



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

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**“AVALIAÇÃO DO USO DA ÁGUA MAGNETIZADA NA PRODUÇÃO DE
CONCRETOS EM CENTRAIS”**

Autor: Cristiano Oliveira Guimarães
Orientador: Prof. Abdias Magalhães Gomes

Novembro/2006

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

**“AVALIAÇÃO DO USO DA ÁGUA MAGNETIZADA NA PRODUÇÃO DE
CONCRETOS EM CENTRAIS”**

Cristiano Oliveira Guimarães

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Construção Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de “Mestre em Construção Civil”.

Comissão Examinadora:

Prof. Dr. Abdias Magalhães Gomes
DEMC/UFMG – (Orientador)

Prof. Dr. José Márcio Fonseca Calixto
DEES/UFMG

Prof. Dr. Hiran Jackson Sartori
PUC/MG

Belo Horizonte, 18 de dezembro de 2006

Cristiano Oliveira Guimarães

**“AVALIAÇÃO DO USO DA ÁGUA MAGNETIZADA NA PRODUÇÃO DE
CONCRETOS EM CENTRAIS”**

**Dissertação apresentada ao Programa de
Pós-Graduação em Construção Civil da Escola de Engenharia da UFMG**

Área de Concentração: Materiais de Construção Civil

Orientador: Prof. Abdias Magalhães Gomes

Belo Horizonte
Escola de Engenharia da UFMG
2006

A Deus que esteve sempre me guiando pelo seu caminho;

Aos meus pais, Nayr e Silvério, pelo incentivo, compreensão e amor;

À minha família pelo apoio, carinho e dedicação.

AGRADECIMENTOS

A Deus e toda a sua turma, especialmente a seu filho que pregou a sabedoria, a docência, o amor, humildade e atenção a todos sem distinção alguma. A meu Anjo da Guarda e ao Divino Espírito Santo que sempre estiveram a meu lado.

Esta dissertação é uma obra coletiva e não conseguiria finalizá-la sem a participação dos colegas, professores, amigos e funcionários com os quais tive o privilégio de conviver. Desta forma, meus sinceros agradecimentos são direcionados:

Ao Professor Doutor Abdias Magalhães Gomes pela sua valiosa orientação, amizade, referência e incansável estímulo, ao longo desses últimos nove anos, pela minha formação e desenvolvimento pessoal e acadêmica.

À eterna Nice Jane pela compreensão, companheirismo, consideração e dedicação ao estudo da língua inglesa, imprescindível à obtenção do Título de Mestre.

Aos professores José Márcio Fonseca Calixto e Hiran Jackson Sartori pelas valiosas contribuições no exame de defesa.

À CAPES pela bolsa oferecida para o desenvolvimento desta pesquisa.

Aos amigos Marco Aurélio e seu sobrinho Mateus pelo apoio e realização da parte prática necessária ao desenvolvimento deste trabalho.

E não poderia deixar de enfatizar, em especial, meus profundos agradecimentos aos amigos, funcionários e professores do Departamento de Engenharia de Materiais e Construção (DEMC) da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	ix
LISTA DE TABELAS.....	x
LISTA DE GRÁFICOS.....	xiii
LISTA DE ABREVIATURAS.....	xiv
RESUMO.....	xv
ABSTRACT.....	xvi
1 INTRODUÇÃO E RELEVÂNCIA DO TRABALHO.....	01
2 OBJETIVOS.....	04
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	05
3.1 O Concreto.....	05
3.1.1 Introdução.....	05
3.1.2 Materiais.....	09
3.1.2.1 Cimento.....	09
3.1.2.2 Agregados.....	10
3.1.2.3 Água de amassamento.....	11
3.1.2.4 Aditivos.....	11
3.1.3 Tipos.....	13
3.1.4 Dosagem.....	14
3.1.5 Mistura.....	16
3.1.6 Transporte.....	17
3.1.7 Propriedades do concreto fresco.....	17
3.1.8 Lançamento.....	19
3.1.9 Adensamento.....	19
3.1.10 Cura.....	20
3.1.11 Propriedades do concreto endurecido.....	20
3.2 O Concreto Produzido nas Centrais.....	27
3.2.1 Introdução.....	27
3.2.2 – Normalização.....	29
3.2.3 – Central de concreto.....	32

