

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CONSTRUÇÃO CIVIL

**ANÁLISE DA DURABILIDADE DE CONCRETO LEVE DE ARGILA
EXPANDIDA COM CAMADA PROTETORA SUBMETIDO A MEIO
AGRESSIVO ÁCIDO**

Autor: Felipe de Souza Abreu

Orientadora: Profa. Dra. Carmen Couto Ribeiro

Belo Horizonte

Dezembro/2014

Felipe de Souza Abreu

**ANÁLISE DA DURABILIDADE DE CONCRETO LEVE DE ARGILA
EXPANDIDA COM CAMADA PROTETORA SUBMETIDO A MEIO
AGRESSIVO ÁCIDO**

Dissertação apresentada a Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Construção Civil. Área de concentração: Materiais de Construção Civil. Linha de pesquisa: Materiais cimentícios.

Orientadora: Profa. Dra. Carmen Couto Ribeiro

Belo Horizonte
Escola de Engenharia da UFMG
2014

A162a	<p>Abreu, Felipe de Souza.</p> <p>Análise da durabilidade de concreto leve de argila expandida com camada protetora submetido a meio agressivo ácido [manuscrito] /Felipe de Souza Abreu. – 2014.</p> <p>57 f., enc.: il.</p> <p>Orientadora: Carmen Couto Ribeiro.</p> <p>Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.</p> <p>Inclui bibliografia.</p> <p>1. Engenharia civil - Teses. 2. Construção civil -Teses. 3. Concreto leve -Teses. 4. Pintura acrílica -Teses. I. Ribeiro, Carmen Couto. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.</p> <p>CDU: 624(043)</p>
-------	--

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

**ANÁLISE DA DURABILIDADE DE CONCRETO LEVE DE ARGILA
EXPANDIDA COM CAMADA PROTETORA SUBMETIDO A MEIO
AGRESSIVO ÁCIDO**

Felipe de Souza Abreu

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Construção Civil e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-graduação em Construção Civil do Departamento de Engenharia de Materiais e Construção da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais.

Belo Horizonte, 16 de dezembro de 2014

Comissão examinadora:

Profa. Dra. Carmen Couto Ribeiro (Orientadora)
Escola de Engenharia da UFMG

Profa. Dra. Joana Darc Silva Pinto
Departamento de Engenharia Civil da PUC Minas

Profa. Dra. Júnia Nunes de Paula
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

Aos meus pais e irmão.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos aqueles que, de alguma forma, colaboraram na realização deste trabalho e, em especial:

Aos meus pais, pelo amor, pela formação do meu caráter, apoio constante e pelo exemplo de vida;

Ao meu irmão, pelo incentivo e carinho;

À minha namorada, pelo apoio e compreensão em todos os momentos;

Aos meus familiares e, em especial, aos meus tios, primos e avó;

À Prof.^a Carmen Couto Ribeiro, pela confiança e dedicação no desenvolvimento de todo trabalho, por ter contribuído de forma significativa na minha capacidade de análise crítica e visão da sociedade, bem como pela ética, entusiasmo e compromisso;

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

À Prof.^a Joana Darc Silva Pinto, da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, pelo exemplo como pesquisadora, interesse e por suas observações e apoio durante o período de estudos;

À Ivonete dos Santos Magalhães, secretária da pós-graduação, pela dedicação e presteza na solução de questões acadêmicas. E aos professores do Departamento de Engenharia de Materiais e Construção da UFMG;

Aos funcionários do Departamento de Engenharia de Materiais e Construção da UFMG, Adimilson Caetano e Ariela Monteiro pelo apoio e presteza;

Aos técnicos do laboratório de Materiais de Construção da UFMG, Ricardo Barbosa e Éderson Correa, pelo apoio e dedicação em todas as etapas de ensaios dos concretos;

Aos colegas da graduação e do mestrado, pela amizade e auxílio no caminhos do mestrado;

A todos os meus amigos e, em especial, àqueles que contribuíram nesta pesquisa.

RESUMO

O concreto leve possui massa específica reduzida, tornando possível a utilização de seções menores e conseqüentemente reduzindo o dimensionamento das fundações. Atualmente a constatação que problemas relativos a durabilidade têm ocasionado a deterioração da estrutura, indica a necessidade de desenvolver novos materiais e métodos visando aumentar a qualidade do concreto. O concreto quando submetido a condições de exposição adversas deve ser protegido, visando manter a absorção de água e a corrosão superficial em níveis aceitáveis.

Este trabalho apresenta a avaliação de um concreto de referência e um concreto leve protegidos por tinta acrílica e também por tinta epóxi, submetidos a meio agressivo ácido (H_2SO_4 a 2,5%) por imersão. A partir dos estudos de dosagens foi selecionado um concreto de referência produzido com 370 kg/m^3 de cimento e relação água/cimento de 0,50, valor estabelecido pela NBR 6118 (2014), que normaliza os tipos de concretos sujeitos a ambientes altamente agressivos. O concreto leve produzido apresentou massa específica de 1.740 kg/m^3 , consistência seca e resistência à compressão de 30 MPa. A avaliação por inspeção visual demonstrou que os corpos de prova de concreto leve com proteção superficial apresentaram uma diminuição da perda de coesão da pasta causada pelo ataque. Nos ensaios de absorção de água e de perdas de massa, foi observado um bom desempenho da proteção acrílica e também da proteção epóxi, impedindo a penetração do agente agressivo nos concretos com proteção superficial. Esta pesquisa permite comprovar que as camadas protetoras avaliadas apresentaram boa aderência ao substrato e demonstraram sua eficiência ao reduzir a penetração do agente agressivo, minimizando a degradação e aumentando a durabilidade do concreto leve de argila expandida.

Palavras-chave: Concreto leve, durabilidade, tinta acrílica, tinta epóxi.

ABSTRACT

The lightweight concrete has reduced specific mass, providing the use of smaller sections and thereby reducing the design of foundations. Now a day the problems concerning durability has occasioned by deterioration of the structure, indicating the need to develop new materials and methods to increase the quality of concrete. The concrete when exposed to adverse conditions must be protected to maintain the absorption and surface corrosion at acceptable levels.

This paper presents the assessment of a reference concrete and a lightweight expanded clay concrete protected by an acrylic layer and also protected by an epoxy layer, exposed to an aggressive environment (H_2SO_4 2, 5%) immersion. From de dosages studies, was selected a concrete prepared with 370kg/m^3 of cement and the water-binder ratio of 0.50 corresponds to the value established in NBR 6118 (2014) types for concrete subjected to highly aggressive environments. The lightweight concrete produced presented specific mass of $1,740\text{kg/m}^3$, dry consistency and compressive strength of 30 MPa. Visual inspection shows that the protected bodies of proof of lightweight concrete presented a clear reduction of the loss of cohesion of the paste caused by the attack as well as lower water absorption and mass loss. In water absorption and mass loss tests, was observed a good performance of acrylic protection and, also of epoxy protection, preventing the penetration of aggressive agents in concretes with surface protections. This research allows proving that the layers assessed as surface protectors presented a good adherence level to the substrate and efficiency, reducing the penetration of the aggressive agent, thus minimizing degradation and increasing durability of the lightweight expanded clay concrete.

Keywords: Lightweight concrete, durability, acrylic paint, epoxy paint.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. OBJETIVO.....	2
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
3.1 Concreto e suas propriedades.....	3
3.1.1 <i>Dosagem do concreto</i>	4
3.1.2 <i>Resistência à compressão do concreto endurecido</i>	6
3.1.3 <i>Comportamento do concreto quanto às deformações</i>	7
3.1.4 <i>Zona de transição pasta/agregado</i>	9
3.1.5 <i>Cura do concreto</i>	10
3.1.6 <i>Permeabilidade e absorção de água.....</i>	12
3.1.7 <i>Durabilidade do concreto.....</i>	12
3.2 Concreto Leve.....	15
3.3 Mecanismos de ataque ao concreto	24
3.4 Proteção do concreto a ataque externo	25
4. METODOLOGIA.....	27
4.1 Caracterização dos materiais.....	27
4.1.1 <i>Cimento Portland.....</i>	27
4.1.2 <i>Agregado miúdo.....</i>	28
4.1.3 <i>Agregado graúdo</i>	28
4.2 Composição de métodos de dosagem.....	29
4.3 Produção dos Concretos	29
4.4 Análise dos concretos no estado fresco	31
4.5 Análise dos concretos no estado endurecido.....	32
4.6 Camadas protetoras dos concretos.....	33
4.7 Ataque por ácido aos concretos	34
4.8 Perdas de massa	34
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	35
5.1 Caracterização dos materiais.....	35
5.1.1 <i>Cimento Portland.....</i>	35
5.1.2 <i>Agregado Miúdo</i>	35

<i>5.1.3 Agregados Graúdos</i>	36
<i>5.1.4 Água</i>	37
<i>5.1.5 Aditivos</i>	38
5.2 Dosagem dos concretos	38
5.3 Análise dos concretos no estado fresco	39
5.4 Resistência à compressão dos concretos antes do ataque	40
5.5 Zona de transição pasta/agregado	43
5.6 Ataque por ácido aos concretos	44
5.7 Inspeção visual dos corpos de prova	44
5.8 Resistência à compressão dos concretos após o ataque	49
5.9 Influência da absorção de água dos concretos antes e após ataque com ácido	51
5.10 Perdas de massa dos concretos	52
6. CONCLUSÃO	53
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	55

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Gráfico de tensão-deformação da pasta de cimento, do agregado e do concreto.	7
Figura 3.2 – Comportamento da tensão-deformação do concreto sob compressão uniaxial.	8
Figura 3.3 – Formação da zona de transição no concreto de referência e leve:.....	9
(a) Concreto de referência e (b) Concreto Leve.....	9
Figura 3.4 – Influência das condições de cura sobre a resistência.....	11
Figura 3.5 – Agregado leve, argila expandida.	17
Figura 3.6 – Espectro dos agregados leves e dos concretos correspondentes.....	22
Figura 4.1 – Ensaio de abatimento do tronco de cone – “Slump”.	31
Figura 4.2 – Ruptura do concreto à compressão.....	32
Figura 5.1 – Curva granulométrica da areia.....	36
Figura 5.2 – Curvas granulométricas da argila expandida e brita de gnaiss caracterizada comparadas a curva da brita 0.....	37
Figura 5.3 – Produção do concreto leve em betoneira.....	38
Figura 5.4 – Abatimento de tronco de cone “Slump” do concreto de referência.....	39
Figura 5.5 – Abatimento de tronco de cone “Slump” do concreto leve.....	39
Figura 5.6 – Resistência à compressão x Idade de Ruptura – Dosagens do Concreto de Referência.	41
Figura 5.7 – Resistência à compressão x Idade de Ruptura – Dosagens do Concreto Leve.	41
Figura 5.8 – Resistência à compressão antes do ataque ácido x Idade de Ruptura.....	42
Figura 5.9 – Zona de transição após rompimento:.....	43
(a) Concreto de referência e (b) Concreto Leve.....	43
Figura 5.10 – Corpos de prova 10x20cm imersos em solução de ácido sulfúrico (H_2SO_4) a 2,5%.	44
Figura 5.11 – Concreto de referência sem proteção submetido ao ataque ácido por 7 dias: (a) antes do ataque e (b) após ataque.	45
Figura 5.12 – Concreto leve sem proteção submetido ao ataque ácido por 7 dias: (a) antes do ataque e (b) após ataque.	45

Figura 5.13 – Concreto referência com proteção acrílica submetido ao ataque ácido por 7 dias: (a) antes do ataque e (b) após ataque.....	46
Figura 5.14 – Concreto leve com proteção acrílica submetido ao ataque ácido por 7 dias: (a) antes do ataque e (b) após ataque.	46
Figura 5.15 – Concreto de referência com proteção epóxi submetido ao ataque ácido por 7 dias:(a)antes do ataque e (b) após ataque.....	47
Figura 5.16 – Concreto leve com proteção epóxi submetido ao ataque ácido por 7 dias: (a) antes do ataque e (b) após ataque.	47
Figura 5.17 – Concreto de referência submetido ao ataque ácido por 7 dias: (a) sem proteção ,(b) com proteção acrílica, (c) com proteção epóxi, após ataque.	48
Figura 5.18 – Concreto leve submetido ao ataque ácido por 7 dias: (a) sem proteção, (b) com proteção acrílica, (c) com proteção epóxi, após ataque.	48
Figura 5.19 – Resistência à compressão após ataque para o concreto de referência e para o concreto leve, com e sem proteção	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Desvio padrão para cada tipo de controle.	5
Tabela 3.2 – Classes de resistência do concreto estrutural.	6
Tabela 3.3 – Classes de agressividade do ambiente.	13
Tabela 3.4 – Cobrimento de armadura correspondentes a cada classe de agressividade.	13
Tabela 3.5 – Relação água/cimento correspondente a cada classe de agressividade.	15
Tabela 3.6 – Classificação dos agregados segundo sua massa unitária.	19
Tabela 3.7 – Agregados leves naturais e artificiais.	20
Tabela 3.8 – Limites inferiores e superiores de massa retida acumulada nas peneiras da série normal para o agregado miúdo.	21
Tabela 3.9 – Limites inferiores e superiores de massa retida acumulada nas peneiras da série normal para o agregado graúdo.	22
Tabela 3.10 – Características complementares a avaliação da qualidade do agregado.	23
Tabela 5.1 – Ensaio Caracterização do Cimento Portland CP II-E-32.	35
Tabela 5.2 – Ensaio de Caracterização Areia.	35
Tabela 5.3 – Ensaio de caracterização da brita de gnaiss e argila expandida.	36
Tabela 5.4 – Estudo comparativo de dosagem dos concretos.	40
Tabela 5.5 – Resistência à compressão dos concretos antes do ataque ácido.	42
Tabela 5.6 – Resistência à compressão dos concretos antes e após ataque químico.	49
Tabela 5.7 – Absorção de água e massa específica do concreto de referência e do concreto leve.	51
Tabela 5.8 – Perdas de massa antes e após ataque por ácido sulfúrico 2,5%.	52

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

a/c	Água/Cimento
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABPC	Associação Brasileira de Cimento Portland
ACI	American Concrete Institute
ASTM	American Society for Testing and Materials, Philadelphia (USA)
COPASA	Companhia de Saneamento de Minas Gerais
CP	Cimento Portland
dm ³	Decímetro cúbico
fcj	Resistência do concreto à compressão prevista para a idade de j dias
fc _k	Resistência característica do concreto à compressão especificada no projeto
INT	Instituto Nacional de Tecnologia
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo
ITERS	Instituto Tecnológico do Rio Grande do Sul
Kg	Quilo
m ³	Metro cúbico
MF	Módulo de Finura
M _f	Massa seca após o ataque
MPa	Mega Pascal
M _s	Massa seca antes do ataque
NBR	Norma Brasileira Registrada
PM	Perdas de massa
S _d	Desvio Padrão em função do grau de controle da obra

1. INTRODUÇÃO

O crescimento acelerado da construção civil vem demandando mudanças tecnológicas que têm como objetivo aumentar a produtividade, a competitividade e a qualidade das edificações, uma vez que, o emprego de tecnologias adequadas permite garantir a durabilidade das construções.

