvendo em consequência mais rapidamente a resistência à compressão. No que se refere ao fator

água/cimento, a figura 3.5 permite verificar um maior aumento percentual da resistência à compressão em diferentes idades do concreto em função do fator água-cimento (Helene, 1992; Neville, 1997).

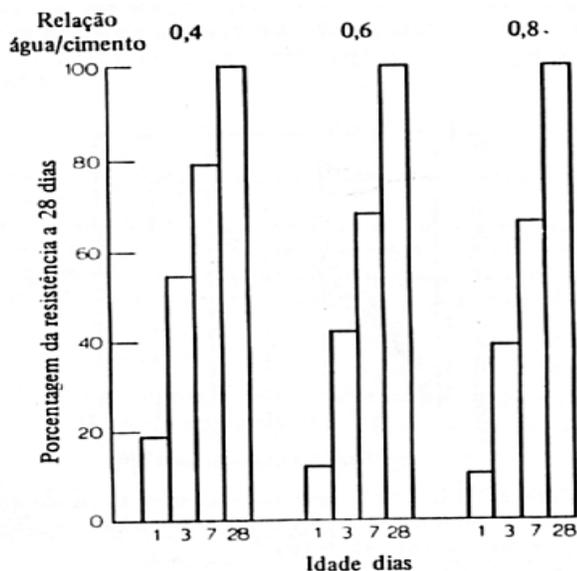


Figura 3.5 – Variação da resistência em função da idade do concreto (Neville, 1997)

Usualmente adota-se como parâmetro para projetos estruturais e para pesquisas técnico-científicas a resistência à compressão a 28 dias de idade.

3.4 Durabilidade do concreto

Segundo o comitê 2001 do ACI, durabilidade do concreto de cimento Portland é definida como a sua capacidade de resistir à ação das intempéries, ataques químicos, abrasão ou qualquer outro processo de deterioração, isto é, o concreto durável conservará a sua forma original, qualidade e capacidade de utilização quando exposto ao seu meio ambiente (Mehta, 1994).

Um concreto para ser considerado durável deve ter uma resistência à compressão superior à solicitação a que estiver submetido e uma alta impermeabilidade (Mehta, 1994; Neville, 1997). Para que estas características sejam obtidas, é necessário que no estudo de dosagem sejam adotadas algumas diretrizes como a utilização de um

alto consumo de cimento e um baixo fator água/cimento. Além disto, é necessário um cuidado na qualidade dos componentes do concreto, e durante todo o processo produtivo que consiste na produção propriamente dita, no transporte, lançamento, adensamento e cura (Neville, 1997)

O uso de adições minerais contribui para o aumento da durabilidade, devido à reação destes materiais com o hidróxido de cálcio resultante da hidratação do cimento, gerando silicatos e sílico-aluminatos de cálcio hidratado, que acabam se precipitando nos vazios maiores da pasta endurecida, como os canais capilares, reduzindo a penetração de substâncias agressivas. Além da redução da permeabilidade e da absorção, as reações entre os produtos do cimento e as adições resultam na substituição de um composto solúvel (hidróxido de cálcio) por um composto mais estável e resistente (Isaia, 2005).

As deteriorações causadas pelo meio podem ser separadas em físicas, como o desgaste superficial, fissuras causadas pela pressão de cristalização de sais nos poros e exposição a temperaturas extremas, e químicas, que incluem a lixiviação da pasta de cimento por soluções ácidas, reações expansivas envolvendo o ataque por sulfatos e corrosão das armaduras. A extensão da deterioração causada pelo meio depende basicamente das características do ambiente e da qualidade do concreto, embora se reconheça que, em condições extremas, qualquer concreto não protegido pode se deteriorar (Mehta, 1994; Neville, 1997).

A ausência de durabilidade pode ser relacionada às condições a que o concreto está submetido e a causas internas inerentes ao próprio concreto. (Neville, 1997).

A forma como o concreto se comporta, quando submetido a um meio agressivo, depende principalmente de suas características e propriedades. Assim, o grau de deterioração de um concreto é influenciado pela capacidade deste material em impedir que a solução agressiva penetre por sua superfície, de modo que, para ser mais durável, um concreto deve ser o mais impermeável possível. Considera-se então que a permeabilidade é uma das propriedades mais importantes no estudo da durabilidade do concreto, pois esta determina a vulnerabilidade do concreto aos agentes externos (Neville, 1997).

Na maioria dos ataques sofridos pelo concreto em que ocorre a penetração de solução, a permeabilidade pode e deve ser adotada como medida na avaliação da durabilidade. Porém em ataques por soluções ácidas, a permeabilidade do concreto pode ser considerada de pouca importância na velocidade e intensidade das deteriorações, uma vez que a ação deste tipo de agente agressivo destrói a intrincada rede de poros. Assim, para casos em que a estrutura de concreto está em contato com soluções ácidas, recomenda-se utilizar a avaliação da absorção capilar (Repetto, 1998).

3.4.1 Abordagem da durabilidade pela normalização brasileira

Com a evolução tecnológica e a necessidade de se produzirem estruturas de concreto duráveis, além de diversas pesquisas, normas de concreto foram desenvolvidas ou atualizadas em diversos países de forma a abordar o tema. No Brasil, a norma NBR 6118: 2003 – Projeto de estruturas de concreto aborda diversos aspectos importantes na durabilidade do concreto.

A NBR 6118 ou nova NB-1 considera que as estruturas de concreto devem ser projetadas e construídas visando não só a atenderem os critérios de resistência, mas também os de durabilidade, levando em conta as condições ambientais em que os elementos estão inseridos.

Dentro da avaliação da agressividade ambiental, esta norma classifica o ambiente em que o concreto vai estar inserido em quatro classes diferenciadas pelo impacto na durabilidade da estrutura, conforme mostrada na tabela 3.3.

Tabela 3.11 – Classes de agressividade ambiental

Classe de agressividade	Agressividade	Classificação geral do tipo de ambiente para efeito de projeto	Risco de Deterioração da estrutura
I	Fraca	Rural	Insignificante
		Submersa	
II	Média	Urbana ^{1),2)}	Pequeno
III	Forte	Marinha ¹⁾	Grande
		Industrial ^{1),2)}	
IV	Muito Forte	Industrial ^{1),3)}	Elevado
		Respingo de Maré	

Fonte: NB-1, 2003.

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

Além de classificar os ambientes, a norma apresenta algumas medidas que buscam garantir a durabilidade dos elementos de concreto para cada meio analisado, como os valores mínimos para o fator água/cimento e as classes de concreto quanto à resistência.

Tabela 3.12 – Correspondência entre classe de agressividade ambiental e fator água/cimento (a/c)

Concreto	Classe de Agressividade				
	Tipo	I	II	III	IV
Relação a/c Em massa	Concreto Armado	≤0,65	≤0,60	≤0,55	≤0,45
	Concreto Protendido	≤0,60	≤0,55	≤0,50	≤0,45
Classe de Concreto (NBR 8953)	Concreto Armado	≥C20	≥C25	≥C30	≥C40
	Concreto Protendido	≥C25	≥C30	≥C35	≥C40

Fonte: NB-1, 2003.

3.4.2 Papel da cura na durabilidade do concreto

A cura do concreto é um conjunto de procedimentos adotados para impedir perda de água muito acelerada por parte da massa, de forma a manter o concreto saturado, ou o mais próximo possível dessa condição, para promover uma maior hidratação dos componentes do cimento (Neville, 1997). Os cuidados na cura do concreto têm como objetivo proporcionar condições físicas e químicas para a constituição da matriz do cimento, já que a variação das condições de umidade e temperatura influenciam significativamente todas as propriedades do material (Ferreira, 2007).

Uma cura bem feita torna-se cada vez mais importante à medida que se objetiva concretos de maiores resistências e maior durabilidade, empregando-se cimentos mais finos e com diversas adições minerais como a escória de alto-forno, materiais

pozolânicos, cinzas volantes que não desenvolvem plenamente suas propriedades aglomerantes se não houver a presença de água (Ferreira, 2007).

Após o lançamento, encontra-se na massa de concreto uma quantidade de água livre que pode ter sido colocada em excesso ou que ainda não tenha reagido com o cimento. Esta água tende a se desprender da massa através de difusão interna e evaporação superficial. Porém, a velocidade de evaporação é geralmente muito maior do que a velocidade de difusão, o que faz com que o concreto seque primeiramente na superfície, resultando em uma retração por secagem (Isaia, 2005). Esta retração ocorre porque, mantendo-se o núcleo do concreto úmido, ou seja, sem alteração volumétrica, desenvolvem-se tensões de compressão nesse núcleo e tensões de tração na capa da peça, resultando no aparecimento de microfissuras que permitem a penetração de água e facilitam a entrada de agentes agressivos (Ferreira, 2007).

A perda de água por evaporação deve ser evitada por pelo menos nos primeiros 7 dias, período que em geral ocorre de 50 a 70% da retração total, contados a partir do lançamento, seja molhando continuamente a superfície da peça, ou por submersão do concreto, também conhecido como cura úmida (Couto et al, 2006).

O emprego da cura úmida proporciona uma boa condição para que as reações de hidratação aconteçam, resultando em concretos com maior resistência, seja pela diminuição de espaços vazios ou pela redução das microfissurações por secagem, e uma maior durabilidade pela redução da porosidade. As diferenças de resistências alcançadas pelo concreto curado por imersão (cura úmida), em relação a um concreto curado continuamente ao ar, pode ser até três vezes maior como mostrado na figura 3.6 (Isaia, 2005).

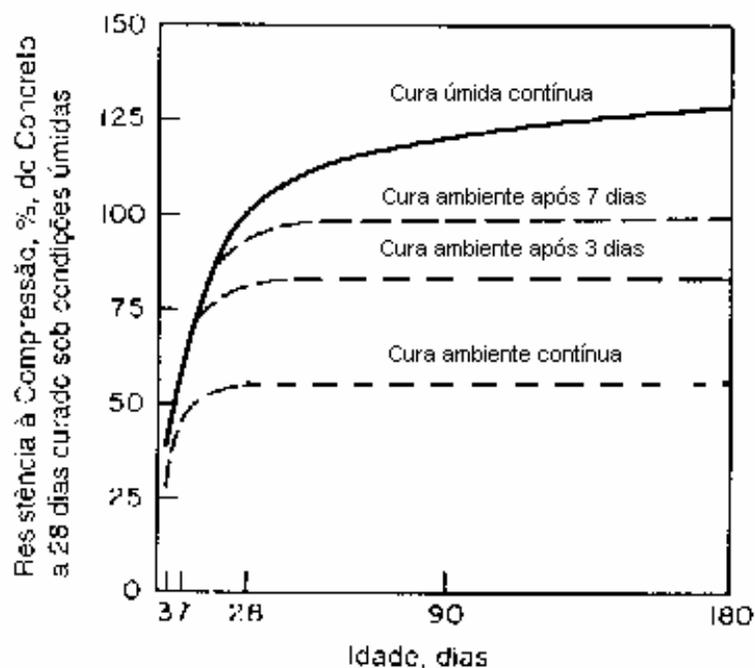


Figura 3.6 – Influência da cura úmida sobre a resistência do concreto (Mehta, 1994).

A cura úmida deve ser feita logo após o início da hidratação do cimento, que para um concreto sem aditivos aceleradores de pega é da ordem de duas a três horas após o lançamento. O tempo de cura mínimo é de 7 dias, porém, quanto maior for este prazo, melhores são as condições de formação dos cristais e mais refinada a estrutura interna, acarretando maior resistência e durabilidade (Ferreira, 2007). O período de cura deve ser definido conforme os itens listados abaixo:

- Coeficiente de forma da peça (relação volume/área exposta);
- Tipo de cimento;
- Relação água/cimento;
- Condições climáticas.

Em função do tipo de cimento e da relação a/c, são recomendados períodos mínimos de cura de acordo com a tabela 3.13.

Tabela 3.13 – Período mínimo de cura para concretos produzidos com diferentes tipos de cimento

Tipos de Cimento	Período mínimo de cura (dias) para fatores água/cimento			
	0,35	0,55	0,65	0,70
CP I e CP II - 32	2	3	7	10
CP IV 32 (POZ)	2	3	7	10
CP III 32 (AF)	2	5	7	10
CP I e CP II – 40	2	3	5	5
CP V (ARI)	2	3	5	5

Fonte: Ferreira, 2007.

A figura 3.7 permite comparar o efeito do tipo de cura sobre concretos produzidos com dois tipos diferentes de cimento e mesmo fator água/cimento. Observa-se que quanto melhor o processo de cura utilizado, maior a resistência à compressão a 28 dias.