3.2.4 – Controle e fiscalização.....	37
3.3 – Água no Concreto.....	42
3.3.1 – Introdução.....	42
3.3.2 – A estrutura da água.....	46
3.3.3 – Constituição e contaminantes.....	51
3.3.4 – A água no concreto endurecido.....	58
3.3.5 – Mecanismo de redução da tensão superficial pela ação de aditivos tensoativos.....	62
3.4 – A Indução Magnética da Água.....	70
3.4.1 – Introdução.....	70
3.4.2 – Mecanismo de obtenção.....	72
3.4.3 – Benefícios proporcionados à água.....	75
3.4.4 – Tensão superficial da água.....	77
4 – MATERIAIS E MÉTODOS.....	82
4.2 – Materiais.....	83
4.2.1 – Introdução.....	83
4.2.2 – Aglomerante.....	83
4.2.3 – Agregado graúdo.....	85
4.2.3.1 – Brita calcária nº 0.....	86
4.2.3.2 – Brita calcária nº 1.....	88
4.2.4 – Agregado miúdo.....	93
4.2.5 – Adição mineral – Pó de pedra.....	97
4.2.6 – Aditivo Mastermix 390 N.....	101
4.2.7 – Água de amassamento.....	103
4.3 – Métodos.....	110
4.3.1 – Introdução.....	110
4.3.2 – Proporcionamento e misturas.....	111
4.3.3 – Ensaio realizados.....	115
4.3.4 – Análise e discussão geral dos Resultados.....	164
5 – CONCLUSÕES.....	169

6 – PROPOSTA DE NOVOS TRABALHOS.....	171
7 – REFFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	172

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Curva volume vazios e resistência à compressão.....	20
Figura 3.2 – Fissuração de uma hipotética estrutura de concreto.....	43
Figura 3.3 – Estruturas do gelo e moléculas de água em um microporo.....	47
Figura 3.4 – Ação tensão superficial nas moléculas de água junto a sólidos....	49
Figura 3.5 – Superfície sólida.....	50
Figura 3.6 - Categorias de água na pasta de cimento hidratado.....	62
Figura 3.7 – Esquema da molécula de uma substância tensoativa.....	64
Figura 3.8 – Partículas de cimento floculadas devidas à presença de ar e água.....	65
Figura 3.9 – Expulsão do ar sob a ação de um plastificante.....	66
Figura 3.10 – Esquema teórico da atmosfera iônica.....	67
Figura 3.11 – Quando não há plastificante, água necessária é grande.....	68
Figura 3.12 – Quando se adiciona plastificante, as partículas se repelem.....	69
Figura 3.13 – As distâncias entre partículas reduzem e a água é dispensada..	69
Figura 3.14 – influência da adição de um plastificante ao concreto.....	71
Figura 3.15 – Molécula de água mostrando os três núcleos e os elétrons.....	76
Figura 3.16 –Átomo e o momento de dipolo induzido \vec{p}	77
Figura 3.17 – Gota de um líquido colocada sobre uma superfície.....	80
Figura 4.1 – Protótipos de Indução magnética.....	106
Figura 4.2 – Esquema de montagem do equipamento de indução magnética..	108
Figura 4.3 – Tensiômetro digital k10st fabricado pela KRUSS.....	110