Atualmente o déficit habitacional no Brasil e no mundo ainda é muito significativo, os governos vêm dando incentivos para a construção de habitações que possam aliar qualidade dos materiais, velocidade e baixo custo da construção, visando atender a esta demanda.

Nesta perspectiva, a utilização do concreto leve está se ampliando, pelo aumento da utilização de elementos pré-moldados e por ter menor massa específica, permite uma diminuição nos custos de transporte e uma maior facilidade de aplicação.

O peso próprio das estruturas de concreto representa uma grande parte da carga atuante, portanto, a redução da massa específica do concreto se torna interessante. Dessa forma é possível utilizar seções menores e conseqüentemente, reduzir o dimensionamento das fundações.

Recentemente foram identificadas diversas estruturas em estado avançado de deterioração por problemas relacionados à durabilidade. Portanto, a necessidade de desenvolver novos materiais e métodos visando aumentar a qualidade do concreto às substâncias nocivas que possam deteriorá-lo e proteções superficiais.

Neste trabalho foi feita a análise da durabilidade do um concreto leve de argila expandida com proteção superficial, a partir de uma comparação entre o concreto leve em estudo e um concreto de referência, com e sem proteção quando submetidos ao meio agressivo ácido, a fim de avaliar a minimização dos efeitos do ataque por ácido sulfúrico.

2. OBJETIVO

Esta dissertação tem como objetivo avaliar a durabilidade de um concreto leve de argila expandida com proteção superficial, comparativamente à um concreto de referência, também protegido, submetidos a meio agressivo ácido, a partir das seguintes etapas:

- Composição de métodos de dosagem com o objetivo de se obter um concreto de referência e um concreto leve com a resistência à compressão proposta neste estudo;
- Produção e seleção de concreto de referência e concreto leve aliando a resistência proposta aos requisitos de durabilidade;
- Realização de ensaios de absorção de água por imersão para verificar a influência da porosidade na vulnerabilidade dos concretos ao ingresso do agente agressivo avaliado;
- Avaliação da degradação do concreto de referência e do concreto leve, com e sem proteção, após imersão em ácido sulfúrico durante sete dias;
- Verificação do desempenho de dois tipos de camadas protetoras superficiais, tinta acrílica e tinta epóxi, aplicadas em corpos de prova do concreto de referência e do concreto leve em estudo.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esta revisão bibliográfica aborda conceitos sobre o concreto, seus materiais constituintes, sua estrutura e a análise de algumas de suas propriedades como resistência, impermeabilidade e durabilidade. A durabilidade do concreto está diretamente ligada à qualidade dos materiais, ao processo de produção, aos cuidados na sua utilização e, nos dias de hoje, ao uso de proteções.

Após a constatação de 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.

3.1 Concreto e suas propriedades

O concreto é um material de larga aplicação na construção civil obtido pela composição de cimento, agregados e água, podendo conter aditivos que também influenciam o seu desempenho. A proporção de seus componentes (dosagem ou traço) deve atender às condições requeridas de resistência, trabalhabilidade e durabilidade, que são propriedades fundamentais do concreto. A resistência fornece normalmente uma indicação geral de sua qualidade por estar diretamente relacionada com a estrutura da pasta de cimento endurecida (Ribeiro et al., 2013).

O concreto fresco deve ter uma trabalhabilidade adequada às condições de utilização, definidas pelo transporte, lançamento e adensamento. O concreto endurecido deve ter suas características definidas pela resistência aos esforços mecânicos a que será submetido e pelas questões relativas à durabilidade (Ribeiro et al., 2013).

3.1.1 Dosagem do concreto

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

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.

O método de dosagem do American Concrete Institute (ACI) é o mais tradicional e se baseia principalmente na relação água/cimento. Outros métodos adotados bastante conhecidos são: o da Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), o do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT), Instituto Tecnológico do Rio Grande do Sul (ITERS) e o do Instituto Nacional de Tecnologia (INT) (ACI 1973; Val, 2007).

A dosagem experimental pode ser realizada a partir da fixação da relação água/cimento, que depende da resistência de dosagem, das características da obra e da definição de uma trabalhabilidade compatível com os materiais e com a utilização do concreto (Ribeiro et al., 2013).

O objetivo do controle da resistência à compressão do concreto é a obtenção de um valor potencial, único e característico da resistência à compressão de um certo volume de concreto, a fim de comparar esse valor com aquele que foi especificado no projeto estrutural e, conseqüentemente, tomado como referência para o dimensionamento da estrutura (Helene, 1992).

O valor da resistência de dosagem, conhecido como f_{cj} , visa garantir que seja assegurado o valor de f_{ck} especificado no projeto. De acordo com a Norma Brasileira, a resistência de dosagem é calculada pela Equação 3.1 (NBR 12655, 1996);

$$f_{cj} = f_{ck} + 1,65 S_d \quad (3.1)$$

Onde:

f_{cj} - resistência média do concreto à compressão, prevista para a idade de j dias, em megapascals (normalmente adotado $j=28$ dias);

f_{ck} - resistência característica do concreto à compressão, em megapascals;

S_d - desvio padrão;

O desvio padrão varia de acordo com o controle de preparo do concreto e está definido na Tabela 3.1, que apresenta os valores do desvio padrão para cada controle.

Tabela 3.1 – Desvio padrão para cada tipo de controle.

Controle	Desvio Padrão S_d (MPa)	Condições de Preparo
A	4,0	Aplicável às classes C10 até C80 – o cimento e os agregados são medidos em massa, a água de amassamento é medida em massa ou volume com dispositivo dosador e corrigida em função da umidade dos agregados.
B	5,5	Aplicável às classes C10 até C25 – o cimento é medido em massa, a água de amassamento é medida em massa ou volume com dispositivo dosador e os agregados medidos em volume. O volume de agregados miúdos é corrigido através da curva de inchamento estabelecida especificamente para o material utilizado.
C	7,0	Aplicável apenas aos concretos de classe C10 e C15 - o cimento é medido em massa e os agregados são medidos em volume.

Fonte: NBR 12655, 1996 apud Ribeiro et al., 2013

Calculada a resistência de dosagem, deve ser adotado um dos métodos de dosagem experimental, para definir as proporções adequadas de cimento, areia, brita e água, que são os materiais constituintes do concreto.

3.1.2 Resistência à compressão do concreto endurecido

A resistência à compressão do concreto é um importante parâmetro para se avaliar a qualidade do concreto. Normalmente, a resistência à compressão do concreto, à uma idade determinada, curado à uma temperatura estabelecida, depende fundamentalmente de dois fatores: da relação água/cimento e do grau de adensamento. Este valor de resistência à compressão é inversamente proporcional à relação água/cimento, desde que o concreto seja plenamente adensado, ou seja, com um menor número de vazios (NBR 6118, 2014).

O concreto estrutural é classificado por grupos de resistência, sendo dividido em 2 grupos, em função do f_{ck} e da resistência característica à compressão especificada no projeto estrutural. A Tabela 3.2 especifica as classes de cada grupo, sendo que os concretos do Grupo I começam com f_{ck} 20 MPa e vão até f_{ck} 50 MPa. Os concretos do Grupo II são considerados de alto desempenho, começam com f_{ck} 55 MPa e atingem até f_{ck} 100 MPa (NBR 8953, 2011).

Tabela 3.2 – Classes de resistência do concreto estrutural.

Grupo	Classe de Resistência	Resistência Característica à Compressão (MPa)
I	C20	20
	C25	25
	C30	30
	C35	35
	C40	40
	C45	45
	C50	50
II	C55	55
	C60	60
	C70	70
	C80	80
	C90	90
	C100	100

Fonte: NBR 8953, 2011

A resistência à compressão é o principal parâmetro utilizado no cálculo da dosagem e controle de qualidade dos concretos, como por exemplo: pela dedução teórica, adotando como referência o modelo de Abrams, através de uma equação que explicita os fatores intervenientes e permite avaliar a influência relativa de cada um na variabilidade total do concreto.

3.1.3 Comportamento do concreto quanto às deformações

O comportamento do concreto, quanto às deformações, pode ser analisado através do estudo do diagrama tensão-deformação de corpos de prova cilíndricos submetidos à compressão. A partir de curvas típicas tensão-deformação para agregado, pasta endurecida e concreto, carregados e submetidos à em compressão uniaxial, Figura 3.1, torna-se imediatamente aparente a constatação de que, em relação ao agregado e à pasta de cimento, o concreto não é realmente um material elástico (Mehta e Monteiro, 1994)

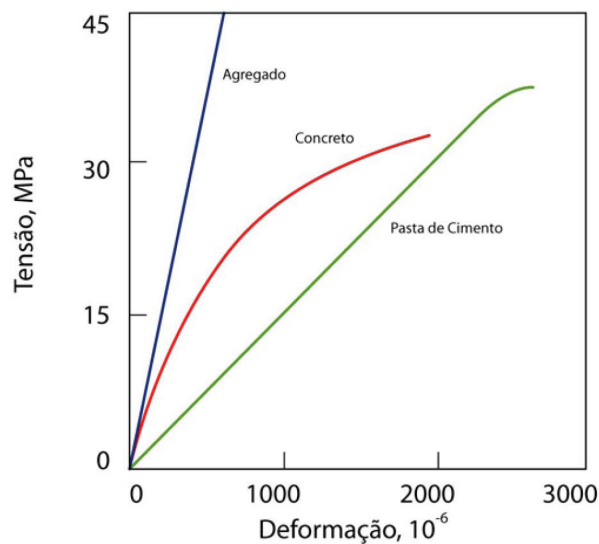


Figura 3.1 – Gráfico de tensão-deformação da pasta de cimento, do agregado e do concreto.
Fonte: Mehta e Monteiro, 1994

Do ponto de vista da relação entre o nível de tensão (expressa como percentagem da carga última) e a microfissuração no concreto, na Figura 3.2, estão apresentados quatro estágios do comportamento do concreto. Hoje em dia, é bem conhecido que, mesmo antes da aplicação de carga externa, já existem microfissuras na zona de transição entre a matriz e o agregado graúdo no concreto. O número e as aberturas destas fissuras em uma peça de concreto dependeriam, entre outros fatores, das características de exsudação, resistência da zona de transição e da história da cura do concreto. Sob condições normais de cura, devido às diferenças nos seus módulos de deformação, deformações diferenciais surgirão entre a matriz e o agregado graúdo, causando fissuras na zona de transição. Abaixo de cerca de 30% da carga última, as fissuras da zona de transição permanecem estáveis. Portanto, a curva tensão-deformação permanece linear e, a partir desse valor, começam a aumentar em comprimento, abertura e quantidade, criando uma interligação e formando um sistema contínuo de fissuras (Mehta e Monteiro, 1994).

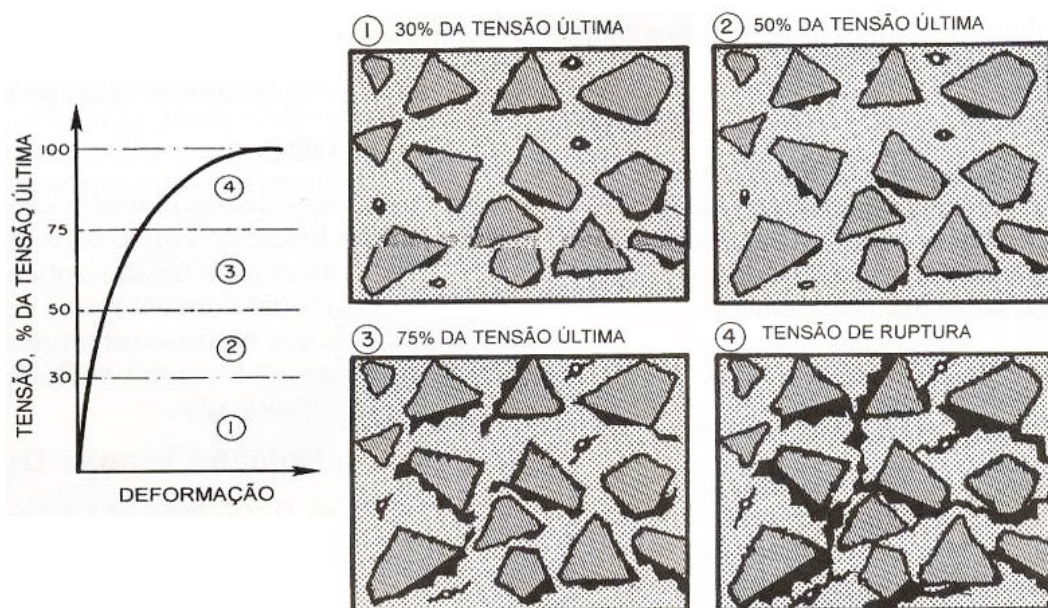


Figura 3.2 – Comportamento da tensão-deformação do concreto sob compressão uniaxial.
Fonte: Mehta e Monteiro, 1994

3.1.4 Zona de transição pasta/agregado

Para se obter um ganho de resistência, além do aumento da quantidade de cimento, uma alternativa é 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 apud Val, 2007).

Existe uma forte relação entre a espessura, a qualidade da zona de transição, com as propriedades mecânicas e a durabilidade dos concretos, o que indica a grande importância do estudo da zona de transição visando à melhoria do desempenho do concreto (Rossignolo, 2009b).