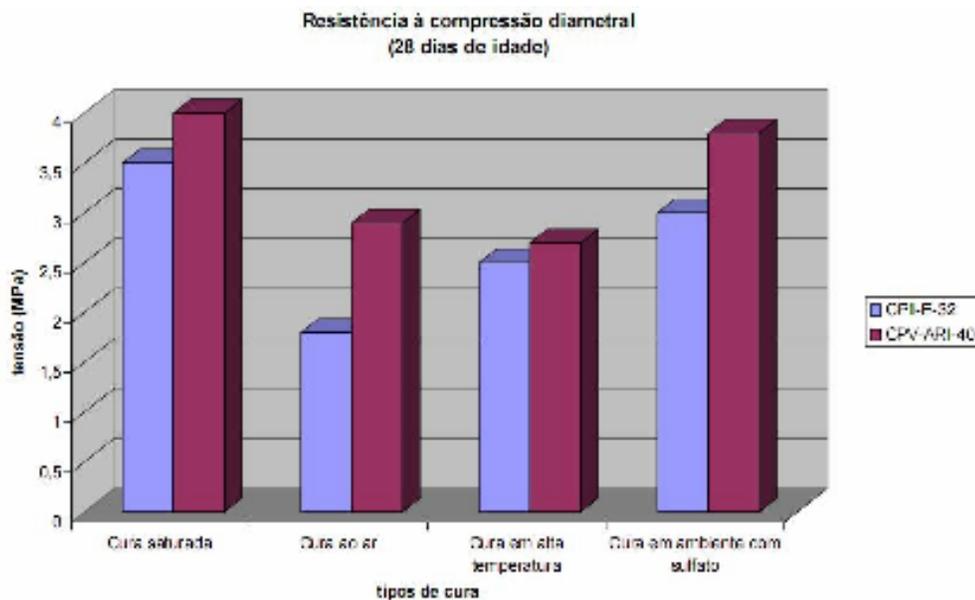


Figura 3.7 – Influência do tipo de cura na resistência à compressão (Ferreira, 2007)

3.5 Permeabilidade e Absorção

A avaliação do desempenho do concreto quanto à sua capacidade de impedir a penetração de agentes agressivos, reduzindo o efeito destes agentes aos constituintes do concreto e às armaduras, tem se mostrado cada vez mais importante nos estudos de durabilidade.

A penetração dos agentes químicos depende da porosidade do concreto, isto é, do diâmetro dos poros, e da distribuição e da continuidade entre eles. Esta entrada de substâncias agressivas é governada pela taxa de penetração de água, como meio de transporte, que se dá principalmente por mecanismos de absorção capilar, permeabilidade e difusão, podendo ainda ocorrer migração iônica no caso da penetração de cloretos (Sato, 2000).

3.5.1 Permeabilidade

Método largamente utilizado na avaliação da durabilidade de estruturas, a permeabilidade é a medida do fluxo de um líquido sob pressão em materiais saturados e determina a vulnerabilidade do concreto a penetração de agentes externos (Neville, 1997; Mehta, 1994).

3.5.2 A absorção

Absorção é a medida do fluxo de um líquido em materiais não saturados através da avaliação do volume ocupado pelos poros do concreto.

O ensaio, normalizado pela NBR 9778/87, consiste em determinar a massa dos corpos de prova quando estes estão secos e quando saturados de água. Os corpos de prova moldados devem estar isentos de óleo ou outros materiais na moldagem. O valor da absorção é dado pela expressão:

$$Absorção = \frac{M_{sat} - M_s}{M_s} \times 100 \quad (2)$$

M_{sat} = massa do corpo de prova saturado

M_s = massa do corpo de prova seco em estufa

A redução da porosidade e por conseqüência da absorção capilar não depende somente da composição do concreto, mas, também, das condições de exposição e de cura. Segundo SATO (2000), nos concretos curados ao ar, observa-se que a porosidade varia com a distância em relação à superfície exposta, devido às alterações no grau de hidratação, conseqüentes ao gradiente de umidade que existe nesta região em função do transporte de umidade que ocorre entre o material e o meio externo.

O estudo feito por CAMARINI (1999) mostra que a cura afeta significativamente as condições de superfície do concreto. A figura 3.8 apresenta os resultados de absorção capilar para um mesmo concreto em várias condições de cura, evidenciando que a absorção é mais acentuada para concretos não curados, para uma mesma temperatura. A 20°C, a quantidade de água absorvida dobra (C2 e C3) e a 40°C há um aumento de 57% na quantidade de água absorvida (C4 e C5). Além disso, os resultados indicam que, ao manter a umidade relativa do ar, o aumento de temperatura provoca também um aumento da penetração de água, mesmo quando for feita uma cura até os 7 dias de idade. Observa-se neste caso que há um aumento de 60% na quantidade de água absorvida (C2 e C5). Se a cura não for realizada, a diferença cai para 25% (C3 e C4).

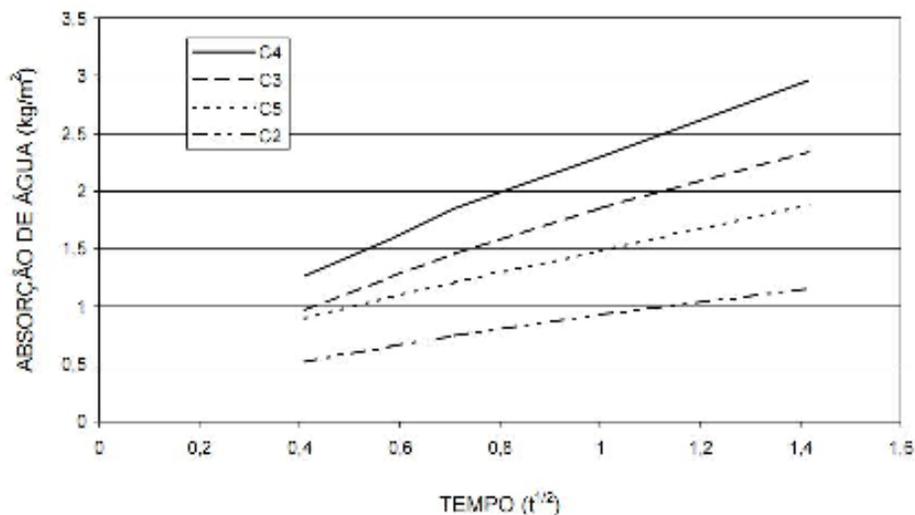


Figura 3.8 – Variação da absorção em função do tempo em que o corpo de prova fica submetido a um tipo de cura (Camarini, 1999)

É importante destacar que, para o estudo da durabilidade, o ensaio de absorção se mostra, em muitos casos, mais interessante do que a determinação da permeabilidade propriamente dita, já que permite a determinação das condições da porosidade capilar da superfície do concreto, que é o caminho preferencial da penetração de gases e líquidos. Na maioria dos casos, o processo de penetração dos agentes agressivos ocorre em estruturas onde o concreto se encontra em uma condição não saturada (Sato, 2000).

O ensaio de absorção permite a obtenção de resultados em um curto período de tempo, não exigindo equipamentos complexos, além de ser um importante indicativo da durabilidade superficial do concreto, uma vez que a velocidade de penetração da água por capilaridade é mais elevada do que no ensaio de permeabilidade (Sato, 2000).

No estudo de concretos submetidos a ciclos de imersão e secagem, por se tratar de transporte d'água em vazios não saturados, a absorção capilar pode ter grande influência no transporte de água no interior das estruturas. (Moreira, 2001)

3.6 Dosagem de concreto

A dosagem do concreto pode ser definida como sendo o processo de selecionar os materiais adequados, cimento, água, agregados, e eventualmente aditivos, e do proporcionamento de suas respectivas quantidades relativas, de maneira que o produto final apresente características capazes de atender as condições de serviço e um menor custo possível (Silva, 2006; Neville 1997).

Para o correto proporcionamento, deve-se conhecer as características que o produto final deve apresentar tanto no estado fresco, como uma trabalhabilidade adequada, tanto no estado endurecido como resistência e durabilidade, compatíveis com as solicitações impostas (Neville 1997).

A resistência à compressão é definida no projeto estrutural. A trabalhabilidade a ser obtida depende principalmente das dimensões da peça a ser concretada, do

espaçamento entre as barras da armadura e do tipo de execução adotado (transporte, lançamento e adensamento).

A partir destas características do concreto, os parâmetros a serem definidos pela dosagem, independente do método adotado, são:

- Relação água/cimento;
- Relação pasta/agregados na mistura;
- Relação areia/agregado graúdo na mistura;
- Uso de aditivos.

A determinação das características a serem priorizadas devem nortear a dosagem, já que a mudança em uma determinada propriedade desejada pode afetar de forma desfavorável outro parâmetro específico. Por exemplo, ao manter-se o consumo de cimento por unidade de volume, um aumento na quantidade de água aumentará a fluidez do concreto, tornando-o mais trabalhável, porém menos resistente (Mehta, 1994). A tabela 3.14 mostra como um determinado parâmetro de dosagem afeta as propriedades do concreto.

Tabela 3.14 – Variação dos parâmetros de dosagem

Parâmetros de dosagem do concreto	Concreto fresco	Concreto endurecido	Para redução do custo
	Para uma boa trabalhabilidade	Para uma boa resistência	
Granulometria do agregado miúdo	de preferência fina	de preferência grossa	grossa
Relação graúdo/miúdo	a diminuir	a aumentar	a maior possível
Consumo de água	a aumentar até um certo ponto	a diminuir	a aumentar
Granulometria total	preferível contínua	preferível descontínua	a disponível
Dimensão máxima característica do agregado	de preferência média	de preferência pequena	a aumentar
Geometria do grão de agregado graúdo	de preferência esférica	de preferência irregular	esférica

Fonte: Helene, 1992.

De forma a facilitar as escolhas durante o processo de dosagem, as normas estabelecem valores para algumas das propriedades do concreto, como por exemplo (Neville 1997):

- A resistência à compressão “mínima” a uma determinada idade necessária para fins estruturais;
- Relação água/cimento máxima ou teor máximo de cimento, ou ambos, e em certas condições de exposição e teor mínimo de ar incorporado para assegurar a durabilidade adequada;
- Teor máximo de cimento para evitar fissuração devida a ciclos de temperatura em concreto massa;
- Tipo de cimento;
- Teor máximo de cimento para evitar fissuração por retração em condições de exposição e umidade pré-definidos;
- Massa específica mínima.

Após a definição das características a serem atendidas, são inúmeros os métodos ou procedimentos de dosagem que podem ser utilizados, sendo necessário um cuidado na escolha, já que alguns apresentam características que se adequam apenas ao tipo de material encontrado em um determinado país. No Brasil são adotados quatro métodos bastante conhecidos, o do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT), o da Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), Instituto Tecnológico do Rio Grande do Sul (ITERS) e o do Instituto Nacional de Tecnologia (INT).

O método de dosagem da ABCP foi desenvolvido através da adaptação dos métodos preconizados pelo American Concret Institute (ACI) e Portland Cement Institute (PCI) às características dos materiais encontrados no Brasil (Rodrigues, 1995).

Apesar dos métodos de dosagem diferirem entre si, certas considerações são comuns a todos, como, por exemplo, o cálculo da resistência de dosagem, a correlação da resistência à compressão com a relação água/cimento para determinado tipo e classe de cimento, a evolução do crescimento da resistência com o tempo, o consumo de água por unidade de volume para obtenção da trabalhabilidade requerida, certos ajustes experimentais em laboratório e as correções em obra (Silva, 2006).

Segundo a NBR 12655/96, a resistência de dosagem, visa a garantir que seja assegurado o valor de f_{ck} especificado pelos calculistas e é calculada pela fórmula:

$$f_{c,j} = f_{ck} + 1,65 S_d \quad (3)$$

Onde:

f_{ck} = Resistência característica do concreto à compressão, especificada no projeto estrutural

$f_{c,j}$ = Resistência do concreto à compressão, prevista para a idade de j dias.

S_d = Desvio padrão em função do grau de controle dado pela tabela 3.15.

Tabela 3.15 – Definição dos valores para o desvio padrão S_d

Condição	Desvio Padrão S_d (MPa)	Condições de preparo do concreto
A	4,0	Controle Rigoroso: profissional presente na obra e materiais em peso.
B	5,5	Controle Razoável: profissional presente na obra, cimento em peso e o restante em volume.
C	7,0	Controle Regular: cimento medido em peso e o restante em volume.

Fonte: NBR 12655/96

Além dos parâmetros iniciais de dosagens, são feitas aproximações teóricas e ajustes no traço final, a partir da produção e análise de misturas experimentais. A trabalhabilidade do concreto fresco é medida pelo abatimento do tronco de cone e da observação de possível segregação e/ou exsudação, da massa específica do concreto adensado e do teor de ar total. A resistência do concreto é determinada através do rompimento de corpos de prova moldados e curados de acordo com as normas (Mehta, 1994; Rodrigues, 1995).