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Principais componentes do cimento.....	09
Tabela 3.2 – Denominação cimentos de acordo com as normas brasileiras.....	10
Tabela 3.3 – Deformação do concreto em várias condições de carregamento.	26
Tabela 3.4 – Parâmetros de uma água normal para confecção de concretos...	53
Tabela 3.5 – Substâncias que afetam o concreto.....	59
Tabela 3.6 – Campos magnéticos aproximados.....	73
Tabela 3.7 – Tensões superficiais para alguns líquidos à temperatura 20 °C...	79
Tabela 4.1 – Componentes do cimento Portland composto com escória.....	83
Tabela 4.2 – Exigências químicas para o cimento composto com escória.....	84
Tabela 4.3 – Exigências físicas e mecânicas para o CP II-E 40.....	84
Tabela 4.4 – Conjunto de peneiras conforme NBR NM-ISO 3310-1.....	87
Tabela 4.5 – Propriedades físicas da brita 0 utilizada neste trabalho.....	89
Tabela 4.6 – Granulometria da brita 0 utilizada neste trabalho.....	89
Tabela 4.7 – Propriedades físicas da brita 1 utilizada neste trabalho.....	92
Tabela 4.8 – Granulometria da brita 1 utilizada neste trabalho.....	92
Tabela 4.9 – Propriedades físicas da areia utilizada neste trabalho.....	96
Tabela 4.10 – Granulometria da areia utilizada neste trabalho.....	96
Tabela 4.11 – Propriedades físicas do pó de pedra utilizado neste trabalho.....	100
Tabela 4.12 – Granulometria do pó de pedra utilizado neste trabalho.....	100
Tabela 4.13 – Parâmetros físico-químicos da água de torneira.....	105
Tabela 4.14 – Parâmetros físico-químicos da água magnetizada.....	107
Tabela 4.15 – Tensão superficial da água normal e com aditivo tensoativos....	109
Tabela 4.16 – Proporção dos materiais nos traços de concreto convencional..	112
Tabela 4.17 – Proporção dos materiais nos traços de concreto bombeado.....	112
Tabela 4.18 – Ordem de colocação dos materiais na betoneira.....	116
Tabela 4.19 – Temperatura água de amassamento concretos convencionais..	116
Tabela 4.20 – Temperatura água de amassamento concretos bombeados.....	117
Tabela 4.21 – Valores do <i>slump test</i> dos concretos convencionais.....	117

Tabela 4.22 – Valores do <i>slump test</i> dos concretos bombeados.....	118
Tabela 4.23 – Determinação das propriedades dos concretos endurecidos.....	119
Tabela 4.24 – Resistências compressão concreto convencional de 10 MPa.....	121
Tabela 4.25 – Resistências compressão concreto convencional de 15 MPa.....	122
Tabela 4.26 – Resistências compressão concreto convencional de 18 MPa.....	123
Tabela 4.27 – Resistências compressão concreto convencional de 20 MPa.....	124
Tabela 4.28 – Resistências compressão concreto convencional de 25 MPa.....	125
Tabela 4.29 – Resistências compressão concreto convencional de 30 MPa.....	126
Tabela 4.30 – Resistências compressão concreto bombeado de 10 MPa.....	127
Tabela 4.31 – Resistências compressão concreto bombeado de 15 MPa.....	128
Tabela 4.32 – Resistências compressão concreto bombeado de 18 MPa.....	129
Tabela 4.33 – Resistências compressão concreto bombeado de 20 MPa.....	130
Tabela 4.34 – Resistências compressão concreto bombeado de 25 MPa.....	131
Tabela 4.35 – Resistências compressão concreto bombeado de 30 MPa.....	132
Tabela 4.36 – Resistências à tração do concreto convencional de 10 MPa.....	140
Tabela 4.37 – Resistências à tração do concreto convencional de 15 MPa.....	141
Tabela 4.38 – Resistências à tração do concreto convencional de 18 MPa.....	141
Tabela 4.39 – Resistências à tração do concreto convencional de 20 MPa.....	142
Tabela 4.40 – Resistências à tração do concreto convencional de 25 MPa.....	142
Tabela 4.41 – Resistências à tração do concreto convencional de 30 MPa.....	143
Tabela 4.42 – Resistências à tração do concreto bombeado de 10 MPa.....	143
Tabela 4.43 – Resistências à tração do concreto bombeado de 15 MPa.....	144
Tabela 4.44 – Resistências à tração do concreto bombeado de 18 MPa.....	144
Tabela 4.45 – Resistências à tração do concreto bombeado de 20 MPa.....	145
Tabela 4.46 – Resistências à tração do concreto bombeado de 25 MPa.....	145
Tabela 4.47 – Resistências à tração do concreto bombeado de 30 MPa.....	146
Tabela 4.48 – Módulo elasticidade dinâmico concreto convencional 10 MPa...	149
Tabela 4.49 – Módulo elasticidade dinâmico concreto convencional 15 Mpa....	150
Tabela 4.50 – Módulo elasticidade dinâmico concreto convencional 18 MPa...	151
Tabela 4.51 – Módulo elasticidade dinâmico concreto convencional 20 MPa...	152