A natureza da interação entre os agregados leves e a pasta de cimento depende essencialmente do teor de umidade e da porosidade permeável da região externa do agregado. Quando os agregados leves utilizados são previamente saturados ou apresentam uma camada externa com baixa porosidade permeável, a natureza da microestrutura da zona de transição será muito próxima da observada nos concretos com agregados convencionais (Rossignolo, 2009b).

A Figura 3.3 (a) apresenta uma representação esquemática da zona de transição do concreto de referência e a Figura 3.3 (b) do concreto leve.

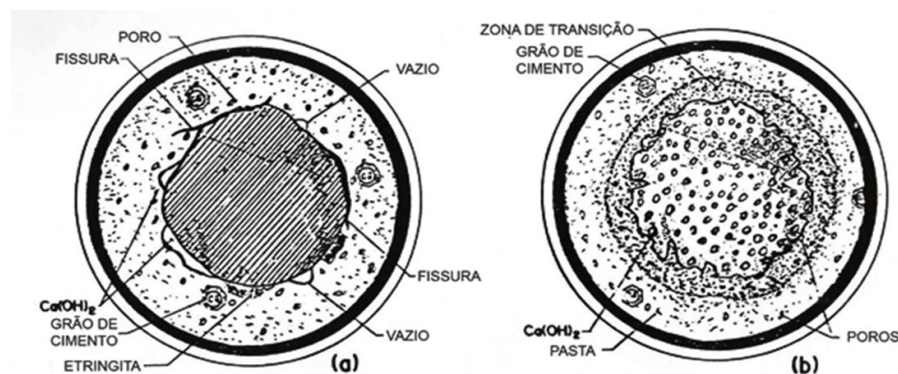


Figura 3.3 – Formação da zona de transição no concreto de referência e leve:
(a) Concreto de referência e (b) Concreto Leve

Fonte: Vaysburd, 1992

A zona de transição dos concretos com argila expandida, apresenta menor porosidade e maior teor de grãos não hidratados de cimento Portland, quando comparada a zona de transição do concreto com brita basáltica (Rossignolo, 2009b).

Estudos recentes relatam que a cura interna reduz as fissuras por retração do concreto em sua idade inicial. A absorção de água pelos agregados leves é uma forma de fazer este tipo de cura do concreto, a saturação destes agregados antes da mistura traz benefícios a cura do concreto, principalmente na sua idade inicial. A redução destas fissuras evita a penetração de água no concreto e por sua vez melhora a durabilidade (Jinhwan et al, 2012).

A utilização de agregados como a argila expandida, que possui alta taxa de absorção de água, resulta em uma cura adicional interna do concreto. A zona de transição pasta/agregado leve, recebe umidade de forma contínua, o que faz com que sua resistência aumente. A cura da zona de transição pasta/agregado favorece a redução da permeabilidade do concreto, pois reduz os poros em torno do agregado que possui alta taxa de absorção. Portanto, a cura interna, além de beneficiar a resistência mecânica, também garante a durabilidade deste concreto (Vaysburd, 1992).

3.1.5 Cura do concreto

A cura do concreto tem como finalidade evitar a evaporação da água necessária à hidratação do cimento. As condições de umidade e temperatura têm grande importância nas primeiras idades, a fim de garantir as propriedades do concreto. A saída precoce de água da mistura aumenta o volume de vazios, além de não ser suficiente para hidratar o cimento até o concreto atingir sua resistência final.

A NBR 6118 (2014) recomenda que a superfície do concreto seja umedecida ou protegida com película impermeável, pelo menos durante os 7 primeiros dias após o lançamento, para que o concreto não perca água. A necessidade da cura é devida ao fato de que a hidratação do cimento só pode ocorrer nos capilares cheios de água. A perda de água depende da temperatura, umidade relativa do ar e velocidade do vento (Neville, 1997).

Para evitar a fissuração superficial, a superfície do concreto deve ser protegida, a fim de impedir a perda de água, que pode ocorrer mesmo antes da pega, depois da pega, a cura pode ser feita com aspersão de água. É preciso ressaltar que secagens prematuras resultam em camadas superficiais porosas e com baixa resistência ao ataque de agentes agressivos (Helene, 1997).

A cura adequada favorece a durabilidade do concreto, além das suas propriedades desejáveis, como resistência mecânica, permeabilidade e conseqüentemente resistência contra ataques.

Mehta e Monteiro (1994) apresentam um estudo sobre a influência da umidade de cura sobre a resistência de concretos com a mesma relação água/cimento, Figura 3.4, demonstrando que, após 180 dias, o concreto curado sob condições continuamente úmidas, apresentou uma resistência três vezes maior do que o concreto curado ao ar.

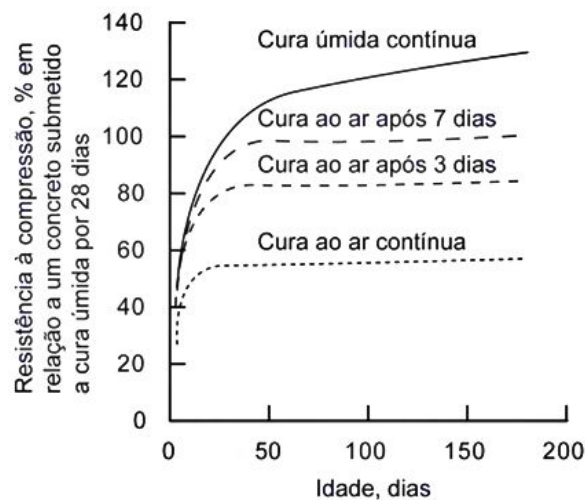


Figura 3.4 – Influência das condições de cura sobre a resistência.
Fonte: Mehta e Monteiro (1994)

A cura do concreto pode ser realizada de diversas maneiras dentro do canteiro de obras, algumas delas são: irrigação periódica, cobertura da superfície com manta úmida e a cobertura com materiais impermeáveis.

3.1.6 Permeabilidade e absorção de água

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.

Um dos principais fatores que determinam a permeabilidade do concreto é a relação água/cimento, pois a saída da água deixa vazios, outro fator é a incorporação de ar durante a mistura dos seus constituintes. A interconexão destes vazios tornam o concreto permeável a água, ou seja, quanto maior a resistência da pasta, menor é a sua permeabilidade (Petrucci, 1980).

A absorção é o processo físico pelo qual o concreto retém água nos poros e condutos capilares e é medida, normalmente, secando uma amostra até a constância de massa, imergindo-a, em seguida, em água e determinando o acréscimo de massa expressa em porcentagem de massa seca (NBR 9778, 2005).

A absorção de água não pode ser usada como medida da qualidade de um concreto, porém grande parte dos concretos de boa qualidade têm absorção abaixo de 10% (Neville, 1997). Portanto, um concreto durável tem que ser impermeável, dificultando a penetração de substâncias agressivas.

3.1.7 Durabilidade do concreto

Um concreto durável é aquele que resiste às condições para o qual foi projetado, sem deterioração, por muitos anos. As estruturas de concreto devem ser projetadas e construídas de modo que, sob as condições ambientais previstas no projeto e quando utilizadas corretamente, conservem sua segurança e estabilidade em serviço durante um período mínimo de 50 anos, sem exigir medidas extras de manutenção e reparo (NBR 6118, 2014; Neville, 1997).

Os grandes avanços obtidos com a evolução tecnológica da construção civil, demandaram uma maior atenção à durabilidade do material, que passou, então, a ser abordado de uma forma mais efetiva pela Normalização Brasileira. A norma NBR 6118 (2014), projeto de estruturas de concreto, em sua nova versão, passa a considerar que todos os elementos estruturais de uma edificação, como lajes, vigas e pilares, terão de apresentar, independentemente do projeto, uma espessura mínima de cobrimento, visando garantir uma maior durabilidade e, conseqüentemente, uma maior vida útil das edificações (NBR 6118, 2014). A Tabela 3.3 apresenta as classes de agressividade e a Tabela 3.4 apresenta o cobrimento adequado para cada classe.

Tabela 3.3 – Classes de agressividade do ambiente.

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

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 revestido com argamassa e pintura).
 2) Pode-se admitir uma classe de agressividade mais branda (um nível acima) em: obras em regiões de clima seco, com 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.

Fonte: NBR 6118, 2014

Tabela 3.4 – Cobrimento de armadura correspondentes a cada classe de agressividade.

Tipo de estrutura	Componente ou elemento	Classe de agressividade ambiental			
		I	II	III	IV ³⁾
		Cobrimento nominal (mm)			
Concreto armado	Laje	20	25	35	45
	Viga/Pilar ²⁾	25	30	40	50
Concreto protendido ¹⁾	Todos	30	35	45	55

Fonte: NBR 6118, 2014

As deteriorações causadas pelo meio podem ser separadas em físicas, como 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 e Monteiro, 1994; Neville, 1997).

O domínio da tecnologia do concreto minimiza o aparecimento de fissuras, fator patológico de grande influência na durabilidade. As fissuras iniciais normalmente são devidas à deformação por retração e as fissuras que surgem ao longo da vida útil do concreto, são causadas por diferenças de temperaturas, sobrecargas estruturais, corrosão das armaduras e reação álcalis-agregado. No que se refere às fissuras, é preciso levar em consideração que a fissuração só é nociva quando a abertura das fissuras na superfície do concreto ultrapassar os seguintes valores: 0,1mm para peças não protegidas em meio agressivo, 0,2mm para peças não protegidas em meio não agressivo e 0,3mm para peças protegidas em meio não agressivo (Pinto, 2006).

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. Portanto, a permeabilidade é uma das propriedades mais importantes no estudo da durabilidade do concreto, pois esta determina a vulnerabilidade do concreto aos agentes externos. Esta propriedade pode ser obtida por um alto consumo de cimento, por uma baixa relação água/cimento, uma trabalhabilidade adequada, assim como operações corretas no que se refere à mistura, ao lançamento, ao adensamento e à cura do concreto (Mehta e Monteiro, 1994; Neville, 1997; Ribeiro et al., 2013).

Além de classificar os ambientes, a NBR 6118 (2014) apresenta algumas medidas que buscam garantir a durabilidade dos elementos de concreto para cada meio analisado, como os valores mínimos para a relação água/cimento e as classes de concreto quanto à resistência como pode ser visto na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 – Relação água/cimento correspondente a cada classe de agressividade.

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

Fonte: NBR 6118, 2014

3.2 Concreto Leve

O concreto leve é conhecido desde os tempos mais remotos, sendo encontrado em países situados em regiões vulcânicas. Em grande parte desses casos foi utilizado concreto a base de cal e rochas vulcânicas para construção dos mais diversos tipos de estruturas (Rosso, 1973).

No fim do período das guerras mundiais, foi iniciado o processo de construção de abrigos provisórios. A retomada das atividades econômicas e o crescimento da população favoreceram o aumento do déficit habitacional gerado pelas guerras. Os Estados então passaram a incentivar a construção de novas moradias e a industrialização dos processos de construção. O modelo proposto pela experiência europeia pós-guerra para a construção de grandes conjuntos habitacionais inspirados nos princípios do modernismo, com a proposta de formação de uma cidade igualitária, utilizou componentes padronizados com base no modo de vida da população de baixa renda, em conjunto com a necessidade de barateamento de custos e em sua urgência na redução do tempo de construção (Spinola et al., 2008).

A questão habitacional no Brasil vem ocupando, na última década, lugar de destaque entre as políticas públicas prioritárias do país, configurando num movimento de retomada da construção civil, propiciado pelo vertiginoso crescimento do crédito habitacional (Eloy, 2013).

A utilização do concreto leve em pré-moldados se difundiu a partir do século XX, desde então o uso de pré-moldados está crescendo, por oferecer padronização, racionalização dos materiais, otimização de mão de obra através de sua especialização, propondo também uma solução versátil para transporte e montagem.

Nas obras de concreto o peso próprio representa uma grande parcela da carga atuante sobre a estrutura e a redução da massa específica do concreto se torna de grande interesse. A principal vantagem é o uso de seções menores, conseqüentemente ocorre uma redução das dimensões das fundações. Além disso, com a utilização do concreto leve, as formas suportam pressões menores comparativamente com o concreto normal, então os pesos totais dos materiais são diminuídos, resultando num aumento da produtividade. O concreto leve apresenta também, isolamento térmico melhor do que o concreto comum e a massa específica abaixo de 2.000 kg/m^3 (Neville, 1997; NBR 8953, 2011).

O concreto leve pode ser obtido com o emprego de um agregado leve em substituição a brita utilizada nos concretos de referência. Dentre os agregados leves pode ser destacada a argila expandida, que é produzida através de aquecimento de alguns tipos de argila numa temperatura próxima de 1200°C , na qual, gases liberados pela decomposição química de uma parte do material, se incorporam na massa, expandindo-a (Rossignolo, 2009a).

O agregado de argila expandida é um material inerte que apresenta boa resistência mecânica, é bom isolante térmico e acústico, apresenta forma circular, superfície rígida e alta absorção de água (Silva e Borja, 2008).

A Figura 3.5 ilustra um dos tipos granulométricos da argila expandida produzida no Brasil.



Figura 3.5 – Agregado leve, argila expandida.

Quando comparada à brita de gnaiss utilizada no concreto de referência, podem ser destacadas algumas propriedades da argila expandida:

- A textura superficial da argila expandida é menos angulosa, apresentando forma esférica;
- A densidade da argila expandida é muito menor do que a da brita de gnaiss, devido ao ar incorporado;
- A resistência mecânica da brita é superior à da argila expandida;
- A absorção de água é menor para a brita, em relação a argila expandida;
- O calor específico da brita é maior do que o da argila expandida;
- O ar incorporado, confere a argila expandida boas propriedades térmicas e acústicas.

Características e propriedades dos agregados

A composição mineralógica do agregado e sua porosidade influenciam na resistência, na dureza e no módulo de elasticidade do concreto e, conseqüentemente, afeta seu comportamento quando endurecido (Mehta e Monteiro, 1994).