3.7 Caracterização dos meios agressivos

No estudo de durabilidade do concreto, deve-se sempre ter em mente que o material só será durável quando apresentar características que forem compatíveis com o meio ambiente ao qual está inserido. Torna-se necessário conhecer o ambiente onde uma estrutura será inserida, para que um concreto devidamente especificado e executado não tenha sua vida útil reduzida significativamente (Isaia, 2005; Repette, 1998).

De maneira geral, embora existam diversas pesquisas sobre a durabilidade das estruturas de concreto, levando em conta o meio ambiente, ainda faltam parâmetros seguros que possam ser especificados para a produção de estruturas de concreto armado duráveis (Isaia, 2005).

Embora os principais agentes agressivos químicos ao concreto armado sejam os íons cloretos, e o CO_2 , são diversos os casos registrados em que o concreto e as argamassas estão submetidos a ataques por ácidos. Estes ataques têm sido abordados em diversos estudos (Moreira, 2001), e a caracterização destes é mostrada na tabela 3.16.

Tabela 3.16 – Caracterização de ataques ácidos

Ataques ácidos	Caracterização
Industrial	Na indústria petrolífera é observado o ataque das soluções ácidas, utilizadas na acidificação dos poços de petróleo para aumento da produção, sobre as áreas cimentadas.
Chuva ácida	Apresenta um pH entre 4,5 e 2,2 (a chuva normal possui pH igual a 5) devido a presença de compostos agressivos, e é resultante da combinação dos gases presentes na poluição atmosférica, entre eles o óxido de enxofre que reage com o vapor de água produzindo ácido sulfúrico (H_2SO_4).
Águas Subterrâneas	Presença de ácido sulfúrico como resultado da oxidação de sulfetos de pirita (FeS_2) e marcassita (sulfeto de ferro) presença que é catalisado pela presença de um tipo de bactéria aeróbica.
Bactérias	Liberam ácido sulfídrico, o qual em contato com a água é agressivo.

Fonte: Repette, 1998.

Independente da causa do ataque, a caracterização da agressividade do ambiente baseia-se na agressividade das soluções, mais comumente soluções aquosas, onde os valores de pH (potencial hidrogeniônico) e as concentrações dos elementos deletérios são geralmente utilizadas como parâmetros de classificação. A tabela 3.17 apresenta os valores limites para a classificação de ambiente de elevada agressividade química (Repette, 1998).

Tabela 3.17 – Valores limites para a classificação de ambiente de elevada agressividade química.

Parâmetros	Valores Limites	
	NBR 6118	CEP-FIP Model Code
pH - valor	<4,5	<4,5
CO ₂ dissolvido em mg/L	>100	>100
Sulfato (SO ₄) em mg/L	>250	>60
Amônio (NH ₄ ⁺) em mg/L	>500	>3000
Magnésio (Mg ²⁺) em mg/L	>1500	>3000

Fonte: Repette, 1998.

Além do pH, a forma de contato da solução agressiva com o concreto também é um aspecto de muita importância. Em alguns casos, ciclos de imersão e secagem podem ser mais danosos que contato por imersão contínua, sendo também mais rápida a deterioração por líquidos em movimento e renováveis do que por fluidos estagnados (Repette, 1998).

3.8 Concretos submetidos a meios ácidos

Dependendo da utilização das estruturas e das condições climáticas e ambientais, o concreto poderá ser submetido aos efeitos de um conjunto de agentes agressivos. Os agentes agressivos são definidos como agentes químicos capazes de provocar a deterioração do concreto, comprometendo o desempenho da estrutura (Nascimento, 1991; Repette, 1998).

A corrosão e a deterioração observadas no concreto podem estar associadas a fatores mecânicos, físicos, biológicos ou químicos entre os quais são citados como exemplos:

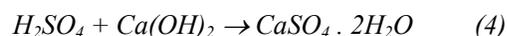
- Mecânicos: vibrações e erosão;
- Físicos: variações de temperaturas;
- Biológicos: ação de bactérias;
- Químicos: produtos químicos como ácidos e sais.

Os efeitos de soluções agressivas são classificados da seguinte forma:

- Tipo I: Lixiviação do hidróxido de cálcio;
- Tipo II: Reações entre soluções e compostos secundários, que podem ser lixiviados do concreto ou mantidos juntos, mas sem aderência, o que causará queda na resistência;
- Tipo III: Reações similares ao tipo II, mas resultando na cristalização de compostos secundários, gerando forças de expansão e desagregação do concreto;
- Tipo IV: Cristalização de sais das soluções de ataque, causando desagregação do concreto;
- Tipo V: Corrosão das armaduras.

As estruturas de concreto estão cada vez mais sendo submetidas a soluções ácidas, sejam as minerais (sulfúrico, nítrico, clorídrico e fosfórico) sejam as orgânicas (lático, acético e outros), e apresentando, em consequência, grandes deteriorações.

O ataque por substâncias ácidas geralmente acarreta reações do tipo II em praticamente todos os compostos do cimento Portland. O ácido sulfúrico reage mais rapidamente com o hidróxido de cálcio do cimento, conforme a reação abaixo, formando o sulfato de cálcio que é depositado como gesso (Gentil, 2003).



O hidróxido de cálcio está sempre presente na pasta de cimento endurecida em percentuais acima de 20% e é classificada como uma base forte, conferindo a essa pasta endurecida um caráter extremamente básico, com pH superior a 13. Assim, além da reação entre os compostos do cimento e do ácido sulfúrico, o próprio pH da solução acarreta uma deterioração do concreto na medida em que ocorre uma queda progressiva do seu pH. Esta queda do pH ocorre devido à reação entre a solução ácida e o $Ca(OH)_2$, tendo como produtos da reação sal mais água. Esse processo favorece a lixiviação e aumenta gradativamente a permeabilidade da pasta permitindo a penetração de agentes agressivos. Em casos extremos de exposição, ocorre a decomposição química do C-S-H da pasta de cimento, que é o principal componente da pasta de cimento endurecida, induzindo a sua destruição progressiva (Nascimento, 1991; Moreira, 2001).

Como o concreto continua submetido ao H_2SO_4 , os outros componentes do cimento vão sendo decompostos e lixiviados. O sulfato de cálcio formado na reação inicial reage com o aluminato de cálcio formando o sulfoaluminato de cálcio (Etringita), reação do tipo III, que com a cristalização pode causar expansão do material e sua fissuração (Nascimento, 1991).

A escolha adequada do tipo de cimento utilizado, além de redução da penetração da solução para o interior do elemento, é a forma encontrada para se reduzir o impacto do ataque. Para estruturas sujeitas ao ácido sulfúrico, deve-se usar cimento com teor de aluminato tricálcico inferior a 8%, por apresentar taxa de C_3A de aproximadamente 4%, sendo também recomendável fazer uso de cimento aluminoso ou de cimento com adição de escória de alto-forno ou de pozolana (Moreira, 2001).

A ação das pozolanas permite fixar o $Ca(OH)_2$ do cimento, que é normalmente o produto mais vulnerável ao ataque ácido, sendo, portanto, benéfica à durabilidade das estruturas. Além disso, o uso de adições no cimento reduz a porosidade da pasta de concreto aumentando a resistência deste à penetração de substâncias para o seu interior. A figura 3.9 mostra o resultado de um estudo feito por MOREIRA (2001), que avaliou o comportamento de concretos fabricados com os diversos tipos de cimento brasileiros submetidos a soluções ácidas.

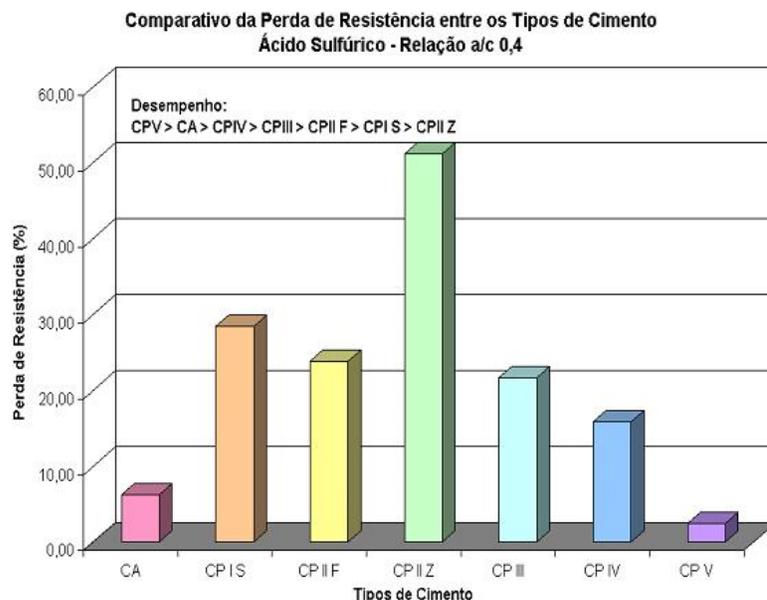


Figura 3.9 – Perda de resistência de concretos produzidos com diversos tipos de cimento quando submetidos ao ataque por ácido sulfúrico (Moreira, 2001).

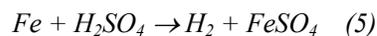
Outro grande problema da exposição de estruturas de concreto ao ácido sulfúrico é a contaminação da armadura, que apresenta uma resistência muito baixa à ação de soluções ácidas, sofrendo um processo de corrosão conforme mostrado na figura 3.10. O concreto serve como barreira física e química de proteção às barras de aço em seu interior, e quando submetido à exposição de solução altamente ácida, esta barreira pode tornar-se menos efetiva, expondo o aço à ação direta do ácido.



Estrutura de concreto com corrosão na armadura.

Figura 3.10 – Corrosão da armadura (Gentil, 2003)

A velocidade de deterioração da armadura depende do potencial hidrogeniônico da solução em contato com a liga, sendo que as reações químicas que ocorrem são denominadas de simples troca, provocando a ruptura das ligações metálicas, o que é mostrado na reação a seguir (Neville 1997; Moreira, 2001).



Mesmo que o concreto consiga barrar a ação direta do ácido sobre as barras, há uma redução progressiva do pH do concreto da superfície para o interior e conseqüentemente ocorre a despassivação da armadura, ficando esta mais vulnerável à ação de outras soluções agressivas. A perda dessa proteção, por queda do pH ou por ataque de íons cloretos, poderá gerar pilhas eletroquímicas de corrosão. Caso

haja simultaneamente oxigenação e umidade, haverá a propagação da corrosão (Nascimento, 1991; Moreira, 2001).

3.9 Mecanismos de proteção do concreto

Diante de meios de elevada agressividade, uma alternativa viável é o uso de revestimentos de proteção aplicado sobre a superfície do concreto, sendo seu emprego recomendado pelas mais recentes e completas normalizações de estruturas de concreto, como, por exemplo, indica o “CEB-FIP Model Code” e a revisão da Norma NBR6118 – Projeto de estruturas de concreto no seu item 10.8 “Medidas Especiais”. A proteção superficial pode ser utilizada como alternativa para diminuir a velocidade de degradação de uma estrutura já existente ou como um sistema que, em conjunto com o concreto, irá permitir a uma nova estrutura atingir uma determinada vida útil. A aplicação de revestimento de proteção pode ter como objetivo minimizar o ataque químico (decorrente do contato com agentes químicos agressivos ao concreto ou da deposição de fuligens de natureza ácida), minimizar a ação de microorganismos presentes em ambientes úmidos e aumentar a proteção das armaduras. (Repette, 1998; Isaia,2005).

O sucesso na adoção de sistemas de proteção superficial somente é atingido se forem especificados produtos adequados e se a qualidade da aplicação for garantida, figura 3.11. A ausência de um estudo de caracterização do meio agressivo e do concreto durante a etapa de seleção do produto, somada a inexistência de critérios que considerem a influência do substrato do concreto no desempenho do sistema de proteção, resulta em deficiência nas propriedades requeridas ao conjunto concreto e revestimento, e muitas vezes em manifestações patológicas (Moreira, 2001; Isaia,2005; Repette, 1998).

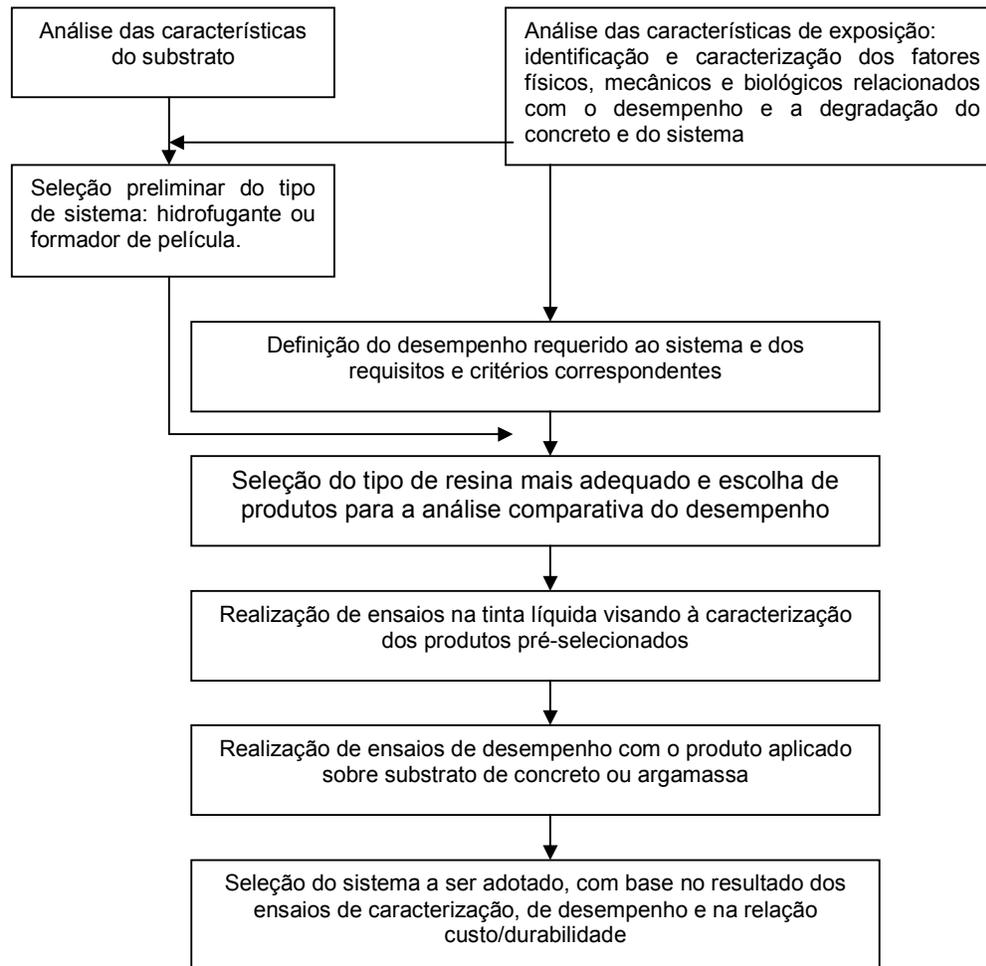


Figura 3.11 – Aspectos da definição do sistema de proteção adequado (Isaia, 2005)

Considerando-se apenas a durabilidade do sistema de proteção, este deve resistir ao intemperismo, que tende a degradar a película em decorrência da ação de raios ultravioleta e de fenômenos físicos ou químicos decorrentes de sua interação com o meio ambiente, como também a propiciar condições para a ação de microorganismos que possam causar sua deterioração. O sistema de proteção deve, igualmente, manter a aparência superficial dentro dos níveis previstos, ser de fácil aplicação e manutenção e possuir custo adequado ao tipo de uso. A tabela 3.18 apresenta os principais requisitos de desempenho dos sistemas de proteção.

Tabela 3.18 – Requisitos de desempenho do sistema de proteção

Requisitos de desempenho do sistema de proteção		Objetivo	Ensaio / avaliações
Resistência a esforços mecânicos		Simular a ação do vento, da chuva e as ações de limpeza da superfície	<ul style="list-style-type: none"> ▪ aderência ▪ abrasão ▪ riscamento
Estanqueidade	À água	Determinar a permeabilidade à água	<ul style="list-style-type: none"> ▪ absorção capilar por imersão/ penetração de cloretos ▪ absorção por coluna de água ▪ penetração de água da chuva
	Ao ar e gases	Determinar a estanqueidade do sistema à passagem de ar e gases	<ul style="list-style-type: none"> ▪ permeabilidade ao vapor de água ▪ permeabilidade ao CO₂
Durabilidade	Resistência à intempéries	Simular a degradação do sistema de proteção devido à ação da intempérie	<ul style="list-style-type: none"> ▪ envelhecimento natural ▪ envelhecimento acelerado
	Resistência ao ataque químico	Simular o contato de elementos agressivos ao concreto	<ul style="list-style-type: none"> ▪ ataque químico
	Resistência a agentes biológicos	Simular o desenvolvimento de microorganismos que possam degradar a película	<ul style="list-style-type: none"> ▪ resistência ao ataque de fungos ▪ resistência ao ataque de bactérias
	Resistência à temperatura	Simular temperaturas elevadas devido à radiação solar ou vapores industriais	<ul style="list-style-type: none"> ▪ choque térmico ▪ resistência ao fogo
	Resistência à luz	Simular a resistência à radiação solar	<ul style="list-style-type: none"> ▪ estabilidade de cor ▪ estabilidade de brilho
	manutenção	Simular o comportamento do sistema de proteção depois de serviços de manutenção	<ul style="list-style-type: none"> ▪ envelhecimento natural após repintura
Economia		Estimar os custos relacionados com a aplicação e manutenção do sistema de proteção	<ul style="list-style-type: none"> ▪ custo de pintura ▪ custo de manutenção (repintura periódica) ▪ custos de reparos
Adequação ambiental		Avaliar o desempenho do sistema sob o ponto de vista ambiental	<ul style="list-style-type: none"> ▪ avaliação do ciclo de vida

Fonte: Isaia, 2005

No Brasil, as tintas industriais são as mais usadas como revestimento superficial do concreto. As tintas são materiais que se apresentam na forma líquida, e após serem aplicadas sobre uma superfície, secam formando uma fina película de cobertura e em geral apresentam quatro grupos de constituintes:

- As resinas, substâncias que fornecem às tintas suas características de adesividade;
- Os solventes, que tornam a viscosidade da tinta adequada a sua aplicação, propiciando uma melhor homogeneização dos constituintes orgânicos, solubilizando-os;
- Os pigmentos e cargas, que correspondem ao material sólido, sendo responsáveis por diversas propriedades mecânicas, físico-químicas, cromáticas e químicas das tintas;
- Os coadjuvantes adicionados às tintas, e responsáveis por uma série de propriedades especiais, sendo que a escolha e combinação destes coadjuvantes dependem dos outros constituintes e da função básica da tinta.

As tintas industriais mais utilizadas na proteção do concreto são:

- Tinta látex vinílica (PVAc);
- Tinta látex acrílica e tinta texturizada acrílica;
- Verniz poliuretânico alifático;
- Tinta Epóxi;
- Borracha clorada;
- Silicones hidrofugantes.

Dentre os tipos de tintas citados, a tinta epóxi destaca-se por ser a de maior uso industrial tanto no Brasil quanto no exterior, em função dos variados tipos de semi-polímeros e dos diferentes endurecedores, que podem proporcionar uma grande variedade de características, além de permitir modificações e adições de diversos materiais.

4.METODOLOGIA

A metodologia desenvolvida permitiu avaliar a eficiência da proteção do concreto submetido a ataques químicos, tendo sido realizada de acordo com as etapas descritas a seguir.

4.1 Composição de métodos de dosagem

O concreto abordado neste trabalho foi dosado a partir de resultados obtidos em pesquisas realizadas na Escola de Engenharia da UFMG, levando em consideração os métodos de dosagem do ACI – American Concrete Institute e do IPT – Instituto de Pesquisa Tecnológica de São Paulo, com o objetivo de se obter um concreto de qualidade e com a resistência proposta.

A dosagem do concreto foi feita a partir dos dados obtidos através da caracterização dos materiais empregados – cimento e agregados – enfocando aspectos como a qualidade e a composição granulométrica destes.

O estudo de dosagem partiu da definição de características que o concreto deveria apresentar aos 28 dias, como resistência à compressão de 30MPa e baixo valor de absorção. A obtenção dessas duas características foi possível em função de se utilizar um baixo fator água/cimento e do emprego de aditivo superplastificante.

4.2 Produção do Concreto

Os concretos foram produzidos a partir dos estudos de dosagem, utilizando os equipamentos disponíveis no laboratório de concreto do Departamento de Engenharia de Materiais e Construção da UFMG. O processo de produção corresponde à obtenção da homogeneidade dos materiais empregados, a um correto adensamento e a uma cura adequada.

A homogeneidade do concreto foi garantida através do processo de mistura de seus constituintes, utilizando-se uma betoneira durante um período que variou de três a cinco minutos.

O adensamento buscou eliminar os vazios da massa, aumentando a resistência e a impermeabilidade, e foi realizado utilizando-se um vibrador de imersão. Adotou-se um curto tempo de vibração de forma a evitar a segregação dos compostos do concreto.

4.3 Análise do concreto fresco

A avaliação do concreto fresco foi feita através do estudo da trabalhabilidade, por meio do ensaio de abatimento de cone normalizado pela NBR 7223 – NM 67, que permite visualizar a consistência do material, conforme a figura 4.1. O ensaio é muito utilizado tanto em laboratório, durante a fase de dosagem, como em canteiro de obras, por sua facilidade de execução

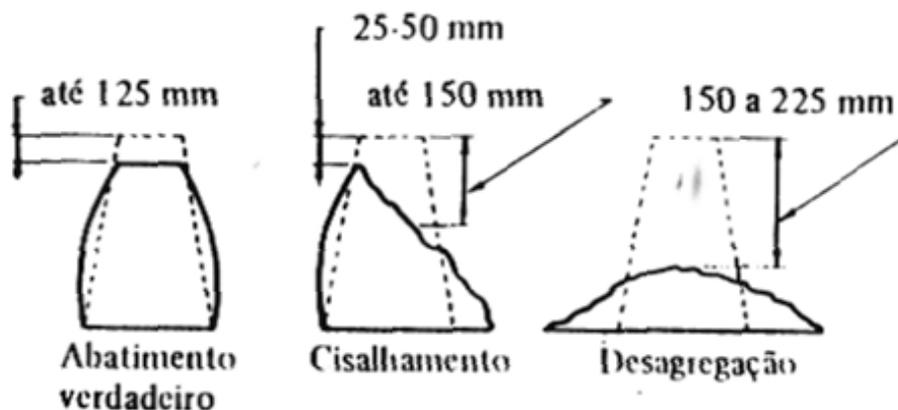


Figura 4.1 – Avaliação do abatimento (Neville 1997).

A determinação da trabalhabilidade visou avaliar a influência do fator água/cimento de 0,50, aliado ao aditivo proposto, a fim de verificar o abatimento e a performance do concreto, e garantir a hidratação e a homogeneização da pasta.

4.4 Análise do concreto no estado endurecido

4.4.1 Moldagem dos corpos de prova

Foram moldados 60 corpos de prova de forma cilíndrica de 10x20 cm, que permaneceram por 28 dias em cura úmida. De acordo com a norma NBR 5738, os corpos de prova foram preenchidos com concreto em camadas e adensadas com vibrador mecânico tipo mangote.

Foram utilizados corpos de prova 5x10 cm, em ensaios preliminares de resistência e absorção para ajuste da dosagem.

4.4.2 Resistência à compressão

A resistência à compressão é obtida pelo rompimento dos corpos de prova a 28 dias, idade considerada padrão para este tipo de ensaio. Foi tomado o cuidado para que os corpos de prova apresentassem baixa umidade, já que, em ensaios de compressão, observa-se que corpos de prova secos apresentam resistências da ordem de 20 a 25% maiores que corpos de prova correspondentes, ensaiados em condição saturada.

A determinação da resistência foi feita através do ensaio de compressão lenta utilizando uma prensa, conforme mostrado na figura 4.2.



Figura 4.2 – Ensaio de compressão.

4.4.3 Ensaio de absorção

Para quantificar e avaliar a impermeabilidade do concreto, foram realizados ensaios de absorção por imersão, segundo a norma NBR 9778/87 “Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por imersão – Índice de vazios e massa específica”.

Os corpos de prova foram secos em estufa, a uma temperatura de $(105\pm 5)^{\circ}\text{C}$, durante um período de 72 horas. Foram medidas as massas em períodos de 24 horas, 48 horas e 72 horas, sendo a última adotada como massa do concreto seco. Após a secagem, a amostra foi imersa em água a uma temperatura de $(23\pm 2)^{\circ}\text{C}$ durante 72 horas. Novamente foi feita a determinação da variação da massa em intervalos de tempo. O valor da absorção correspondeu ao ganho de massa devido ao preenchimento dos vazios do concreto pela água.