A correta especificação do agregado demanda do conhecimento de algumas das suas propriedades, tipos e origem (Val, 2007). Em relação à origem e/ou a forma de obtenção, os agregados são classificados como:

- **Artificiais**, que são os agregados derivados de processos industriais, como a argila expandida, o folhelho expandido por tratamento térmico e outros;
 - **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;
 - **Reciclados**, que podem ser tanto resíduos industriais granulares com características adequadas para o uso como agregado, bem como a escória de alto-forno e entulhos.
- Algumas características complementares dos agregados são importantes. A avaliação destas características é realizada através de ensaios laboratoriais, que fornecem resultados que são comparados à índices definidos pela normalização.

Os agregados podem ser classificados, quanto à sua massa unitária, em normais, leves e pesados, o que influi no tipo de aplicação a que se destinam, conforme Tabela 3.6 (Ribeiro et al., 2013)

Tabela 3.6 – Classificação dos agregados segundo sua massa unitária.

Classificação	Massa Unitária γ_a (Kg/dm³)	Exemplos	Exemplos de utilização
Leves	$\gamma_a < 1$	Escória de alto-forno, lodo de esgoto, argila expandida	Pré-moldados
Normais	$1 < \gamma_a < 2$	Areia, brita e pedregulho	Obras correntes
Pesados	$\gamma_a > 2$	Barita, limonita, magnetita	Concretos de estruturas especiais: blindagem contra radiações etc.

Fonte: Ribeiro et al., 2013

Agregados com massa unitária menor que 1,0 Kg/dm³, são considerados leves. A menor massa é devida à microestrutura celular altamente porosa (Mehta e Monteiro, 1994).

Com a utilização de agregados leves, ocorre economia de materiais, mão de obra e transporte, além disso, melhora o desempenho e vida útil do concreto. O concreto leve favorece a redução do custo inicial de construção, porém o mais interessante está na economia durante o ciclo de vida da estrutura (Ries e Holm, 2004).

A composição do material, o processo de produção e a distribuição dos poros do agregado são características importantes para sua resistência, sendo que, para uma mesma ordem de grandeza de porosidade, os agregados com uma distribuição uniforme e pequenos poros, apresentam maiores resistências em comparação aos agregados com poucos poros de grandes diâmetros. Os agregados leves possuem porosidade maior do que agregados convencionais, devido a maior quantidade de poros interconectados em seu interior (Chandra e Berntsson, 2002).

A Tabela 3.7 exemplifica alguns dos agregados leves comumente utilizados na construção civil no mundo segundo Rosso (1973):

Tabela 3.7 – Agregados leves naturais e artificiais.

Agregados Leves	Características
Rocha Pomes	Explorada principalmente na Alemanha, França e Itália, possui elevado teor de sílica e baixo teor de sais de cálcio e magnésio.
Cinzas Volantes	Este material tem características pozolânicas acentuadas, para ser utilizadas como agregado leve são sinterizadas. É desaconselhado seu uso para concretos com temperatura de cura abaixo de 100°C, em virtude de provocarem retração acentuada.
Escória de Alto Forno	Este material é resíduo de caldeiras industriais, deve ser preparado antes da utilização para que determinados componentes nocivos ao concreto sejam controlados. O processo de sinterização é o que apresenta melhores resultados.
Vermiculita	Material micáceo com estrutura laminar, a partir de um processo térmico especial é possível expandi-lo de 15 a 20 vezes. Após a moagem do material bruto, ocorre a separação dos grãos e este material pode ser utilizado como agregado leve. É um material de massa específica muito baixa, entre 90 e 100Kg/m ³ .
Argila Expandida	Material de origem artificial obtido a partir da sinterização de uma mistura de argilas. O resultado é uma estrutura altamente porosa devido a liberação de gases durante o processo de produção. Sua massa específica está entre 450 e 800 Kg/m ³ .

Fonte: Rosso, 1973

Os agregados também podem ser classificados, quanto às dimensões dos seus grãos, em miúdos e graúdos. Os agregados miúdos são aqueles cujos grãos passam pela peneira ABNT 4,8 mm e ficam retidos na peneira ABNT 0,075 mm, podem ser exemplificados pelas areias de uma maneira geral. Os agregados graúdos são aqueles cujos grãos passam pela peneira ABNT 76 mm e ficam retidos na peneira ABNT 4,8 mm, como por exemplo, as britas (Ribeiro et al., 2013).

A granulometria é a expressão das proporções dos grãos de diferentes tamanhos. Esta composição é obtida através de ensaio laboratorial, no qual a amostra do agregado é submetida a uma separação dos grãos por faixas granulométricas, de acordo com a série de peneiras da ABNT, para então serem determinados a dimensão máxima característica e o módulo de finura. Esses parâmetros são essenciais para especificar o emprego dos agregados em argamassas e concretos (Ribeiro et al., 2013).

O diâmetro máximo, corresponde à abertura nominal, em milímetros, da malha da peneira da série normal ou intermediária, na qual, o agregado apresenta uma porcentagem retida acumulada igual ou imediatamente inferior a 5% em massa (NBR 7217, 1987).

O módulo de finura (MF), que indica a utilização mais adequada para o agregado miúdo, é expressa pela soma das porcentagens retidas acumuladas em massa de um agregado, nas peneiras da série normal, dividida por 100 (NBR 7217, 1987).

De acordo com a NBR 7211 (2005), a distribuição granulométrica do agregado miúdo deve atender aos limites estabelecidos. Estes limites e módulos de finura das zonas ótima e utilizável, estão na Tabela 3.8. Podem ser utilizados também como agregado miúdo para concreto os materiais com distribuição granulométrica diferente das zonas estabelecidas na Tabela 3.8, desde que estudos prévios de dosagem comprovem sua aplicabilidade.

Tabela 3.8 – Limites inferiores e superiores de massa retida acumulada nas peneiras da série normal para o agregado miúdo.

PENEIRA COM ABERTURA DE MALHA (NBR NMISO 3310-1)	PORCENTAGEM, EM MASSA, RETIDA ACUMULADA.			
	LIMITES INFERIORES		LIMITES SUPERIORES	
	ZONA UTILIZÁVEL(2)	Z. ÓTIMA(1)	Z. ÓTIMA(1)	ZONA UTILIZÁVEL(3)
9,5 mm	0	0	0	0
6,3 mm	0	0	0	7
4,75 mm	0	0	5	10
2,36 mm	0	10	20	25
1,18 mm	5	20	30	50
600 µm	15	35	55	70
350 µm	50	65	85	95
150 µm	85	90	95	100

Fonte: NBR 7211 (ABNT, 2005).

NOTAS:

- (1) Módulo de finura de zona ótima varia 2,2 a 2,9
- (2) Módulo de finura de zona utilizável inferior varia de 1,55 a 2,20
- (3) Módulo de finura de zona utilizável superior varia de 2,90 a 3,50

De acordo com NBR 7211 (2005), a distribuição granulométrica do agregado graúdo deve atender aos limites estabelecidos na Tabela 3.9.

Tabela 3.9 – Limites inferiores e superiores de massa retida acumulada nas peneiras da série normal para o agregado graúdo.

% Ret. Acum. # (mm)	Porcentagem, em massa, retida acumulada. Zona granulométrica – d/D ¹				
	4,75 / 12,5	9,5 / 25	19 / 31,5	25 / 50	37,5 / 75
75	-	-	-	-	0 – 5
63	-	-	-	-	5 – 30
50	-	-	-	0 – 5	75 – 100
37,5	-	-	-	5 – 30	90 – 100
31,5	-	-	0 – 5	75 – 100	95 – 100
25	-	0 – 5	5 – 25 ²	87 – 100	-
19	-	2 – 15 ²	65 ² - 95	95 – 100	-
12,5	0 – 5	40 ² - 65 ²	92 – 100	-	-
9,5	2 – 15 ²	80 ² - 100	95 – 100	-	-
6,3	40 – 65 ²	92 – 100	-	-	-
4,75	80 ² - 100	95 – 100	-	-	-
2,36	95 - 100	-	-	-	-

1) Zona granulométrica correspondente à menor (d) e à maior (D) dimensões de agregado graúdo

2) Em cada zona granulométrica deve ser aceita uma variação de no máximo cinco unidades percentuais em apenas um dos limites marcados com ². Essa variação pode também estar distribuída em vários desses limites.

Fonte: NBR 7211 (ABNT, 2005).

O espectro representado na Figura 3.6 apresenta a relação entre a resistência do concreto e a massa unitária do agregado utilizado na produção.

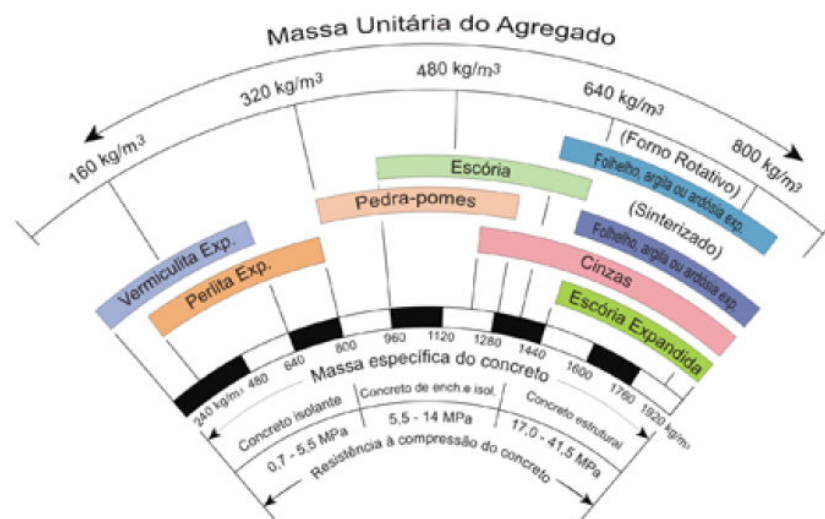


Figura 3.6 – Espectro dos agregados leves e dos concretos correspondentes.

Fonte: Adaptada de Mehta e Monteiro, 1994

A qualidade do concreto pode ser avaliada através de ensaios laboratoriais, visando comparar os resultados a certos índices definidos pela Normalização, conforme apresentado na Tabela 3.10.

Tabela 3.10 – Características complementares a avaliação da qualidade do agregado.

Características		Descrição
Resistência aos esforços mecânicos		Os agregados devem ser compostos por grãos resistentes e duráveis, sendo que a resistência dos grãos aos esforços mecânicos deve ser pelo menos superior à da pasta de cimento, pois, do contrário, os grãos se romperiam antes da pasta.
Resistência ao desgaste		O agregado graúdo deve ser avaliado através do desgaste sofrido, quando é colocado na máquina “ Los Angeles” juntamente com um carga abrasiva.
Substâncias Nocivas	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.
	Materiais Pulverulentos	Limitados por normas os materiais pulverulentos são partículas menores que 0,075mm.
	Impurezas Orgânicas	Deteção de substâncias orgânicas, normalmente de origem vegetal, que afetam a qualidade do concreto.
Reatividade potencial		Reatividade potencial é a possibilidade de virem a ocorrer reações álcalis-agregados, ou seja, reações prejudiciais entre os agregados e a pasta de cimento que os envolve.

Fonte: Ribeiro et al., 2013; Mehta e Monteiro, 1994

3.3 Mecanismos de ataque ao concreto

Segundo a NBR 6118 (2014), a agressividade do meio ambiente está relacionada às ações físicas e químicas que atuam sobre as estruturas de concreto, independentemente das ações mecânicas, variações volumétricas de origem térmica, retração hidráulica e outras previstas no dimensionamento das estruturas de concreto.

Alguns aspectos importantes para durabilidade das estruturas, estão presentes na análise anterior ao cálculo da estrutura de concreto, como, por exemplo, a classificação de micro e macro clima, presença de umidade e local de construção, que são fatores determinantes para seleção da classe de agressividade à qual o concreto estará exposto.

O enfoque desta pesquisa está no papel dos sulfatos como agentes agressivos e suas implicações na durabilidade do concreto, uma vez que, as estruturas de concreto podem estar expostas a ataques por sulfatos presentes em vários meios, como solos, águas subterrâneas, efluentes domésticos, ambientes industriais e agrícolas, pântanos, lagos pouco profundos, poços de mineração e na atmosfera.

A degradação do concreto, como resultado de reações químicas entre o cimento Portland hidratado e sulfatos de fontes externas, pode ocorrer de duas formas: por expansão do concreto e pela perda progressiva de massa e de resistência. Estas formas de deterioração dependem da concentração dos sulfatos presentes nos agentes de contato e da composição da pasta de cimento no concreto. O ataque por sulfato, pode se manifestar na forma de expansão, provocando a fissuração do concreto, aumentando a sua permeabilidade e facilitando a penetração do agente agressivo. O ataque por sulfato pode, também, provocar uma perda progressiva de massa e resistência, devido à deterioração na coesão dos produtos de hidratação do cimento (Mehta e Monteiro, 1994).

Diante da importância das questões relatadas, pode ser verificada a relevância de pesquisar concretos com características marcantes de qualidade e com camadas protetoras superficiais visando garantir sua durabilidade.

3.4 Proteção do concreto a ataque externo

Nas últimas décadas, foram observadas inúmeras estruturas comprometidas em decorrência de problemas relativos à durabilidade, sinalizando a premência de se ampliar a pesquisa de materiais e de métodos construtivos enfocando a qualidade do concreto, a ataques externos que possam afetá-lo e desenvolvimento de proteções superficiais.

Os avanços ocorridos na química nos últimos anos, vêm possibilitando o desenvolvimento de inúmeros tipos de proteção que permitem garantir a durabilidade através da redução da absorção de água, da penetração de sais e de gases agressivos, desde que as proteções propostas sejam periodicamente inspecionadas para verificação da necessidade de renovação, a fim de continuarem mantendo sua funcionalidade (Pinto, 2006).

Dentre as proteções desenvolvidas, as tintas têm um papel de destaque, porque, quando aplicadas, aderem à superfície do concreto formando um filme contínuo de baixa permeabilidade. As tintas, além de oferecerem a proteção necessária contra os principais agentes agressivos, devem possuir resistência ao intemperismo, à fotodegradação, evitando o desenvolvimento de fungos e bactérias e sendo resistente a pequenos impactos e riscos. Devem apresentar, também, estabilidade química em relação ao concreto, de forma a evitar a ocorrência de eflorescências, saponificação e outras anomalias, decorrentes da elevada alcalinidade do substrato (Helene, 1992).