Através das medições feitas ao longo do ensaio, foram ainda determinados a massa específica e os índices de vazios do concreto, segundo o método de cálculo também descrito pela NBR 9778/87.

4.5 Ataque ao concreto

A velocidade e a intensidade de degradação, considerando-se aspectos do meio agressivo, são fortemente dependentes da espécie e da concentração da solução ácida, da temperatura e do tipo de contato com o concreto que pode ser estacionário ou em fluxo renovável. O ataque foi realizado de forma acelerada, mergulhando o concreto por completo em solução de ácido sulfúrico (H_2SO_4), conforme mostrado na figura 4.3.

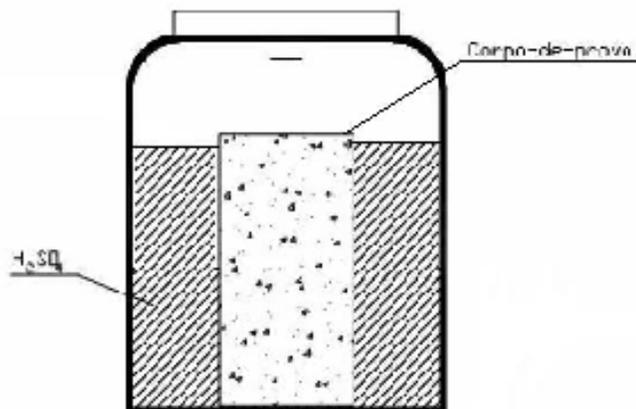


Figura 4.3 – Imersão do concreto em ácido sulfúrico.

A avaliação do impacto da solução ácida sobre o concreto foi feita por imersão de corpos de prova em duas concentrações diferentes de ácido sulfúrico: 2,5% e 3,0%.

A fim de avaliar as proteções de uma forma mais efetiva, foi adotada a concentração de 3,0%, em função dos danos que esta alta concentração causa a um concreto sem proteção. Na primeira situação, o concreto ficou completamente imerso no ácido durante 7 dias. O segundo ataque proposto foi realizado intercalando-se a imersão em ácido com períodos de 24 horas de secagem ao ar, com o objetivo de verificar o impacto do ciclo de molhagem e secagem.

4.6 Proteção do concreto

O concreto foi protegido utilizando-se uma cobertura superficial de tinta epóxi, aplicada em duas demãos em intervalos de 24 horas, conforme recomendação do fabricante, figura 4.4 (Vedacit 2003).

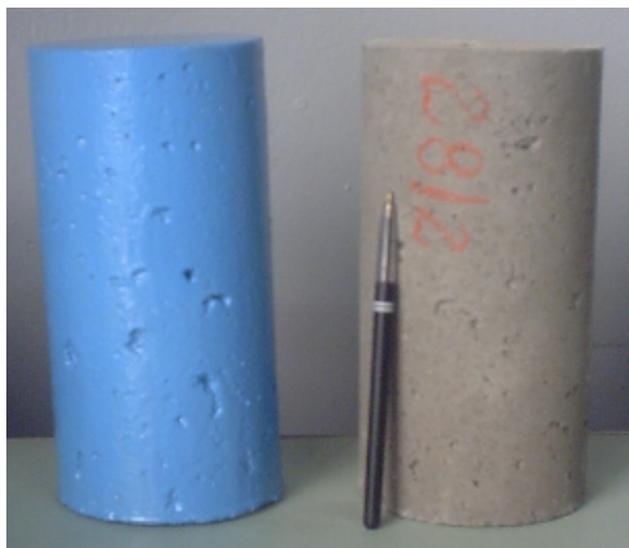


Figura 4.4 – Concreto protegido com tinta epóxi e sem proteção.

Na preparação da superfície do concreto, foi tomado o cuidado para que apresentasse uma forma áspera, isenta de pó e livre de substâncias como graxas e óleos que poderiam prejudicar a aderência entre o substrato e a tinta (Vedacit 2003). Além disto, antes da aplicação da camada protetora, foi feita ainda a secagem dos corpos de prova para que a umidade interna do concreto não prejudicasse a qualidade da película, formando, por exemplo, bolhas.

A camada protetora utilizada foi uma tinta a base de resina epóxi, bi-componente que tem um consumo aproximado de $150\text{ml/m}^2/\text{demão}$.

4.7 Avaliação das proteções

A eficiência da tinta epóxi como camada protetora foi avaliada a partir da verificação do comportamento do concreto submetido a ataque por ácido sulfúrico. Foi feita uma comparação através da análise de perdas de massa e de resistências de corpos de prova com e sem proteção.

Foi realizada também uma avaliação visual do impacto do ataque, levando-se em consideração a escala de avaliação das proteções propostas por Amusallam, tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Escala de avaliação das proteções propostas por Amusallam

Avaliação	Descrição
1	Proteção Intacta
2	Cantos danificados
3	Cantos e arestas deterioradas
4	Cantos, arestas e superfície danificadas
5	Dissolução e/ou desprendimento da proteção

Fonte: Almusallam, 2003.

5.RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Dosagem

O concreto adotado neste trabalho resultou de pesquisas realizadas na Escola de Engenharia da UFMG, com base nos métodos de dosagem do ACI e IPT. A definição do traço adotado levou em consideração alguns parâmetros para a produção de um concreto com características de durabilidade nas condições impostas pelo meio agressivo, de acordo com a NB 1 – Projeto de Estruturas de Concreto.

A resistência de dosagem a 28 dias foi estabelecida como 30MPa. Além da resistência, o concreto deveria apresentar uma baixa absorção, de forma a dificultar a penetração do líquido agressivo. Estas duas características foram alcançadas adotando-se um fator água/cimento de 0,50, alto consumo de cimento, 370kg/m³, e uma quantidade de cimento e areia de 51% da massa total. O cimento utilizado foi o CII-E-32.

Tabela 5.1 – Estudo comparativo para definição da resistência a 28 dias.

Concreto		Resistência à compressão (MPa)	Concreto		Resistência à compressão (MPa)		
7 dias	1	27,75	28 dias	1	34,25		
		27,10			35,12		
	2	23,95		2	30,75		
		25,48			31,34		
	3	26,83		3	30,98		
		27,11			33,68		
		26,25			34,15		
	MÉDIA			26,35	MÉDIA		32,90
	VARIANÇA			1,64	VARIANÇA		3,28
DESVIO PADRÃO		1,3	DESVIO PADRÃO		1,9		

A partir destes parâmetros foram calculados os demais constituintes do concreto de acordo com método de dosagem do ACI. A composição final do metro cúbico do concreto proposto como referência: trezentos e setenta quilos de cimento, setecentos e cinqüenta e oito quilos de areia, mil e trinta e seis quilos de brita de gnaiss, cento e

sessenta e sete litros de água e três quilos e setecentos gramas de aditivo plastificante, tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Dosagem do concreto

Cimento CP II-E -32 kg/m³	Areia kg/m³	Brita Gnaisse kg/m³	Água l/m³	Aditivo CEMIX 2000 kg/m³	Fator a/c
370	658	1036	167	3,7	0,50

5.2 Qualidade da areia

A utilização de areias com diferentes granulometrias permitiu verificar a influência da qualidade do agregado miúdo sobre a qualidade do concreto.

A areia nº 1 apresentou uma granulometria contínua e um módulo de finura igual a 2,6 e dimensão máxima característica igual a 4,8mm, sendo classificada como areia média. Já a areia nº 2 apresentou uma maior descontinuidade em sua composição granulométrica, tendo sido medido um valor do módulo de finura igual a 2,9 para um mesmo valor da dimensão máxima característica igual da primeira areia.

A granulometria descontínua favoreceu o aumento do número de vazios dentro do concreto e, como mostra a tabela 5.3, resultou em valores superiores para a absorção e índice de vazios, em relação a areia 1.

Tabela 5.3 – Variação da absorção e do índice de vazios para concretos produzidos com areias diferentes

Areia	Absorção por imersão (%)	Índice de Vazios (%)
Areia nº 1 – Granulometria contínua	4,75	10,77
Areia nº 2 – Granulometria descontínua	6,11	13,59

A descontinuidade apresentada na areia nº 2 influiu negativamente na resistência à compressão do concreto, que apresentou tanto a 7 dias quanto a 28 dias valores bem inferiores aos obtidos no concreto produzido com uma areia melhor graduada,

conforme pode-se observar na figura 5.1. Há 35 dias a diferença de resistência foi menor, entre os corpos de prova produzidos com as diferentes areias.

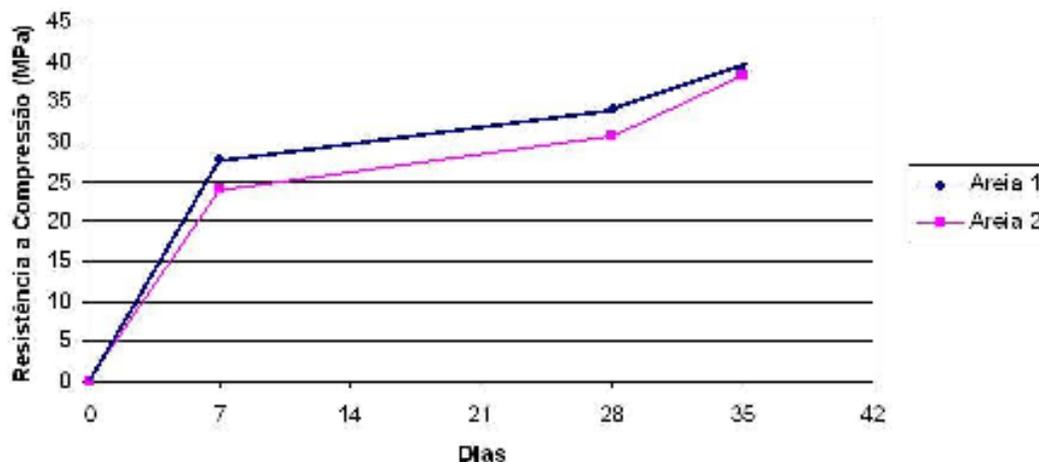


Figura 5.1 – Evolução da resistência para concretos produzidos com duas areias diferentes

5.3 Influência da cura na resistência do concreto

O impacto da cura na qualidade final do concreto foi avaliado através da comparação da evolução da resistência à compressão em corpos de prova de 5x10cm nas idades de 7, 28 e 35 dias.

Foram comparados os resultados de concretos submetidos a uma cura ao ar, a uma cura úmida em condições controladas compatíveis com a norma e a uma cura úmida menos criteriosa. Na figura 5.2, observa-se que os resultados de resistência obtidos para uma cura ao ar, sem nenhum controle, foram bem inferiores aos concretos submetidos à cura úmida. Pode-se observar, também, que os corpos de prova curados em câmara úmida, temperatura de 23°C e umidade relativa do ar de 95%, considerada ideal, apresentaram os maiores valores de resistência. A curva intermediária, correspondente a uma cura úmida sem controle de umidade, apresentou valores de resistência inferiores em 5% em relação ao concreto plenamente curado.

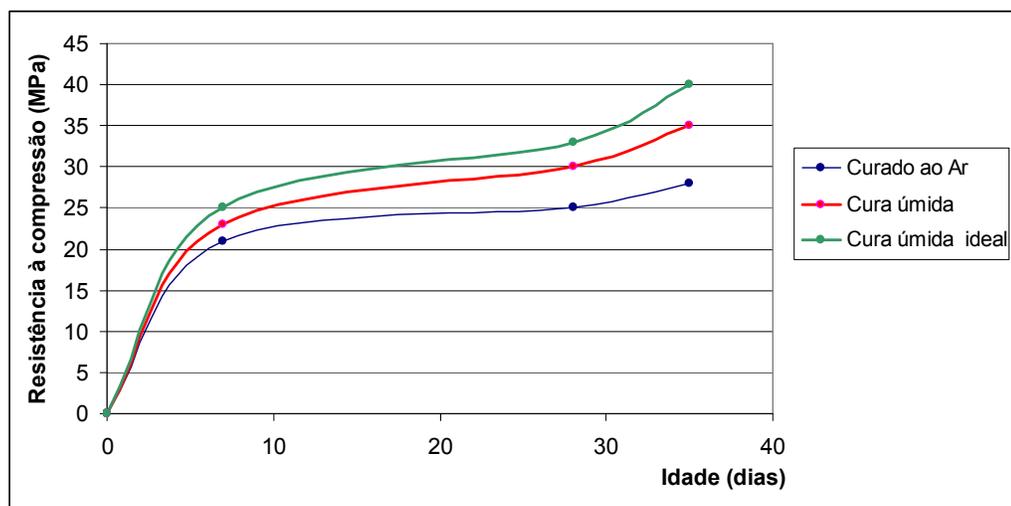


Figura 5.2 – Evolução da resistência à compressão em função do tipo de cura

5.4 Avaliação da eficiência da camada protetora

5.4.1 Influência da concentração do ácido

A verificação da influência da concentração do ácido sulfúrico foi feita através da medida de perda de massa do concreto, com e sem proteção, em corpos de prova imersos em ácido sulfúrico num período de 7 dias, tabela 5.4.

Tabela 5.4 – Perda de massa do concreto em função da concentração do ácido

Característica do concreto	Ataque	Perda de Massa (%)
Sem proteção	H ₂ SO ₄ a 2,5%	2,21
Com proteção epóxi		0,55
Sem proteção	H ₂ SO ₄ a 3,0%	2,78
Com proteção epóxi		1,20

Pode-se observar, na tabela 5.4, que, para uma concentração de 3,0%, a perda de massa do concreto sem proteção foi de 2,78%, valor superior ao encontrado para a concentração de 2,5%. O uso da proteção reduziu consideravelmente a perda de massa em ambos os ataques, porém novamente a solução de ácido a 3,0% gerou um maior impacto. A perda de massa ficou em 1,20% para a concentração mais elevada,

sendo este valor bem superior a 0,55% encontrada no caso da utilização da solução mais branda.

5.4.2 Inspeção visual

A deterioração do concreto sem proteção, em diferentes idades, quando submetido à imersão contínua pode ser observada na figura 5.3. O ataque ácido gerou uma falta de coesão da pasta, fazendo com que se esfarelasse facilmente.

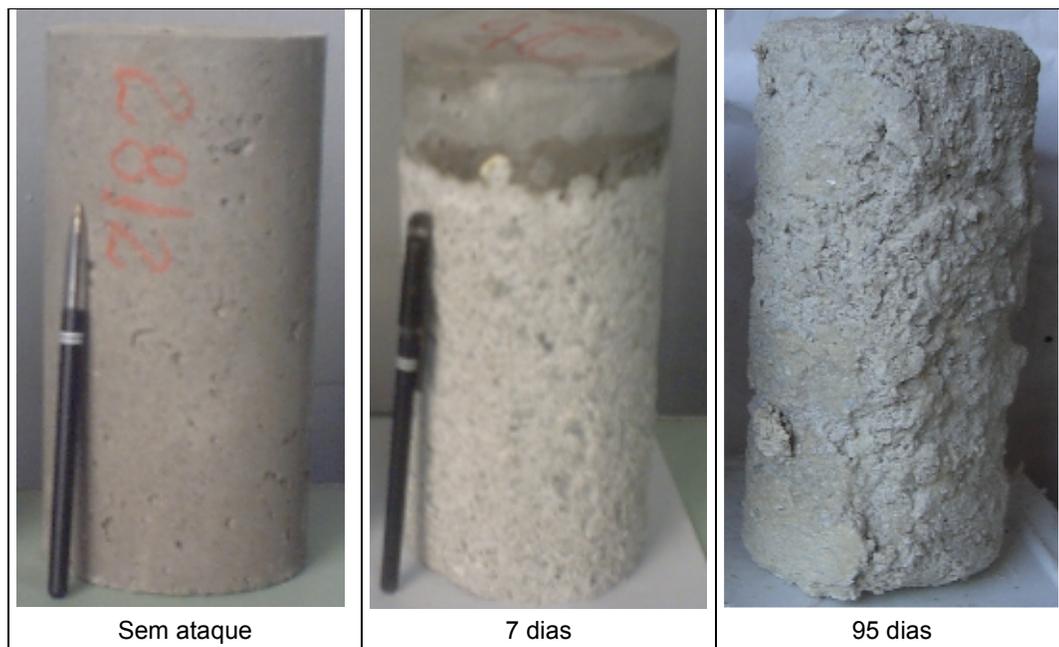


Figura 5.3 – Concreto submetido à imersão em ácido sulfúrico por 7 e 95 dias

A figura 5.4 permite visualizar o processo de deterioração do concreto sem proteção, submetido ao ciclo de imersão e secagem, em diferentes idades. O concreto submetido a este ataque, já com 7 dias, apresentou um aspecto de desagregação de seus componentes. Ao final de 95 dias, o concreto não apresentou quase nenhuma coesão entre o meio contínuo e os agregados, se assemelhando ao aspecto de uma esponja.

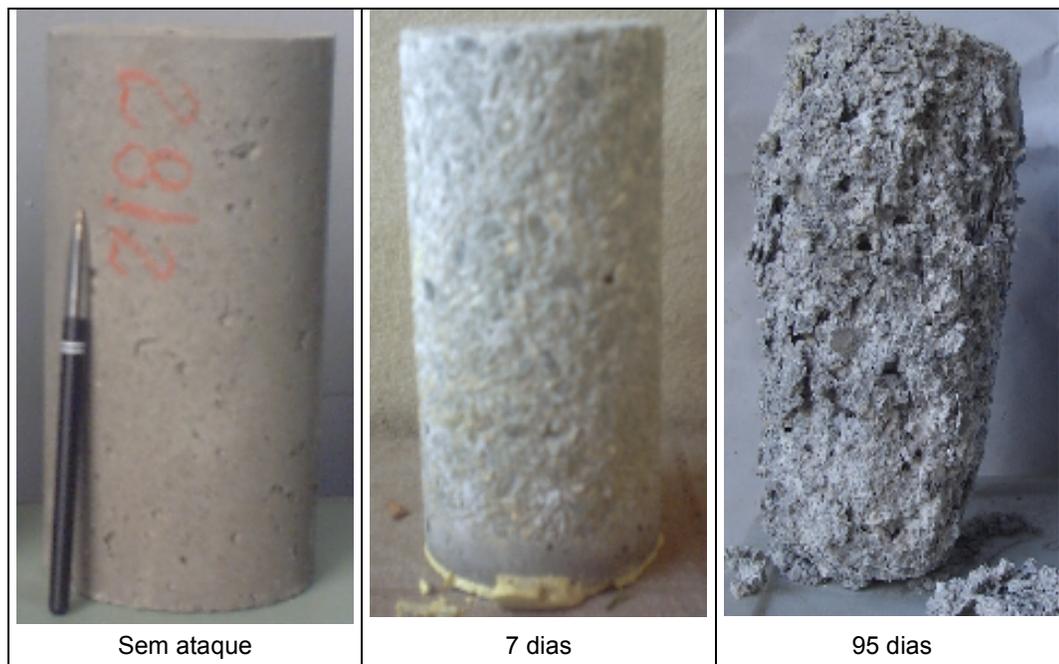


Figura 5.4 – Concreto submetido ao ciclo de imersão em ácido sulfúrico e secagem

Comparando visualmente a deterioração final dos corpos de prova a 95 dias, entre as duas formas de ataque propostas, figura 5.5, observa-se que, mesmo mantendo o tempo de imersão do concreto na solução ácida, o ciclo de molhagem e secagem (situação A) gera um maior impacto sobre a estrutura do material.

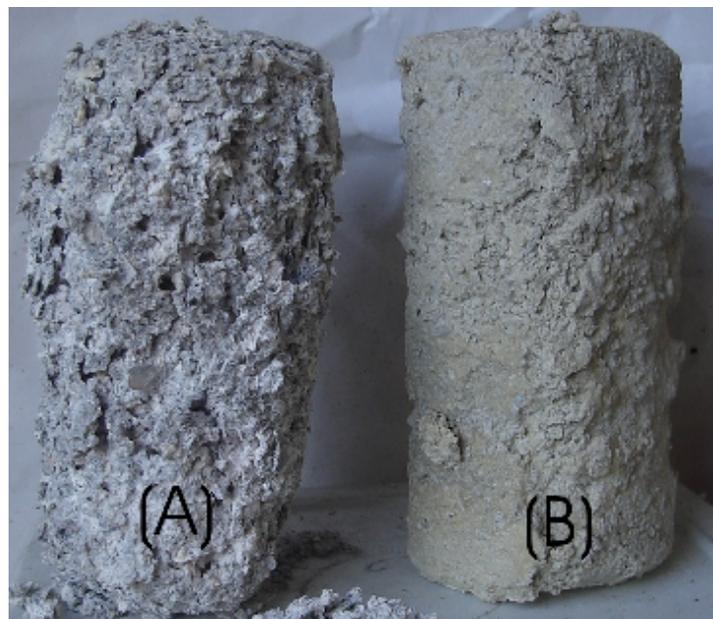


Figura 5.5 – Concretos submetidos ao ataque ácido por 95 dias: (A) ciclo de molhagem e secagem e (B) imersão.

A avaliação visual da eficiência da proteção do concreto pela tinta epóxi, mostrada na figura 5.6, permite observar que independente da forma de ataque, a tinta confere ao concreto uma proteção ao longo de um período de 7 dias, sofrendo desgaste apenas nas imperfeições superficiais do concreto.

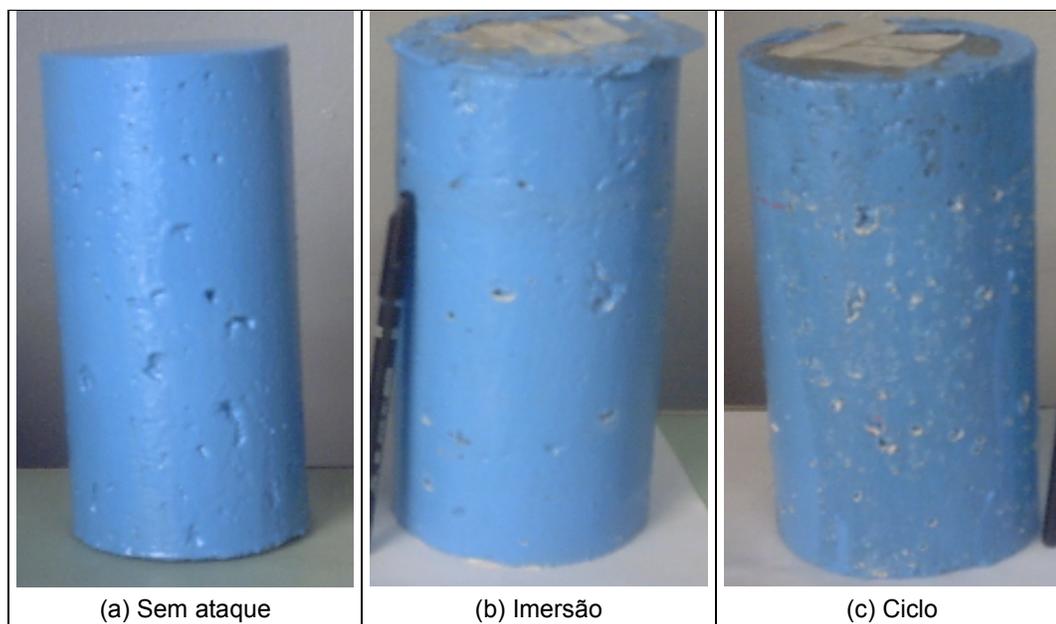


Figura 5.6 – Comparação entre a capacidade de proteção da tinta quando submetida a diferentes formas de ataque.

Novamente, foi possível observar que o impacto do ciclo de imersão e secagem é consideravelmente maior do que o observado para simples imersão.

Utilizando a classificação proposta por ALMUSALLAM (2003), a eficiência da camada de proteção foi classificada conforme mostrado na tabela 5.5.

Tabela 5.5 – Avaliação da eficiência da proteção segundo classificação proposta por ALMUSALLAM (2003)

Proteção	Tipo de ataque	Avaliação	Descrição
Tinta Epóxi	Imersão por 7 dias	3	Cantos e arestas deteriorados
Tinta Epóxi	Ciclo de imersão	4	Cantos, arestas e superfície danificados

5.4.3 Influência da absorção

Os valores obtidos para a absorção d'água por imersão, o índice de vazios e a massa específica do concreto sem proteção e com proteção epóxi, antes do ataque, são apresentados na tabela 5.6.

Tabela 5.6 – Absorção d'água, o índice de vazios e a massa específica do concreto

Concreto	Absorção d'água por imersão (%)	Índice de vazios (%)	Massa específica (kg/m ³)
Sem proteção	4,75 ± 0,02	10,80 ± 0,05	2540 ± 10
Proteção epóxi	1,74 ± 0,01	8,25 ± 0,02	2245 ± 10

O concreto sem proteção apresentou um baixo valor de absorção d'água, aproximadamente 4,75%, o que permite considerá-lo um concreto durável, já que este valor é inferior ao limite de 10% (Neville, 1997). A película protetora reduz ainda mais o valor da absorção do corpo de prova, 1,74%, aumentando ainda mais a resistência do conjunto à penetração de líquidos agressivos para o interior do concreto.