Almusallam, em seu trabalho “*Effectiveness of surface coatings in improving concrete durability*”, classifica as proteções do concreto em cinco grandes grupos, após uma avaliação geral que o autor realizou sobre as proteções que vêm sendo utilizadas na engenharia civil em função dos agentes agressivos. Os grupos foram denominados como proteções acrílicas, emulsões de polímero, resinas epóxi, poliuretanos e borrachas cloradas (Almusallam et al., 2003).

Considerando 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 propiciando condições para a ação de micro-organismos 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 (Val, 2007).

A tinta acrílica, especialmente desenvolvida para proteção de estruturas de concreto, apresenta boa cobertura, além de oferecer boa resistência à fotodegradação e às atmosferas agressivas, sendo indicada também para ambientes marinhos e industriais. Esta cobertura proporciona alta resistência ao desgaste e excelente aderência aos substratos.

A tinta epóxi para estruturas de concreto, também apresenta boa cobertura, além de formar uma película que depois de curada, endurece oferecendo resistência química e mecânica, pois favorece a resistência à abrasão provocada pelo tráfego e a vários ataques químicos, como os causados por soluções diluídas de ácidos e álcalis, gorduras, óleos combustíveis etc.

Os métodos atuais e mais utilizados na avaliação e análise da qualidade de tintas para proteção do concreto, consideram poder de cobertura, viscosidade, dispersão do pigmento, matéria volátil, rendimento, espessura da película, brilho, flexibilidade, resistência às intempéries (naturais e artificiais), resistência à abrasão, resistência à névoa salina e resistência à luz.

4. METODOLOGIA

A metodologia proposta consistiu na comparação entre o concreto adotado como referência e o concreto leve em estudo com e sem proteção, por tinta acrílica e também por tinta epóxi, submetidos a meio agressivo ácido, a fim de avaliar a influência das camadas protetoras na minimização dos efeitos do ataque por ácido sulfúrico ao concreto leve de argila expandida.

4.1 Caracterização dos materiais

4.1.1 Cimento Portland

O cimento utilizado nas dosagens dos concretos foi o CII-E-32, Cimento Portland Composto com Escória de resistência à compressão de 32MPa aos 28 dias, que tem como característica principal a adição de escória de alto forno à sua composição (6 a 34%). Este tipo de cimento foi escolhido por se tratar de um aglomerante comumente utilizado na construção.

Na caracterização do cimento foi feita determinação da massa específica, finura e ensaio de expansibilidade, de acordo com as seguintes normas:

- ABNT NBR NM 23 - Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica, 2001;
- ABNT NBR NM 76 - Cimento Portland - Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (Método de Blaine), 1998;
- NBR 11579 - Cimento Portland - Determinação da finura por meio da peneira 75 μm (nº 200), 2012;
- NBR11582 - Cimento Portland – Determinação da expansibilidade Le Chatelier, 2012.

4.1.2 Agregado miúdo

Foi utilizado como agregado miúdo, areia lavada natural, proveniente da região metropolitana de Belo Horizonte, MG, Brasil.

A massa unitária foi obtida conforme a norma NBR 7251 - Agregado em estado solto - Determinação da massa unitária, 1982; a massa específica foi obtida conforme a norma NBR 9776 - Agregados - Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco de Chapman, 1986; a composição granulométrica e o módulo de finura foram determinados de acordo com a norma NBR 7217 - Agregados - Determinação da composição granulométrica, 1987.

4.1.3 Agregado graúdo

Foi utilizado como agregado graúdo dos concretos de referência, brita de gnaiss natural, proveniente da região metropolitana de Belo Horizonte, MG, Brasil.

Foi utilizado como agregado graúdo dos concretos leves, argila expandida, produzida pela empresa Cinexplan de Várzea Paulista, SP, Brasil.

A massa unitária destes agregados foi obtida conforme a NBR 7251 – Agregado em estado solto – Determinação da massa unitária, 1982; a absorção de água foi obtida conforme a NBR 9937 – Agregados – Determinação da absorção e massa específica do agregado graúdo, 1987; a composição granulométrica e dimensão máxima característica foram determinadas de acordo com a NBR 7217 - Agregados – Determinação da composição granulométrica, 1987.

4.2 Composição de métodos de dosagem

A dosagem do concreto foi realizada com os dados obtidos na caracterização dos materiais empregados, cimento e agregados, avaliando a qualidade e a composição granulométrica dos agregados, tanto da argila expandida utilizada no concreto leve, quanto da brita de gnaïsse utilizada no concreto de referência.

Os concretos foram dosados a partir de resultados obtidos na Escola de Engenharia da UFMG, utilizando os métodos de dosagem do American Concrete Institute (ACI) e do Instituto de Pesquisa Tecnológica de São Paulo (IPT), com o objetivo de se obter um concreto de qualidade e com a resistência proposta.

A dosagem do concreto leve foi feita a partir da transformação do traço em massa do concreto referência para um traço em massa/volume, utilizando as massas unitárias dos agregados. O concreto com utilização de brita de gnaïsse em sua composição será tratado como concreto de referência, enquanto que o concreto com argila expandida será tratado como concreto leve.

4.3 Produção dos Concretos

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. Esta produção corresponde às etapas de homogeneização dos materiais constituintes, lançamento, adensamento e cura, que são fundamentais para garantir a obtenção de concretos resistentes e duráveis.

Para compensar a taxa de absorção de água do agregado leve, minimizando os problemas de trabalhabilidade do concreto e, ao mesmo tempo, reduzindo o excesso de água na mistura, foi feita uma pré-saturação da argila expandida durante 24 horas. A taxa de absorção de água do agregado leve foi medida e o teor de absorção descontado na água de amassamento, mantendo constante a relação água/cimento do estudo de dosagem. Além disso, a pré-saturação retirou o material pulverulento que acompanhava o agregado leve.

A produção propriamente dita, que corresponde à mistura dos materiais constituintes, foi feita em betoneira, em um tempo que variou de três a cinco minutos, período de amassamento que foi necessário para garantir uma boa homogeneização. Este cuidado é fundamental, uma vez que a falta de homogeneidade implica em um sensível decréscimo da resistência mecânica e da durabilidade do concreto.

O adensamento buscou eliminar os vazios da massa, a fim de aumentar a resistência e a impermeabilidade, para tal, foi utilizado vibrador de imersão com um curto tempo de vibração nos corpos-de-prova de dimensões 10 x 20 cm, de forma a evitar a segregação dos compostos do concreto.

Os corpos-de-prova ficaram à temperatura ambiente durante as primeiras 24 horas, sendo posteriormente desmoldados e acondicionados em tanque para cura úmida, onde permaneceram até a data dos ensaios de resistência à compressão aos 7 (sete) e 28 (vinte e oito) dias (NBR 5738, 1994).

A cura do concreto foi feita após o adensamento, devem ser tomadas um conjunto de medidas destinadas a evitar a evaporação da água utilizada na mistura do concreto e que deverá reagir com o cimento, hidratando-o. A cura minimiza o fenômeno da retração, que é responsável pelo aparecimento de fissuras e trincas (Ribeiro et al., 2013).

4.4 Análise dos concretos no estado fresco

A avaliação dos concretos no estado fresco foi feita por meio do ensaio de abatimento de cone, normalizado pela NBR 7223 (1992), que permite visualizar a consistência do material, conforme a Figura 4.1. Este método consiste no enchimento de um molde tronco-cônico com concreto em três camadas, adensadas com 25 golpes cada e, em seguida, o molde é retirado. Em decorrência do peso próprio, o concreto é abatido na ausência do molde e a diminuição da altura do tronco de cone é chamada de abatimento do concreto conhecida como "slump", que tem como objetivo verificar a trabalhabilidade.

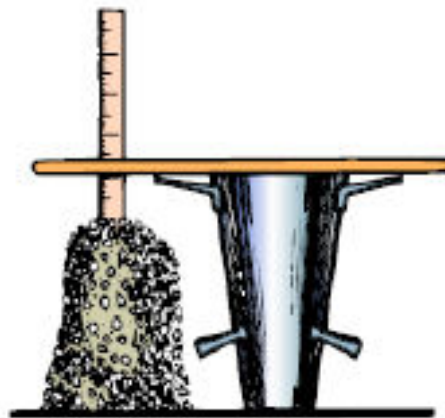


Figura 4.1 – Ensaio de abatimento do tronco de cone – “Slump”.

Este ensaio é muito utilizado tanto no laboratório, durante a fase de dosagem, como em canteiros de obras, por sua facilidade de execução. A determinação da trabalhabilidade visou avaliar a influência da relação água/cimento de 0,50, aliado ao aditivo proposto, a fim de verificar o abatimento e a performance do concreto, assim como garantir a hidratação e a homogeneização da pasta.

4.5 Análise dos concretos no estado endurecido

Moldagem dos corpos de prova

Os corpos de prova cilíndricos de 10 x 20 cm foram moldados e rompidos de acordo com as NBR 5738 (1994) e NBR 5739 (1994). Os corpos de prova foram preenchidos com concreto em camadas e adensadas com vibrador mecânico tipo mangote, desformados após 24 horas e colocados em cura úmida até a data de rompimento.

Resistência à compressão

A resistência à compressão é o ensaio mais utilizado para o concreto na construção, por ser uma das características mais importantes para estrutura e por ser uma característica relacionada qualitativamente a outras desejadas (Neville, 1997).

Os ensaios de resistência à compressão axial foram realizados de acordo com a NBR 5739 (1994). Foram rompidos corpos de prova cilíndricos 10 x 20 cm, nas idades de 7 e 28 dias, utilizando a prensa hidráulica, Figura 4.2.

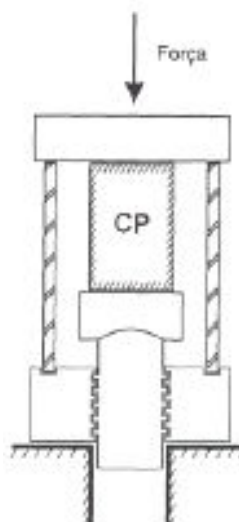


Figura 4.2 – Ruptura do concreto à compressão.
Fonte: Mehta e Monteiro (1994)

Absorção de água dos concretos

A absorção de água do concreto pode ser avaliada através de dois métodos de ensaio normalizados: por imersão, segundo a NBR 9778 (2005) e por capilaridade, de acordo com a NBR 9779 (2012). Neste estudo sobre concreto leve com argila expandida, foi utilizado o método de ensaio de absorção por imersão, que avalia o volume total de poros. 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 de água correspondeu ao ganho de massa devido ao preenchimento dos vazios do concreto pela água.

4.6 Camadas protetoras dos concretos

Para os estudos, foi utilizada camada protetora à base de tinta acrílica para o concreto referência e concreto leve. Também foi utilizada camada protetora à base de tinta epóxi. A proteção dos concretos vem de encontro à necessidade de propor proteções suplementares, quando as estruturas estão expostas a ambientes agressivos, o que já é um consenso entre os pesquisadores de todo o mundo (Almusallam et al., 2003).

As camadas protetoras foram aplicadas nos concretos em 2 demãos com trincha e intervalo de 8 horas entre as aplicações. 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 secagem de ambas as proteções (acrílica e epóxi) teve uma duração de oito dias, em local ventilado e em condições normais de temperatura (25°C).

4.7 Ataque por ácido aos concretos

Foi realizado ataque nos concretos em solução de ácido sulfúrico (H_2SO_4) 2,5%, por imersão durante sete dias, uma vez que segundo Almusallam (2003), muitas pesquisas têm atribuído a deterioração do concreto exposto a ambientes agressivos a uma má avaliação da exposição ao meio.

O ataque realizado teve como principal objetivo, portanto, simular uma deterioração acelerada ao concreto leve, para permitir uma comparação com os efeitos decorrentes de meios agressivos.

4.8 Perdas de massa

A degradação dos concretos foi avaliada através das perdas de massa em corpos de prova de concreto sem proteção e protegido, antes e após ataque químico.

Este ensaio permite avaliar as perdas de massa (PM) do concreto através de uma abordagem quantitativa que correlaciona a massa do corpo de prova de concreto antes (M_s) e após o ataque por ácido (M_f) segundo a Equação 4.1:

$$PM(\%) = \frac{M_f - M_s}{M_s} \cdot 100 \quad (4.1)$$

Onde,

PM - Perdas de massa (%)

M_s - Massa seca antes do ataque (g)

M_f - Massa seca após o ataque (g)

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Caracterização dos materiais

Foram realizados ensaios de caracterização dos materiais constituintes, para o concreto de referência e para o concreto leve. Os resultados obtidos foram:

5.1.1 Cimento Portland

Os resultados dos ensaios de caracterização do cimento CII-E-32 são apresentados na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Ensaio Caracterização do Cimento Portland CP II-E-32.

Ensaio	Cimento CP II-E-32	Normas
Massa Específica (Kg/dm ³)	3,1	ABNT NBR NM 23:2011
Finura – Método Blaine (m ² /Kg)	310,0	ABNT NBR NM 76:1998
Finura – Peneira nº 200-75 µm (%)	2,5	NBR 11579:2012
Expansibilidade a frio (mm)	0	NBR 11582:2012

5.1.2 Agregado Miúdo

Foi utilizada areia lavada média da região metropolitana de Belo Horizonte, MG, Brasil, por ser uma das mais utilizadas na construção civil, sendo os resultados dos ensaios de caracterização da areia utilizada apresentados na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Ensaio de Caracterização Areia.

Ensaio	Areia Lavada Média	Normas
Massa Unitária (Kg/dm ³)	1,40	NBR 7251:1982
Massa Específica (Kg/dm ³)	2,55	NBR 9776:1986
Módulo de Finura	2,76	NBR 7217:1987
Dimensão Máxima Característica (mm)	4,80	NBR 7217:1987

A curva granulométrica da areia utilizada está apresentada na Figura 5.1 entre o limite inferior e superior determinado pela NBR 7211 (2005).