Após o ataque, observou-se um aumento dos valores da absorção quando o concreto é imerso por sete dias no ácido sulfúrico, sendo que o aumento é mais significativo no concreto sem proteção, seguido do concreto protegido por tinta epóxi, tabela 5.7 e 5.8.

Tabela 5.7 – Variação da absorção para o ataque por imersão

Concreto		Imersão		Concreto		Imersão			
		Absorção (%)				Absorção (%)			
		Antes do ataque	Após ataque			Antes do ataque	Após ataque		
Sem Proteção	1	4,30	6,21	Com Proteção	1	1,74	2,68		
		5,23	5,88			1,09	2,57		
	2	6,01	6,30		2	2,12	2,50		
		6,05	6,60			1,50	3,04		
	3	5,34	6,03		3	1,83	2,54		
		5,08	5,80			1,77	2,63		
		5,51				1,62			
	MÉDIA		5,36		6,14	MÉDIA		1,67	2,66
	VARIANÇA		0,36		0,09	VARIANÇA		0,10	0,04
DESVIO PADRÃO		0,6	0,3	DESVIO PADRÃO		0,3	0,2		

Tabela 5.8 – Variação da absorção para o ataque por ciclo de imersão e secagem

Concreto		Ciclo		Concreto		Ciclo			
		Absorção (%)				Absorção (%)			
		Antes do ataque	Após ataque			Antes do ataque	Após ataque		
Sem Proteção	1	5,23	7,35	Com Proteção	1	1,74	3,40		
		6,01	7,02			1,09	3,42		
	2	6,05	6,94		2	2,12	3,25		
		5,34	7,23			1,50	3,32		
	3	5,08	7,09		3	1,83	3,50		
		5,51	7,12			1,77	3,44		
		5,80				1,62			
	MÉDIA		5,57		7,13	MÉDIA		1,67	3,39
	VARIANÇA		0,15		0,02	VARIANÇA		0,10	0,01
DESVIO PADRÃO		0,4	0,1	DESVIO PADRÃO		0,3	0,1		

Comparando o ciclo de imersão e secagem, observou-se um considerável aumento no valor da absorção, indicando que a primeira situação causa um maior impacto na absorção dos corpos de prova.

5.4.4 Perda de massa

Os valores das perdas de massa foram obtidos com o objetivo de avaliar a capacidade da camada protetora em impedir a lixiviação dos componentes do concreto atacado, tabela 5.9 e 5.10.

Tabela 5.9 – Variação da massa para o ataque por imersão

Concreto		Imersão			Concreto		Imersão				
		Massa (g)					Massa (g)				
		Antes do ataque	Após ataque	Perda (%)			Antes do ataque	Após ataque	Perda (%)		
Sem Proteção	1	650,0	619,00	4,8	Com Proteção	1	650,0	638,00	1,8		
		650,0	625,00	3,8			650,0	632,00	2,8		
	2	655,0	622,00	5,0		2	655,0	641,00	2,1		
		654,0	630,00	3,7			654,0	633,00	3,2		
	3	655,0	627,00	4,3		3	655,0	640,00	2,3		
		651,0	624,00	4,1			651,0	629,00	3,4		
		655,0					655,0				
	MÉDIA		652,86	624,50		4,29	MÉDIA		652,86	635,50	2,6
	VARIANÇA		5,81	14,70		0,28	VARIANÇA AMOSTRAL		5,81	23,50	0,38
DESVIO PADRÃO		2,4	3,8	0,5	DESVIO PADRÃO		2,4	4,8	0,6		

Para o concreto submetido à imersão em ácido sulfúrico, observou-se que a perda de massa dos corpos de prova com proteção foi em média de 2,1%, valor muito inferior a perda de 4,3% medida nos corpos de prova sem proteção.

Tabela 5.10 – Variação da massa para o ataque por ciclo de imersão e secagem

Concreto		Ciclo			Concreto		Ciclo				
		Massa (g)					Massa (g)				
		Antes do ataque	Após ataque	Perda (%)			Antes do ataque	Após ataque	Perda (%)		
Sem Proteção	1	650,0	618,00	4,9	Com Proteção	1	650,0	632,00	2,8		
		650,0	623,00	4,2			650,0	635,00	2,3		
	2	655,0	620,00	5,3		2	655,0	639,00	2,4		
		654,0	621,00	5,0			654,0	633,00	3,2		
	3	655,0	625,00	4,6		3	655,0	639,00	2,4		
		651,0	616,00	5,4			651,0	634,00	2,6		
		655,0					655,0				
	MÉDIA		652,86	620,50		4,9	MÉDIA		652,86	635,33	2,5
	VARIANÇA		5,81	10,70		0,22	VARIANÇA		5,81	9,07	0,11
DESVIO PADRÃO		2,4	3,3	0,5	DESVIO PADRÃO		2,4	3,0	0,3		

Para o ciclo de imersão e secagem, a proteção consegue atenuar a perda de massa, que é de 2,5%, sendo bem inferior à perda de massa apresentada pelo concreto sem proteção, que foi de 4,9%.

Comparando os resultados obtidos para os dois tipos de ataques, figura 5.7, observa-se que o ciclo de imersão e secagem causa um maior impacto sobre o concreto e a sobre proteção, apresentando, em todas as situações, variação das massas superiores às medidas quando da simples imersão.

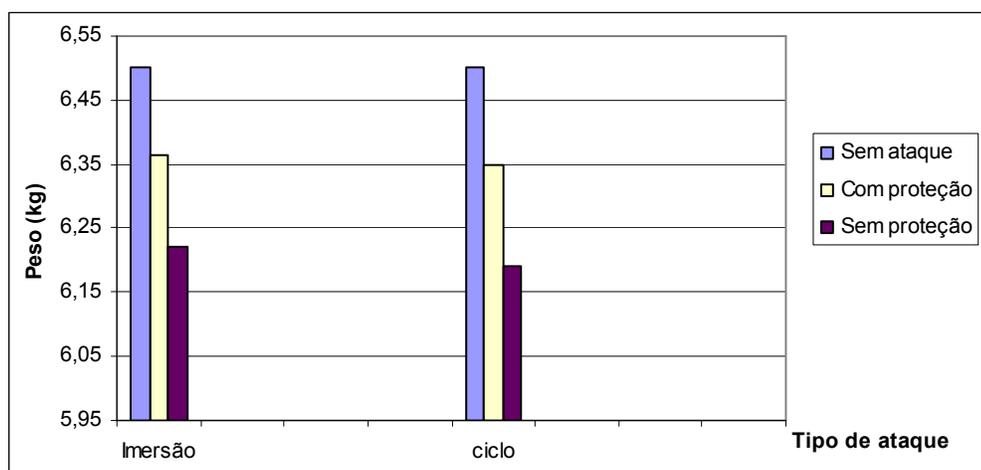


Figura 5.7 – Massa dos corpos de prova com e sem proteção, antes e após ataque

5.4.5 Resistência à compressão

Na avaliação da eficiência da proteção, a capacidade da camada protetora de impedir a perda de resistência à compressão pelo concreto foi feita através da determinação das resistências dos corpos de prova antes e após os ataques, tabela 5.11 e 5.12.

Tabela 5.11 – Avaliação da resistência à compressão antes e após imersão em ácido

Concreto		Imersão			Concreto		Imersão		
		Resistência à compressão (MPa)					Resistência à compressão (MPa)		
		Antes do ataque	Após ataque	Perda (%)			Antes do ataque	Após ataque	Perda (%)
Sem Proteção	1	38,83	30,17	22,3	Com Proteção	1	38,83	36,80	5,2
		38,79	31,13	19,7			38,79	36,42	6,1
	2	38,07	28,73	24,5		2	38,07	36,87	3,2
		38,10	29,94	21,4			38,10	35,88	5,8
	3	37,28	28,72	23,0		3	37,28	35,28	5,4
		36,15	28,20	22,0			36,15	34,35	5,0
		36,25				36,25			
MÉDIA		37,64	29,48	22,2	MÉDIA		37,64	35,93	5,11
VARIANÇA		1,24	1,24	2,54	VARIANÇA		1,24	0,96	1,09
DESVIO PADRÃO		1,1	1,1	1,6	DESVIO PADRÃO		1,1	1,0	1,0

Tabela 5.12 – Avaliação da resistência à compressão antes e após ciclo de imersão

Concreto		Ciclo			Concreto		Ciclo		
		Resistência à compressão (MPa)					Resistência à compressão (MPa)		
		Antes do ataque	Após ataque	Perda (%)			Antes do ataque	Após ataque	Perda (%)
Sem Proteção	1	38,10	25,43	33,3	Com Proteção	1	38,10	32,43	14,9
		37,28	26,32	29,4			37,28	33,02	11,4
	2	36,15	25,71	28,9		2	36,15	31,88	11,8
		36,25	25,11	30,7			36,25	31,45	13,2
	3	35,50	24,64	30,6		3	35,50	31,00	12,7
		35,69	23,86	33,1			35,69	31,23	12,5
		36,95				36,95			
MÉDIA		36,56	25,18	31,00	MÉDIA		36,56	31,84	12,76
VARIANÇA		0,86	0,74	3,40	VARIANÇA		0,86	0,59	1,50
DESVIO PADRÃO		0,9	0,9	1,8	DESVIO PADRÃO		0,9	0,8	1,2

Observa-se que, em ambos os ataques, a perda de resistência do concreto sem proteção é bastante elevada, evidenciando a forte degradação do concreto pelo ácido sulfúrico, sendo que, no caso da imersão, foi obtida uma resistência de 30MPa e para o ciclo de imersão e secagem de 26MPa.

A utilização da camada de proteção epóxi reduziu a perda de resistência do concreto para valores bem inferiores aos obtidos para o concreto sem proteção. Na situação de imersão, a perda de resistência dos corpos de prova pintados foi de 5,1%, bem inferior ao valor encontrado para os corpos de prova sem proteção de 22,2%.

Para a situação em que o concreto foi submetido ao ciclo de imersão e secagem, a proteção conseguiu reduzir a perda de resistência de 32% para 12,9%.

6. CONCLUSÕES

O concreto produzido através da dosagem proposta apresentou resistência à compressão aos 28 dias de 35MPa e absorção de 4%, características fundamentais de um concreto durável, obtidas através da associação de baixo fator água/cimento e aditivo plastificante. Estas características foram alcançadas em função da clareza na concepção do estudo de dosagem e dos cuidados adotados na produção e cura do concreto.

A avaliação da degradação do concreto submetido a ataque em meio ácido foi feita através da imersão de corpos de prova não protegidos, comprovando que, mesmo um concreto com características que atendam aos requisitos de durabilidade, resistência e absorção, demanda uma proteção superficial ao ser submetido a agentes agressivos, a fim de impedir sua deterioração.

A agressividade química foi avaliada através da imersão de corpos de prova em soluções com duas concentrações de ácidos, 2,5% e 3%, sendo possível constatar um nítido aumento da degradação em função da concentração do ácido.

A deterioração causada por imersão de corpos de prova durante 7 dias em ácido sulfúrico foi comparada à deterioração provocada através de ataque por ciclo de imersão e secagem, permitindo verificar que esta é consideravelmente maior que aquela.

As perdas de resistência e de massa que ocorreram após o ataque por ácido sulfúrico demonstraram a importância de se aplicar uma proteção superficial, a fim de garantir a durabilidade do concreto ao reduzir a penetração do agente agressivo.

Neste trabalho foi proposta, como proteção superficial, a tinta epóxi, por sua resistência a ataques químicos e por ter boa aderência ao concreto. A avaliação desta proteção foi feita através da comparação de corpos de prova por inspeção visual e pela análise de perdas de resistência e de massa, para concreto com e sem proteção, evidenciando a redução do impacto dos ataques nos corpos de prova protegidos.

A eficiência da tinta epóxi pôde ser comprovada, mesmo no caso do ciclo de imersão e secagem com ácido sulfúrico, considerado extremamente agressivo, uma vez que esta camada protetora permitiu minimizar a degradação do concreto comparativamente ao um concreto sem proteção.

Pode-se concluir que este estudo está em consonância com as diretrizes contemporâneas que vêm enfatizando a importância de se considerar a durabilidade do concreto já na concepção do projeto, passando pela execução e ao longo da vida útil das estruturas, a fim de garantir o bom desempenho e a segurança das construções, paradigmas fundamentais da Engenharia Civil.

7.REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AITCIN, P.C. The durability characteristics of high performance concrete: a review. *Cement & Concrete Composites*, n.25, p.409-420, 2003.