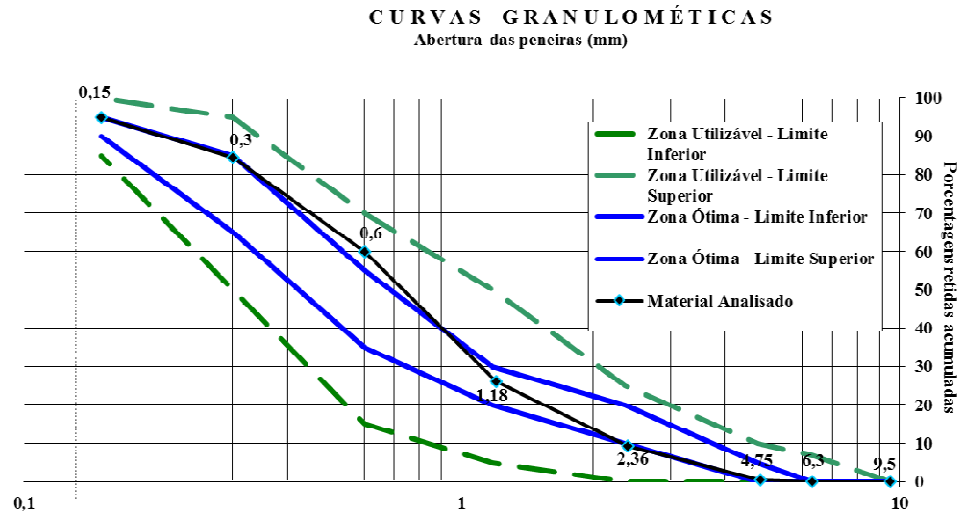


Figura 5.1 – Curva granulométrica da areia.

5.1.3 Agregados Graúdos

Foi utilizada argila expandida produzida pela empresa Cinexplan, que é um dos tipos produzidos em grande escala e o que mais se assemelha à granulometria da brita utilizada na produção do concreto de referência.

Os resultados dos ensaios de caracterização realizados para a brita de gnaise utilizada no concreto de referência e a argila expandida utilizada no concreto leve, estão na Tabela 5.3, bem como, a norma referente a cada ensaio.

Tabela 5.3 – Ensaio de caracterização da brita de gnaise e argila expandida.

Ensaio	Brita	Argila Expandida	Normas
Massa Unitária (Kg/dm ³)	1,53	0,70	NBR 7251:1982
Absorção de água (%)	< 1	8,94	NBR 9937:1987
Dimensão Máxima Característica (mm)	12,50	12,50	NBR 7217:1987
Módulo de Finura	6,26	6,68	NBR 7217:1987

A massa unitária da brita utilizada foi de $1,53 \text{ Kg/dm}^3$, enquanto a da argila expandida foi de $0,70 \text{ Kg/dm}^3$ e a dimensão máxima característica foi de $12,50 \text{ mm}$, tanto para a brita quanto para o agregado leve. O valor da absorção de água da brita está abaixo de 1% e a da argila expandida foi de $8,94 \%$, que é um valor alto, quando comparado à brita. O módulo de finura da brita de gnaiss foi de $6,26$ e o da argila expandida foi de $6,68$.

A Figura 5.2 apresenta as curvas granulométricas dos agregados caracterizados, comparadas às curvas da brita 0, NBR 7217 (1987). Pode ser observado, que a curva da brita caracterizada está dentro dos limites estabelecidos para uma brita 0 e a curva da argila expandida está próxima aos limites normalizados.

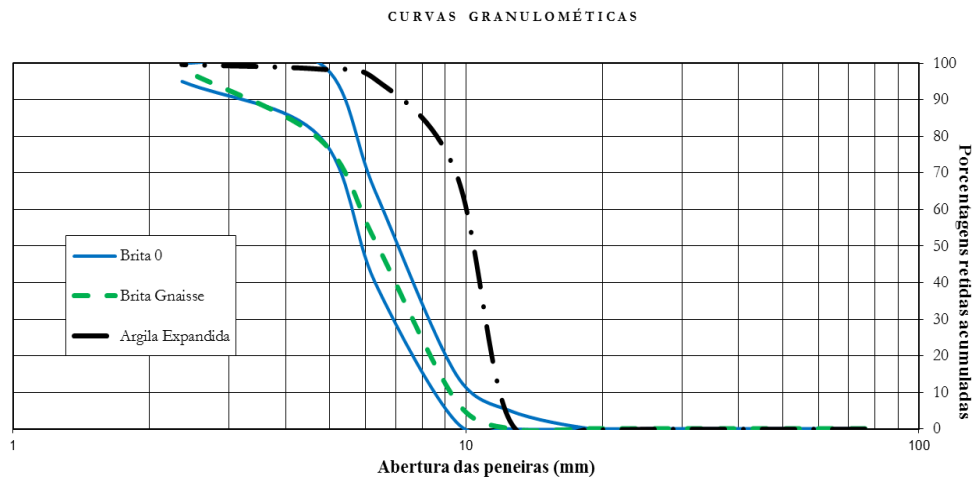


Figura 5.2 – Curvas granulométricas da argila expandida e brita de gnaiss caracterizada comparadas a curva da brita 0.

5.1.4 Água

A água, quando não contém substâncias nocivas, é de grande importância para o concreto, principalmente na fase de cura, porém, quando contém substâncias químicas, pode reagir com constituintes da pasta de cimento, formando compostos expansivos que geram tensões internas, podendo provocar a fissuração e desagregação, reduzindo significativamente a resistência, rigidez e impermeabilidade do concreto. Se a ação do ataque for suficientemente forte, poderá comprometer mesmo o concreto de melhor qualidade ao longo do tempo. Foi utilizada nos ensaios, água proveniente da COPASA – Companhia de Saneamento de Minas Gerais.

5.1.5 Aditivos

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. Foi utilizado neste estudo aditivo plastificante polifuncional, 1,5% em massa do cimento, definido em função de ajustes experimentais das dosagens realizadas.

5.2 Dosagem dos concretos

A partir dos estudos de dosagens foi selecionado um concreto produzido com relação água/cimento de 0,50, valor estabelecido pela NBR 6118 (2014), que normaliza os tipos de concretos sujeitos à ambientes altamente agressivos.

O concreto de referência foi produzido com 370 kg/m³ de cimento, CP II-E-32, relação água/cimento de 0,50 e aditivo plastificante polifuncional, 1,5% em massa, a fim de evitar a desagregação do concreto fresco. A dosagem do concreto leve foi feita a partir da transformação do traço em massa do concreto de referência para um traço massa/volume, utilizando as massas unitárias dos agregados. A Figura 5.3 apresenta o processo de produção e mistura dos componentes do concreto leve.



Figura 5.3 – Produção do concreto leve em betoneira.

5.3 Análise dos concretos no estado fresco

A avaliação dos concretos no estado fresco foi feita por meio do ensaio de abatimento do tronco de cone, normalizado pela NBR 7223 (1992), que permite visualizar a consistência do material. As Figuras 5.4 e 5.5 apresentam os resultados dos ensaios de abatimento do tronco de cone para o concreto de referência e para o concreto leve, respectivamente.



Figura 5.4 – Abatimento de tronco de cone “Slump” do concreto de referência.



Figura 5.5 – Abatimento de tronco de cone “Slump” do concreto leve.

Pode ser observado que o abatimento do tronco de cone foi praticamente igual a 0, tanto para o concreto de referência quanto para o concreto leve.

5.4 Resistência à compressão dos concretos antes do ataque

A partir da composição do concreto de referência, foi avaliada uma alteração da relação água/cimento, Tabela 5.4.

Tabela 5.4 – Estudo comparativo de dosagem dos concretos.

Dosagem	Consumo de Cimento (Kg/m ³)	Aditivo (%)	Relação água/cimento	Resistência à compressão (MPa)			
				Concreto de Referência		Concreto leve	
				7 Dias	28 Dias	7 Dias	28 Dias
1	370	1,0	0,7	19,0	30,0	10,0	18,0
2	370	1,0	0,6	23,0	33,2	12,5	21,5
3	370	1,5	0,5	25,5	36,0	13,0	26,0
4	370	1,5	0,5	28,0	40,0	21,0	30,0

A seleção da dosagem nº 4, resultou da correção da água em função da alta absorção da argila expandida e da cura dos corpos de prova em ambiente saturado, sendo obtida para o concreto de referência resistência à compressão aos 28 dias de 40,0 MPa e para o concreto leve, resistência à compressão de 30,0 MPa conforme determinado na metodologia, através da dosagem. Estes valores de resistência à compressão foram obtidos também em função dos cuidados referentes ao processo de mistura, adensamento e cura durante 28 dias em ambiente saturado (tanque), minimizando a micro fissuração precoce do concreto e garantindo a cura em ambiente saturado.

Os resultados de resistência à compressão do concreto de referência e do concreto leve estão apresentados nas Figuras 5.6 e 5.7, respectivamente.

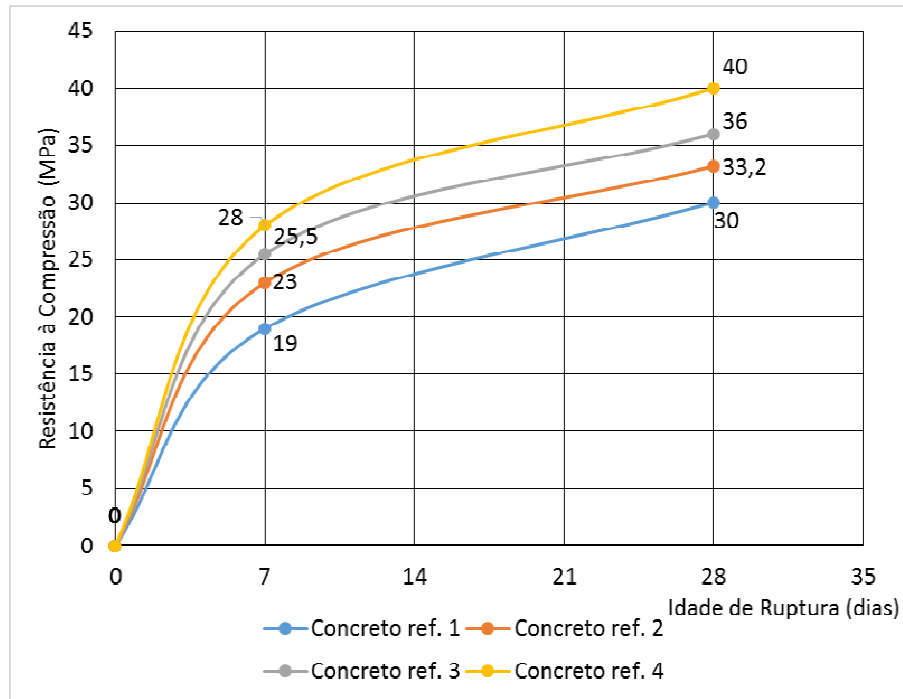


Figura 5.6 – Resistência à compressão x Idade de Ruptura – Dosagens do Concreto de Referência.

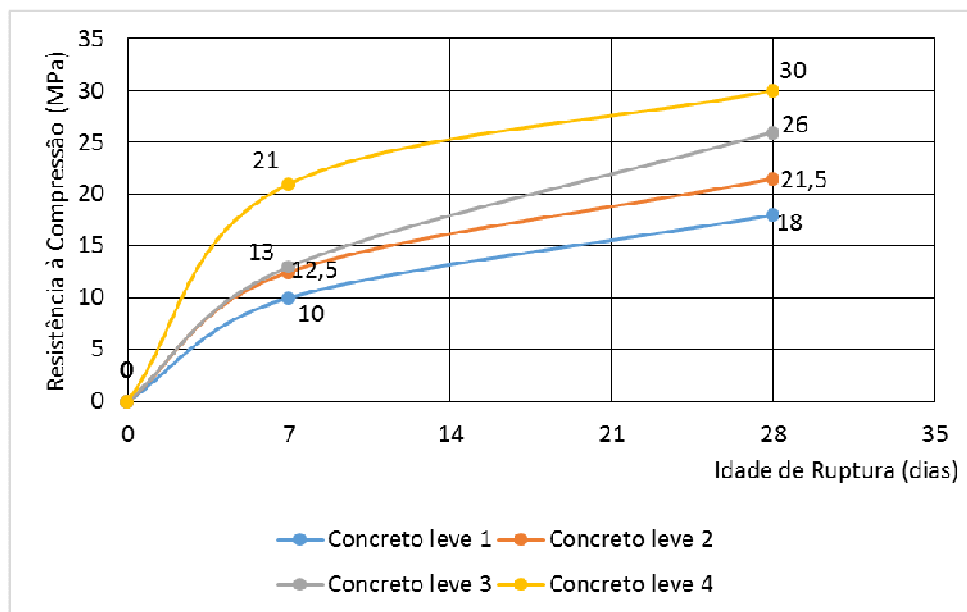


Figura 5.7 – Resistência à compressão x Idade de Ruptura – Dosagens do Concreto Leve.

Os concretos foram produzidos com o objetivo de cumprir o valor estabelecido pela NBR6118 (2014) para concretos submetidos a um ambiente agressivo, sendo amostras preparadas com 370 kg/m³, cimento CII-E-32 e a relação água/cimento é de 0,50. A resistência à compressão foi de 40,0 MPa para o concreto de referência, enquanto para o concreto leve de argila expandida foi de 30,0 MPa, antes do ataque por ácido sulfúrico 2,5%, conforme a Tabela 5.5 e Figura 5.8.

Os ensaios de resistência à compressão foram conduzidos conforme NBR 5739 (1994), em corpos-de-prova cilíndricos 10 x 20 cm. O comportamento da resistência à compressão do concreto foi analisado nas idades de 7 (sete) e 28 (vinte e oito) dias.

Tabela 5.5 – Resistência à compressão dos concretos antes do ataque ácido.

Concreto	Consumo de Cimento (kg/m ³)	Aditivo plastificante Polifuncional (%)	Relação água/cimento	Resistência à Compressão (MPa)	
				7 dias	28 dias
Referência (Brita Gnaisse)	370	1,5%	0,50	28,0	40,0
Argila Expandida	370	1,5%	0,50	21,0	30,0

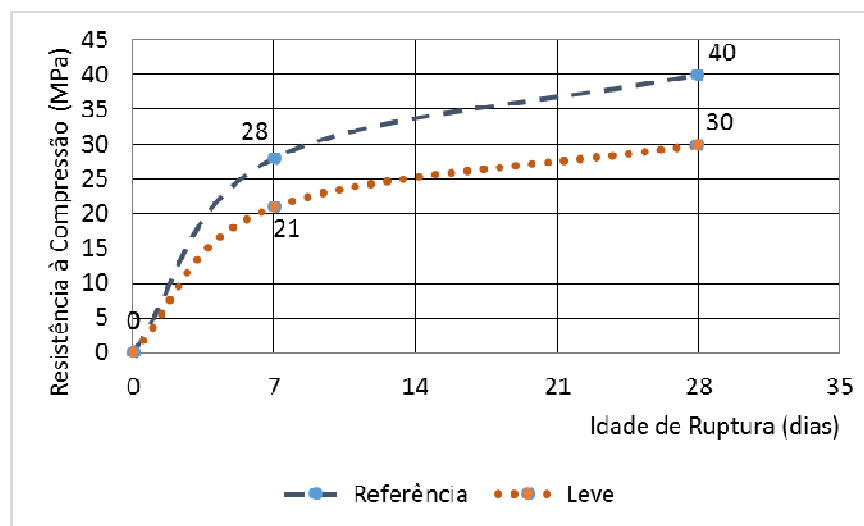


Figura 5.8 – Resistência à compressão antes do ataque ácido x Idade de Ruptura.

5.5 Zona de transição pasta/agregado

Os ensaios realizados em corpos de prova cilíndricos de concreto, submetidos à compressão, demonstram que no concreto de referência, o agregado graúdo é mais denso e resistente, a fratura contorna esse agregado passando pela zona de transição e pela matriz de cimento, conforme ilustrado na Figura 5.9 (a). Por outro lado, no concreto leve, a seção de ruptura passa através da argila expandida, como pode ser visto na Figura 5.9 (b), sendo que uma das possíveis causas é a maior resistência da zona de transição e da argamassa que o envolve.

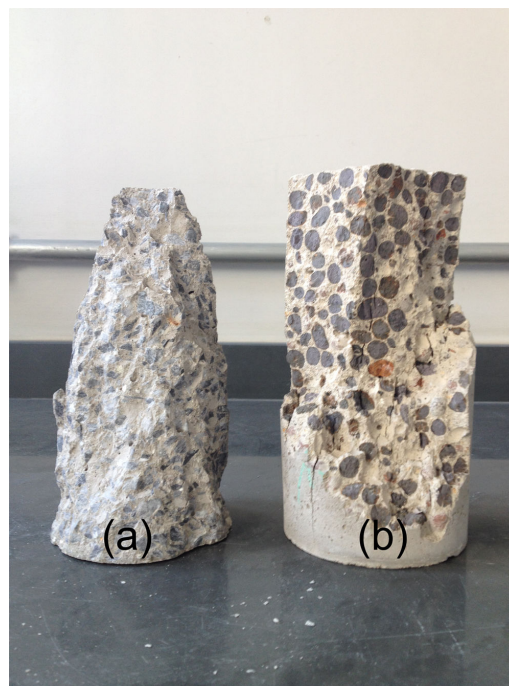


Figura 5.9 – Zona de transição após rompimento:
(a) Concreto de referência e (b) Concreto Leve

5.6 Ataque por ácido aos concretos

Foi realizado ataque aos concretos por solução de ácido sulfúrico (H_2SO_4) 2,5%, por imersão, durante sete dias, Figura 5.10. O ataque realizado teve como principal objetivo, simular um ataque acelerado ao concreto, para permitir uma comparação com os efeitos decorrentes de meios agressivos.



Figura 5.10 – Corpos de prova 10x20cm imersos em solução de ácido sulfúrico (H_2SO_4) a 2,5%.

5.7 Inspeção visual dos corpos de prova

A degradação superficial dos concretos foi avaliada através de inspeção visual de corpos de prova, antes e após ataque químico, permitindo visualizar a falta de coesão da pasta e seu esfarelamento, em função da degradação provocada pelo ácido sulfúrico, assim como a minimização dos efeitos desta agressividade, obtida através da proteção superficial com tinta acrílica e, também com tinta epóxi, tanto no concreto de referência quanto no concreto leve.

O processo de deterioração pode ser visualizado nas Figuras 5.11 e 5.12, para o concreto de referência e para o concreto leve sem proteção, submetidos ao ataque por imersão em ácido sulfúrico 2,5%, durante 7 dias. O concreto leve apresentou um aspecto de desgaste do cobrimento e exposição do agregado graúdo em toda sua superfície, além da perda de coesão da pasta.

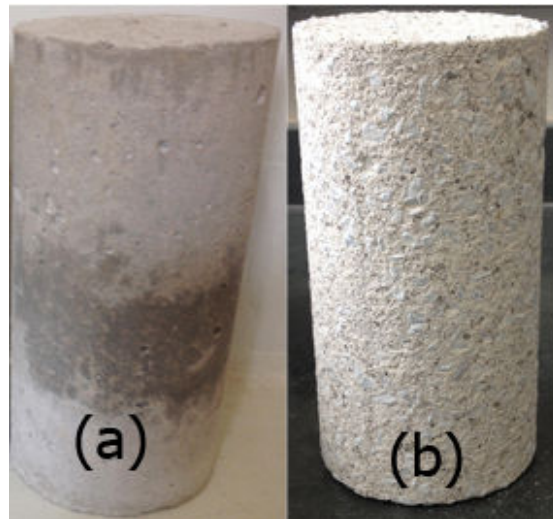


Figura 5.11 – Concreto de referência sem proteção submetido ao ataque ácido por 7 dias:
(a) antes do ataque e (b) após ataque.

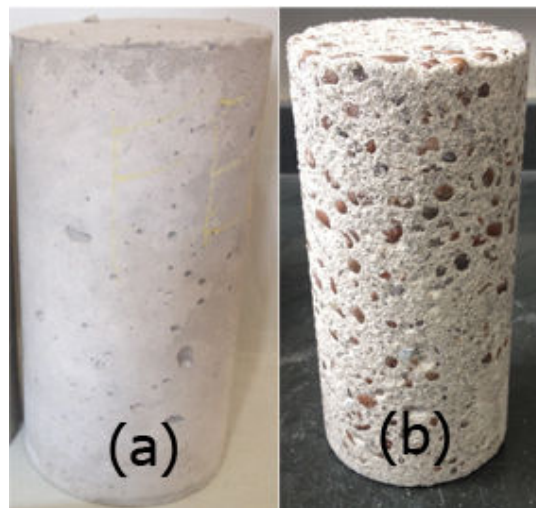


Figura 5.12 – Concreto leve sem proteção submetido ao ataque ácido por 7 dias:
(a) antes do ataque e (b) após ataque.

O processo de deterioração pode ser visualizado nas Figuras 5.13 e 5.14, para o concreto de referência e para o concreto leve com proteção acrílica, submetidos ao ataque por imersão em ácido sulfúrico 2,5%, durante 7 dias. O concreto leve protegido, apresentou um aspecto de desgaste das quinas, porém com proteção de maior percentual da superfície do concreto.

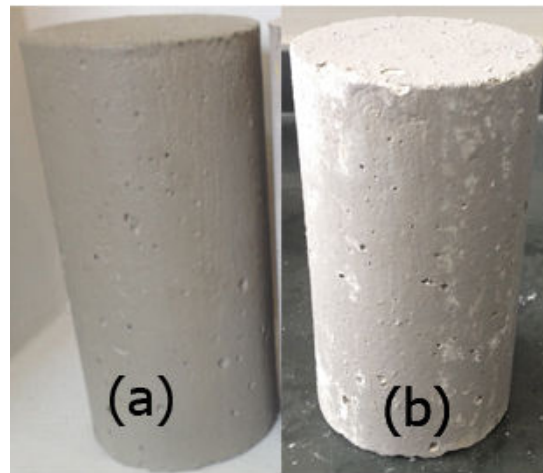


Figura 5.13 – Concreto referência com proteção acrílica submetido ao ataque ácido por 7 dias:
(a) antes do ataque e (b) após ataque.

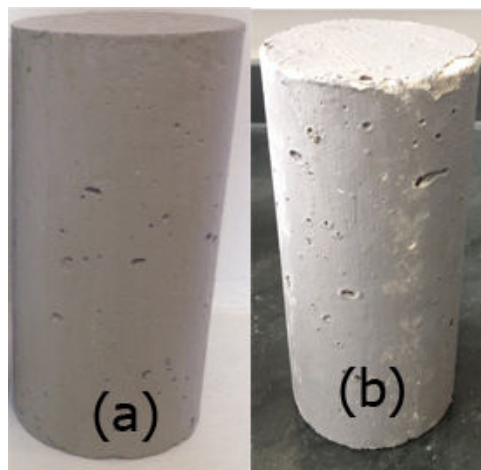


Figura 5.14 – Concreto leve com proteção acrílica submetido ao ataque ácido por 7 dias:
(a) antes do ataque e (b) após ataque.

O processo de deterioração pode ser visualizado nas Figuras 5.15 e 5.16, para o concreto de referência e para o concreto leve com proteção epóxi, submetidos ao ataque por imersão em ácido sulfúrico 2,5%, durante 7 dias. O concreto leve protegido, apresentou pequeno aspecto de desgaste com criação de algumas bolhas na camada protetora. Ocorreu desgaste da camada protetora, mas proteção total da superfície do concreto.

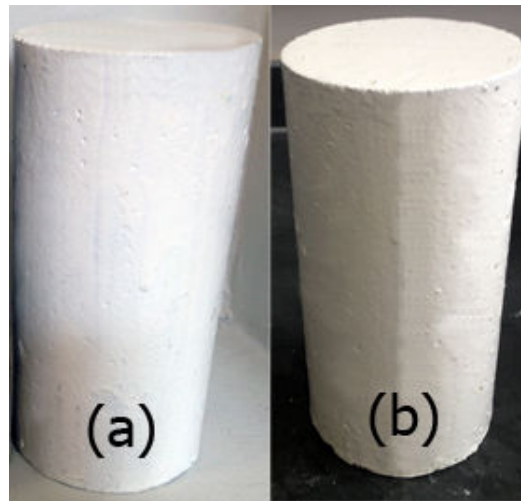


Figura 5.15 – Concreto de referência com proteção epóxi submetido ao ataque ácido por 7 dias:
(a) antes do ataque e (b) após ataque.

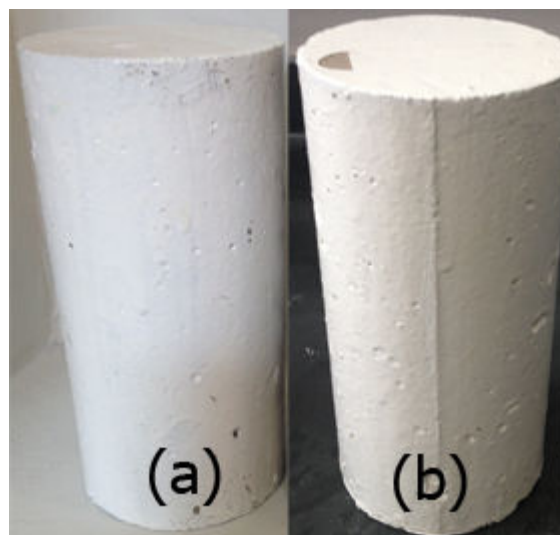


Figura 5.16 – Concreto leve com proteção epóxi submetido ao ataque ácido por 7 dias:
(a) antes do ataque e (b) após ataque.

O processo de deterioração pode ser visualizado nas Figuras 5.17 e 5.18, para o concreto de referência e para o concreto leve, nas seguintes condições: sem proteção, com proteção acrílica e com proteção epóxi, após serem submetidos ao ataque por imersão em ácido sulfúrico 2,5%, durante 7 dias. A eficiência da camada protetora acrílica pode ser observada, bem como, da camada protetora epóxi, quando comparadas ao concreto sem qualquer proteção, tanto para o concreto de referência quanto para o concreto leve em estudo.

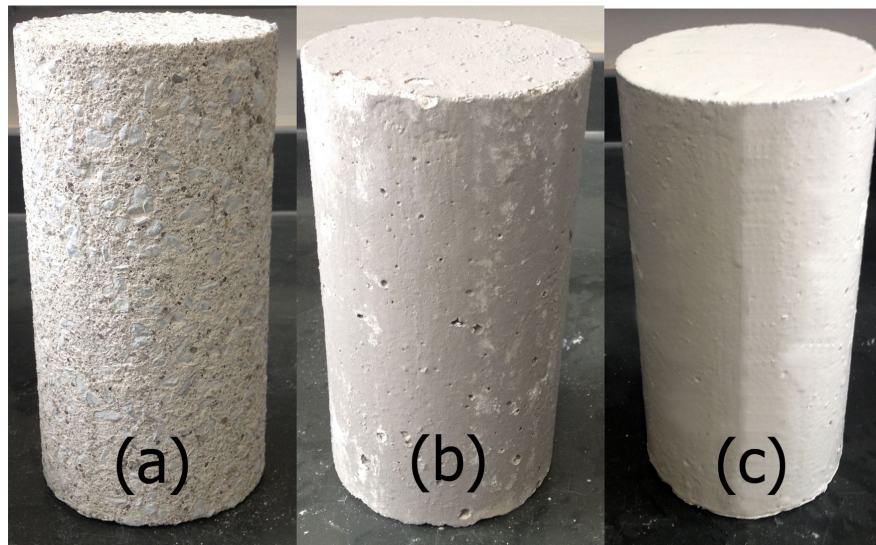


Figura 5.17 – Concreto de referência submetido ao ataque ácido por 7 dias: (a) sem proteção, (b) com proteção acrílica, (c) com proteção epóxi, após ataque.