ALMUSALLAM, A.A.; KHAN, F.M.; DULAIJAN, S.U.; B.AL-AMOUDI, O.S. Effectiveness of surface coatings in improving concrete durability. *Cement & Concrete Composites*, n.25, p.473-481, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORAMAS TÉCNICAS, Rio de Janeiro. NBR-5732; Cimento Portland comum. Rio de Janeiro, 1991. 4p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Rio de Janeiro. NBR-5733; Cimento Portland Alta Resistência Inicial. Rio de Janeiro, 1991. 4p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Rio de Janeiro. NBR-5735; Cimento Portland de Alto Forno. Rio de Janeiro, 1991. 5p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Rio de Janeiro. NBR-5736; Cimento Portland Pozolânico. Rio de Janeiro, 1991. 5p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Rio de Janeiro. NBR-5738; Moldagem e Cura de Corpos de Prova Cilíndricos ou Prismáticos de Concreto. Rio de Janeiro, 1994. 9p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Rio de Janeiro. NBR-6118 (NB-1); Projeto de Estruturas de Concreto. Rio de Janeiro, 2003. 221p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Rio de Janeiro. NBR-7223; Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro 1992. 8p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Rio de Janeiro. NBR-9778; Argamassa e Concreto Endurecidos – Determinação da Absorção de Água, Índice de Vazios e Massa Específica. Rio de Janeiro, 1987. 3p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Rio de Janeiro. NBR-11578; Cimento Portland Composto. Rio de Janeiro, 1991. 5p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Rio de Janeiro. NBR-12653; Materiais Pozolânicos, Rio de Janeiro, 1992. 1p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Rio de Janeiro. NBR-12655; Controle Tecnológico de Materiais Componentes do Concreto, Rio de Janeiro, 1996. 4p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Rio de Janeiro. NBR-1763; Aditivos para Concreto de Cimento Portland. Rio de Janeiro, 1992. 4p.

CAMARINI, G.; Caracterização da durabilidade do concreto pela absorção de água. CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 41, 1999, Salvador. Anais do 41º Congresso Brasileiro do Concreto. Salvador: Instituto Brasileiro do Concreto, 1999.

COUTO, C.; SILVA, J.; STARLING, T. *Materiais de Construção Civil*, 2ª ed. Revisada. Editora UFMG, 103p., 2006.

FERREIRA, G.C.S.; Estudo do comportamento de traços de concreto submetidos a diferentes tipos de cura. CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 49, 2007, Bento Gonçalves. Anais do 49º Congresso Brasileiro do Concreto. Bento Gonçalves: Instituto Brasileiro do Concreto, 2007.

GENTIL, V.; *Corrosão*, 4ª ed. Editora LTC, 341p., 2003.

HELENE, P.R. L. *Manual de dosagem e controle de concreto*, 1ª ed., São Paulo: Editora Pini Ltda, 349p., 1992.

ISAIA, G. C. *Concreto: ensino, pesquisa e realizações, volume I*. 1ª ed., São Paulo: IBRACON, 2005.

ISAIA, G. C. *Concreto: ensino, pesquisa e realizações, volume II*. 1ª ed., São Paulo: IBRACON, 2005

LEONHARDT, F.; MONNIG, E. *Construções de concreto: volume 1: princípios básicos do dimensionamento de estruturas de concreto armado*. Rio de Janeiro: Interciência, 305p, 1977.

MEHTA, P.K. *Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais*, São Paulo: Editora Pini Ltda, 573p., 1994

MOREIRA, H.P. et al. Avaliação da influência de alguns agentes agressivos na resistência à compressão de concretos amassados com diferentes tipos de cimentos brasileiros. *Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP*. São Paulo. 2001

NASCIMENTO, A. A. P. O desempenho de pastas e concretos submetidos ao ataque de ácido sulfúrico. REUNIÃO ANUAL DO INSTITUTO BRASILEIRO DE CONCRETO, 1991, São Paulo: Instituto Brasileiro de Concreto, 1991. p.14-28.

NEVILLE, A. *Propriedades do Concreto*, 2ª Ed. São Paulo: Editora Pini, 828p., 1997.

REPETE, W. L. et al. Proteção do concreto – Uma necessidade em indústria de celulose e papel. *Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP*. São Paulo, 1998.

SATO, N. M. N.; AGOPYAN, V.; Análise da porosidade e de propriedades de transporte de massa em concretos. *Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP*. São Paulo, 2000.

SILVA, J. *Análise da influência de superfícies protetoras na durabilidade do concreto para uso em meio agressivo: uma abordagem topográfica e da estrutura do material*. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 114p. 2006. (Tese, Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Minas).

VEDACIT, Impermeabilizantes. *Manual técnico: Recuperação de estruturas*. 1ª edição, 102p., 2003.

8. BIBLIOGRAFIA

ANDRADE, W. P.; FURNAS CENTRAIS ELETRICAS. *Concretos: massa, estrutural, projetado e compactado com rolo: ensaios e propriedades*. São Paulo: Pini, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Rio de Janeiro. *NBR-7211; Agregados para concreto*. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Rio de Janeiro. *NBR-8953; Concreto para fins estruturais - Classificação por grupos de resistência*. Rio de Janeiro, 1992. 2p.

BALAYSSAC, J. P.; DÉTRICHE, CH. H. *Effects of curing upon carbonation of concrete*. *Construction and Building Materials*, n.2, p.91-95, 1995.

BAUER, L. A.F. *Materiais de construção 1*, 5ª edição, Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos Ed., 435p, 1994.

CLÁUDIO, S.K. *Contribuição para análise da eficiência de películas aplicadas sobre estruturas de concreto armado como o objetivo de proteção contra a carbonatação*, USP – Engenharia civil, Tese de doutorado, 1v, 168p, 1995.

HELENE, P.R. L. *Manual para reparo, reforço e proteção de estruturas de concreto*, 2ª ed. São Paulo: Editora Pini Ltda, 213p., 1992b.

HELENE, P.R.L. *Introdução da durabilidade no projeto das estruturas de concreto. Ambiente construído*, ANTAC, São Paulo, vol. 1, nº 2, p. 45-57, 1997.

HILL, J.; BYARS, E.A.; SHARP, J.H.; LYNSDALE, C.J.; CRIPPS, J.C.; ZHOU, Q. *An experimental study of combined acid and sulfate attack of concrete*. *Cement & Concrete Composites* n.25, p.997-1003, 2003.

NEVILLE, A. The confused world of sulfate attack on concrete. *Cement and Concrete Research*, vol. 34, nº 8, p. 1275-1296, 2004.

NOLAN, É; BASHEER, P. A. M. *Effect of three durability enhancing products on some physical properties of near surface concrete*. Construction and Building Materials, n.5, p.276-272, 1995.

SEBE, J. *Estudo da permeabilidade a água do concreto de alto desempenho*, Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 124p., 2002. (Dissertação, Mestrado em Engenharia de Estruturas).

VIPULANADAN, C.; LIU, J.; *Film model for coated cement concrete*. Cemente & Concrete Research n.32, p.1931-1936, 2002.

BROWN, P.W.; DOERR, A.; *Chemical changes in concrete due to ingress of aggressive species*. Cemente & Concrete Research n.30, p.411-418, 2000.

ANEXOS

Tratamento estatístico

Para se obter uma repetibilidade dos resultados, foram rodados oito concretos produzidos da mesma forma e com o mesmo traço, conforme tabela abaixo.

Tabela A13 – Produção dos corpos de prova

Descrição	Corpos de prova	
	Tamanho (cm)	Quantidade
Concreto 1	5 x 10	6
Concreto 2	5 x 10	6
Concreto 3	10 x 20	6
Concreto 4	10 x 20	6
Concreto 5	10 x 20	6
Concreto 6	10 x 20	12
Concreto 7	10 x 20	12
Concreto 8	10 x 20	12

Na avaliação da repetibilidade dos resultados, foram empregados dois métodos de análise de dados. O primeiro e mais usado pela engenharia civil, chamado de controle tecnológico do concreto, preconizado pela norma NBR12655 Concreto – Preparo, controle e recebimento. O segundo tratamento de dados foi feito utilizando as fórmulas da estatística clássica.

Critério para a fixação do valor da resistência de dosagem

A diferença entre o valor da média e o valor abaixo do qual se situa um determinado número de resultados é expressa por t_s , onde t é chamado de afastamento reduzido segundo a curva de distribuição e frequência.

$$t_s = f_{c,j} - f_{ck} \quad (1)$$

O valor de t depende da probabilidade das ocorrências de valores abaixo do f_{ck} e é definido por tabelas.

Controle tecnológico do concreto

O objetivo deste método é estabelecer um valor para o $f_{ck,est}$, que deve ser calculado de acordo com o tipo de controle e o número de exemplares adotados, pelo controle estatístico do concreto por amostragem parcial ou por amostragem total (100%).

A escolha dos corpos de prova para avaliação da resistência deve ocorrer de modo aleatório em número suficiente para representar todo o volume de concreto necessário para a execução da estrutura.

Para representatividade do controle tecnológico, cada lote de concreto deverá ser formado por 1 amostra com n exemplares e cada exemplar será composto por 2 corpos de prova da mesma betonada. A resistência do exemplar, em cada idade ensaiada, será representada pelo maior dos dois valores.

Controle estatístico do concreto por amostragem parcial

Para lotes com número de exemplares de **6 < n < 20**:

$$f_{ck,est} = \frac{2(f_1 + f_2 + f_3 + \dots + f_{m-1})}{m-1} - f_m \quad m = \frac{n}{2} \quad (2)$$

Sendo,

n = número de exemplares - despreza-se o valor mais alto se "n" for ímpar

$f_{ck,est}$ = resistência característica estimada

f_1, f_2, \dots, f_m = Valores em ordem crescente da resistência dos exemplares.

Para lotes com número de exemplares **n ≥ 20**

$$f_{ck,est} = f_{cm} - 1,65s_d \quad (3)$$

f_{cm} = resistência média dos n exemplares do lote

s_d = desvio padrão do lote

Controle estatístico do concreto por amostragem total (100%)

Aplicado em casos especiais onde a amostra do concreto corresponde a todas as betonadas não havendo limitação para o número de exemplares do lote.

Lotes com número de exemplares $n < 20 \rightarrow f_{ck, est} = f_i$

Lotes com número de exemplares $n > 20 \rightarrow f_{ck, est} = f_i$

Onde: $i = 1 + 0,05 \times n$ (Quando o valor de i for fracionário adota-se o número inteiro imediatamente superior).

Aceitação Automática

A aceitação do concreto é automática quando é satisfeita a condição de resistência proposta na dosagem:

$$f_{ck, est} > f_{ck}$$

$f_{ck, est}$ = Valor estimado do f_{ck}

Caso o valor encontrado para o $f_{ck, est}$ for inferior ao f_{ck} , a aceitação automática não é possível, o que pode resultar na alteração do traço ou do processo produtivo do concreto em estudo.

Resistência à compressão a 28 dias

A verificação da aceitação do concreto proposto, através da avaliação da resistência à compressão, foi feita através do controle estatístico por amostragem parcial devido ao número de amostras ser inferior a 20.

Tabela A14 – Amostra dos corpos de prova

Exemplares	$F_{c,28}$ (MPa)	Ordenação dos valores
n1	35,12	F7
n2	32,34	F2
n3	34,15	F4
n4	34,29	F5
n5	30,8	F1
n6	33,4	F3
n7	35,0	F6
n8	39,7	F8

$$f_{ck} = 30 \text{ MPa} \quad n = 8$$

$$f_{ck,est} = \frac{2(f_1 + f_2 + f_3 + \dots + f_{m-1})}{m-1} - f_m \quad m = 4$$

$$f_{ck,est} = \frac{2(30,8 + 32,34 + 33,4)}{4-1} - 34,15 = 30,21 \text{ MPa}$$

O valor de $f_{ck,est}$ de 30,21MPa foi superior ao valor para o f_{ck} estipulado resultando na aceitação automática do concreto.

Tratamento estatístico clássico.

No estudo estatístico foram calculados a média, a variância, o desvio padrão e o intervalo de confiança conforme mostrado na tabela abaixo:

Tabela A15 – Estatística aplicada

Variável	Formula	Definição
Variável	$x: x_1, x_2, \dots, x_n$	Valor de uma grandeza.
Amostra	N	Número de medidas.
Média amostral ou média aritmética	$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$	Valor mais provável de uma série de medidas, para medidas de mesmo peso.
Variância amostral	$S_x^2 = \frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{N-1}$	Índice de dispersão e corresponde a distância dos valores individuais em relação à média.
Desvio padrão amostral	$S_x = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{(N-1)}}$	Representa o grau de reprodutibilidade das medidas e sua precisão.