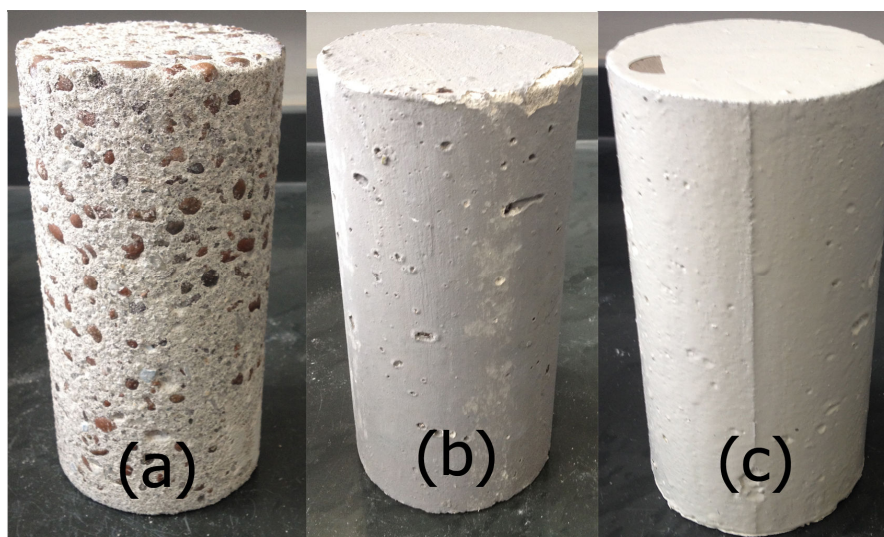


Figura 5.18 – Concreto leve submetido ao ataque ácido por 7 dias: (a) sem proteção, (b) com proteção acrílica, (c) com proteção epóxi, após ataque.

5.8 Resistência à compressão dos concretos após o ataque

Os resultados obtidos de resistência à compressão do concreto de referência e do concreto leve antes e após ataque por ácido sulfúrico são apresentados na Tabela 5.6 e na Figura 5.19.

Tabela 5.6 – Resistência à compressão dos concretos antes e após ataque químico.

Concreto	Tipo Proteção	Resistência à Compressão (MPa)	
		Antes do ataque	Após ataque
Referência (Brita Gnaisse)	Sem Proteção	40,0	35,5
	Tinta Acrílica	40,0	40,0
	Tinta Epóxi	40,0	40,0
Argila Expandida	Sem Proteção	30,0	23,0
	Tinta Acrílica	30,0	27,0
	Tinta Epóxi	30,0	29,0

A análise dos resultados permite verificar um decréscimo das resistências à compressão dos concretos sem proteção, da ordem de 11% para o concreto de referência, de 23% para o concreto leve e a manutenção das resistências à compressão do concreto de referência protegido com tinta acrílica ou com tinta epóxi. No que se refere à resistência à compressão dos concretos leves, a resistência do concreto leve com tinta acrílica passou de 30,0 MPa para 27,0 MPa, diminuição de 3,0 MPa, para o concreto leve com tinta epóxi a diminuição foi de 1,0 MPa passando de 30,0 MPa para 29,0 MPa, ou seja, as resistências à compressão dos concretos leves protegidos se mantiveram no mesmo patamar antes e após ataque por ácido.

A Figura 5.19 permite comparar o desempenho das proteções, no concreto de referência, sendo que, tanto a proteção acrílica quanto a proteção epóxi permitiram manter a resistência à compressão em 40,0 MPa antes e após ataque químico, o que configura um ganho de resistência de 13%, comparativamente ao concreto de referência sem proteção. No concreto leve devido às proteções, houve um ganho de resistência ainda mais significativo, 17% para a tinta acrílica e 26% para a tinta epóxi.

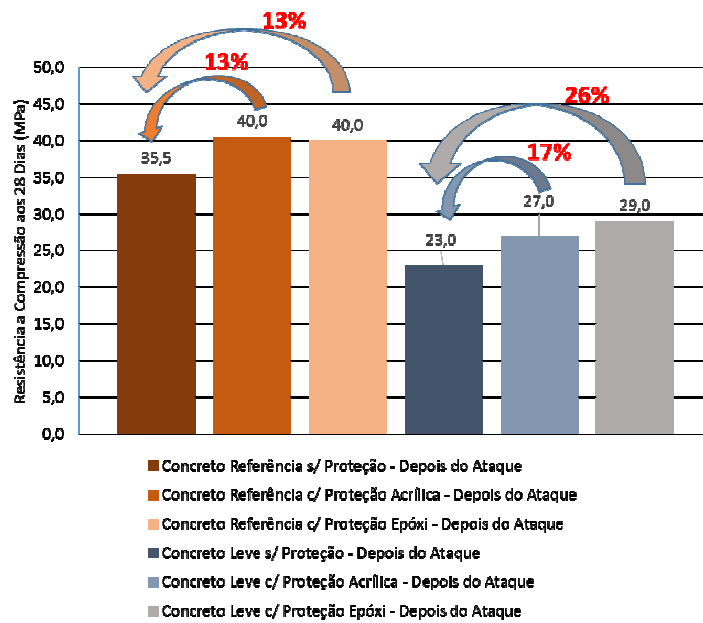


Figura 5.19 – Resistência à compressão após ataque para o concreto de referência e para o concreto leve, com e sem proteção

5.9 Influência da absorção de água dos concretos antes e após ataque com ácido

Os resultados obtidos nos ensaios de perdas de massa do concreto de referência e do concreto leve, antes e após ataque por ácido sulfúrico, são apresentados na Tabela 5.7.

Tabela 5.7 – Absorção de água e massa específica do concreto de referência e do concreto leve.

Proteção	Concreto de Referência		Concreto Leve de Argila Expandida	
	Absorção (%)		Absorção (%)	
	Antes do ataque	Após o ataque	Antes do ataque	Após o ataque
Sem proteção	1,8	2,4	2,2	5,0
Com proteção acrílica	0,6	1,8	1,8	3,8
Com proteção epóxi	0,4	0,6	1,5	1,7
Massa específica (kg/m ³)	2.680,0		1.740,0	

Os resultados dos ensaios de absorção, após o ataque, permitem verificar uma nítida diminuição dos índices de absorção dos concretos protegidos, em relação aos concretos não protegidos, de 2,4% para 0,6% no concreto de referência e de 5% para 1,7% no concreto leve, evidenciando que as proteções impedem a penetração do ácido sulfúrico, garantindo a qualidade do concreto, requisito fundamental de durabilidade.

Os ensaios de absorção de água confirmam que o concreto leve em estudo, atende à característica primordial para ser considerado um concreto durável, ou seja, possui absorção bem abaixo de 10%.

As massas específicas foram de 2.680,0 kg/m³ para o concreto de referência e de 1.740,0 kg/m³ para o concreto leve.

5.10 Perdas de massa dos concretos

Os resultados obtidos nos ensaios de perdas de massa do concreto de referência e do concreto leve, antes e após ataque por ácido sulfúrico, são apresentados na Tabela 5.8.

Tabela 5.8 – Perdas de massa antes e após ataque por ácido sulfúrico 2,5%.

Proteção	Concreto de Referência			Concreto Leve de Argila Expandida		
	Massa (g)			Massa (g)		
	Antes do ataque(Ms)	Após ataque(Mf)	Perdas de massa (%) *	Antes do ataque(Ms)	Após ataque(Mf)	Perdas de massa (%) *
Sem proteção	3.738,0	3.632,0	2,8	2.444,0	2.297,0	6,0
Com proteção Acrílica	3.813,0	3.780,0	0,9	2.432,0	2.408,0	1,0
Com proteção Epóxi	3.858,0	3.842,0	0,4	2.486,0	2.474,0	0,5

$$* \quad PM(\%) = \frac{M_f - M_s}{M_s} \cdot 100$$

A análise dos resultados permite verificar que as perdas de massa dos concretos sem proteção foram de 2,8% para o concreto de referência, de 6,0% para o concreto leve e para os concretos protegidos, as perdas de massa se situam entre 0,4 e 1,0%. As reduções das perdas de massa, principalmente nos concretos leves, demonstram a eficiência das proteções na minimização da degradação dos concretos submetidos a meio agressivo ácido.

6. CONCLUSÃO

A durabilidade de concreto leve de argila expandida com camada protetora submetido a meio agressivo ácido foi analisada por inspeção visual e por ensaios de resistência à compressão, absorção de água e perdas de massa de corpos de prova, com e sem proteção, antes e após ataque por imersão em ácido sulfúrico com concentração de 2,5% durante 7 dias.

Os estudos de dosagens dos concretos foram realizados através da comparação de um concreto de referência com resistência à compressão de 40 MPa aos 28 dias e absorção de água de 1,8%, e de um concreto leve de argila expandida com resistência à compressão de 30,0 MPa e absorção de 2,2%, obtidos após correção da relação água/cimento, em função da alta absorção da argila expandida.

A inspeção visual dos corpos de prova do concreto de referência e do concreto leve, evidenciou a degradação dos concretos sem proteção, assim como a minimização da penetração do agente agressivo nos concretos com proteção, comprovando a eficiência da tinta acrílica e da tinta epóxi, propostas como camadas protetoras superficiais aos concretos.

A nítida diminuição dos índices de absorção dos concretos protegidos, em relação aos concretos não protegidos, de 2,4% para 0,6% no concreto de referência, e de 5% para 1,7% no concreto leve, também demonstrou que as proteções ao reduzirem os valores de absorção, garantem a qualidade do concreto.

No que se refere às perdas de massa dos concretos sem proteção, após ataque químico, o concreto de referência teve uma perda de 2,8% e o concreto leve uma perda de 6,0%, enquanto nos concretos protegidos as perdas de massa foram de 0,4 para o concreto de referência, e de 1,0% para o concreto leve, confirmando o bom desempenho das proteções.

Os resultados obtidos permitiram comprovar o papel das camadas protetoras avaliadas, uma vez que os valores de absorção e de perdas de massa foram menores para os concretos protegidos com tinta acrílica, e para os concretos protegidos com tinta epóxi, em comparação aos concretos sem proteção, evidenciando também um desempenho ainda mais significativo das proteções no concreto leve do que no concreto de referência.

Este estudo ao demonstrar a eficiência de proteções superficiais tanto para o concreto de referência quanto para o concreto leve, se propõe a contribuir em pesquisas sobre a durabilidade do concreto, visando garantir o bom desempenho dos materiais, atendendo aos requisitos contemporâneos de durabilidade e sustentabilidade das construções.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACI, AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Manual of concrete practice. Part I. 1973.

ALMEIDA, J.A. *Influência da adição de resíduo siderúrgico na performance do concreto*. Dissertação (mestrado em construção civil) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, Belo Horizonte: 2009. 74 p.

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 NORMAS TÉCNICAS. *NBR 5738; Moldagem e Cura de Corpos de Prova Cilíndricos ou Prismáticos de Concreto*. Rio de Janeiro, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 5739; Concreto – ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos*. Rio de Janeiro, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 6118; Projeto de estruturas de concreto*. Rio de Janeiro, 2014.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 7217; Agregados – determinação da composição granulométrica*. Rio de Janeiro, 1987.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 7251; Agregado em estado solto – determinação da massa unitária*. Rio de Janeiro, 1982.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 8953; Concreto para fins estruturais - Classificação por grupos de resistência*. Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 9776; Agregados – determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco de Chapman*. Rio de Janeiro, 1986.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 9778; Argamassa e concreto endurecido – Determinação da absorção de água por imersão – Índice de vazios e massa específica*. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 9779; Argamassa e concreto endurecidos — Determinação da absorção de água por capilaridade*. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 9937; Agregados – determinação da absorção e massa específica do agregado graúdo*. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 11579; Cimento Portland – Determinação da finura por meio da peneira 75 µm (nº 200) - Método de ensaio*. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 11582; Cimento Portland – Determinação da expansibilidade Le Chatelier*. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 12655; Concreto – Preparo, controle e recebimento*. Rio de Janeiro, 1996.

CHANDRA, S., BERNTSSON, L. *Lightweight aggregate concrete-Science, technology, and applications*. 1. ed. Nova York: WILLIAM ANDREW, 2002. 1 v. 450 p.

ELOY, C.M. *O papel do sistema financeiro da habitação diante do desafio de universalizar o acesso à moradia digna no Brasil*. Dissertação (mestrado em arquitetura e urbanismo) - Universidade de São Paulo, Escola de Arquitetura, São Paulo: 2013. 260 p.

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

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.

ISAIA, G.C. *Concreto: ensino, pesquisa e realizações*. 1. ed. São Paulo: IBRACON, 2005. 1 v. 792 p.

JINHWAN, J., TETSUSHI, K., HARUKI, M., HIROZO, M. Development of high-durability concrete with a smart artificial lightweight aggregate. *Journal of advanced concrete technology*. v. 10, p. 231-239, 2012.

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

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

PETRUCCI; E. G. R; *Concreto de Cimento Portland*. 7 ed. GLOBO,1980. 1 v. 307 p.

PINTO, J.D.S. *Análise da influência de superfície protetoras na durabilidade do concreto para uso em meio agressivo: uma abordagem topográfica e da estrutura do material*. Tese (doutorado em engenharia metalúrgica e de minas) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, Belo Horizonte: 2006. 114 p.

RIBEIRO, C. C., PINTO, J.D.S., STARLING, T. *Materiais de Construção Civil*, 4ª ed. Revisada. Editora UFMG, 212p., 2013.

RIES, J. P., HOLM, T., A. A holistic approach to sustainability for the concrete community. *ESCI*. Information sheet 7700.1, jun/2004.

ROSSIGNOLO, J. A.; *Concreto Leve Estrutural*. 1 ed. PINI, 2009a . 1 v. 144 p.

ROSSIGNOLO, J. A. Concreto leve estrutural: influência da argila expandida na microestrutura da zona de transição pasta/agregado. *Ambiente construído*. v. 9, n. 4, p. 119-127, 2009b .

ROSSO, T. Concretos leves na construção civil. *Instituto brasileiro do concreto*. v. 1, p. 1-81, Fev / 1973.

SILVA, E. Q., BORJA, E. V. Concreto leve a base de argila expandida: Propriedades e aplicabilidade para alvenaria de casas populares. *Centro federal de educação tecnológica do rio grande do norte*, 8 p., 2008

SPINOLA, R.M.G., ABIKO, A., BRUNA, P.J. Experiência de reconstrução europeia pós-guerra e a legislação habitacional de interesse social-caso de Santos/SP, Brasil. *Congresso luso-brasileiro para o planejamento urbano, regional, integrado e sustentável*. v. 1, n. 3, p. 568-579, Out / 2008.

VAL, J.G. *Avaliação do desempenho de camada protetora em concreto submetido a meio quimicamente agressivo*. Dissertação (mestrado em construção civil) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, Belo Horizonte: 2007. 85 p.

VAYSBURD, A.M., HOLM, T.A. *Structural lightweight aggregate concrete performance*. 1. ed. Detroit: AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, 1992. 1 v. 424 p.