Tabela 4.52 – Módulo elasticidade dinâmico concreto convencional 25 MPa...	153
Tabela 4.53 – Módulo elasticidade dinâmico concreto convencional 30 MPa...	154
Tabela 4.54 – Módulo elasticidade dinâmico concreto bombeado 10 MPa.....	155
Tabela 4.55 – Módulo elasticidade dinâmico concreto bombeado 15 MPa.....	156
Tabela 4.56 – Módulo elasticidade dinâmico concreto bombeado 18 MPa.....	157
Tabela 4.57 – Módulo elasticidade dinâmico concreto bombeado 20 MPa.....	158
Tabela 4.58 – Módulo elasticidade dinâmico concreto bombeado 25 MPa.....	159
Tabela 4.59 – Módulo elasticidade dinâmico concreto bombeado 30 MPa.....	160
Tabela 4.60 – Absorção de água do concreto convencional de 10 MPa.....	161
Tabela 4.61 – Absorção de água do concreto convencional de 15 MPa.....	161
Tabela 4.62 – Absorção de água do concreto convencional de 18 MPa.....	161
Tabela 4.63 – Absorção de água do concreto convencional de 20 MPa.....	162
Tabela 4.64 – Absorção de água do concreto convencional de 25 MPa.....	162
Tabela 4.65 – Absorção de água do concreto convencional de 30 MPa.....	162
Tabela 4.66 – Absorção de água do concreto bombeado de 10 MPa.....	162
Tabela 4.67 – Absorção de água do concreto bombeado de 15 MPa.....	163
Tabela 4.68 – Absorção de água do concreto bombeado de 18 MPa.....	163
Tabela 4.69 – Absorção de água do concreto bombeado de 20 MPa.....	163
Tabela 4.70 – Absorção de água do concreto bombeado de 25 MPa.....	163
Tabela 4.71 – Absorção de água do concreto bombeado de 30 MPa.....	164
Tabela 4.72 – Aumento da resistência para os concretos convencionais.....	165
Tabela 4.73 – Aumento da resistência para os concretos bombeados.....	166
Tabela 4.74 – Economia média (%) da quantidade de cimento.....	167

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 3.1 – Tensão superficial da água em função da temperatura.....	51
Gráfico 4.1 – Curvas compressão concreto convencional de 10 MPa x Idade..	133
Gráfico 4.2 – Curvas compressão concreto convencional de 15 MPa x Idade..	133
Gráfico 4.3 – Curvas compressão concreto convencional de 18 MPa x Idade..	134
Gráfico 4.4 – Curvas compressão concreto convencional de 20 MPa x Idade..	134
Gráfico 4.5 – Curvas compressão concreto convencional de 25 MPa x Idade..	135
Gráfico 4.6 – Curvas compressão concreto convencional de 30 MPa x Idade..	135
Gráfico 4.7 – Curvas compressão concreto bombeado de 10 MPa x Idade.....	136
Gráfico 4.8 – Curvas compressão concreto bombeado de 15 MPa x Idade.....	136
Gráfico 4.9 – Curvas compressão concreto bombeado de 18 MPa x Idade.....	137
Gráfico 4.10 – Curvas compressão concreto bombeado de 20 MPa x Idade....	137
Gráfico 4.11 – Curvas compressão concreto bombeado de 25 MPa x Idade....	138
Gráfico 4.12 – Curvas compressão concreto bombeado de 30 MPa x Idade....	138

LISTA DE ABREVIATURAS

ABESC	Associação das Empresas Brasileiras de Serviços de Concretagem
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	American Concrete Institute
ASTM	American Society for Testing and Materials
B.S.	British Standard Institution
°C	Grau Celsius
cm/s	Centímetro por segundo
DEMC	Departamento de Engenharia e Materiais de Construção
f_{C3}	Resistência à compressão aos 3 dias
f_{C7}	Resistência à compressão aos 7 dias
f_{C28}	Resistência à compressão aos 28 dias
f_{C90}	Resistência à compressão aos 90 dias
f_{C365}	Resistência à compressão aos 365 dias
GPa	Giga Pascal
kcal/kg	Quilocaloria por quilograma
kg/cm ²	Quilograma por centímetro quadrado
kg/m ³	Quilograma por metro cúbico
m ³	Metro cúbico
mg/L	Miligramma por litro
μm	Micrometro
mm/m	Milímetro por metro
MPa	Mega Pascal
NBR	Norma Brasileira Registrada
NM	Norma Mercosul
ohms/cm ²	Ohms por centímetro quadrado
ppm	Partes por milhão
T	Tesla
UFMG	Universidade Federal de Minas Gerais

RESUMO

É fato notório que, no mundo atual, muito pouco se têm estudado e pesquisado sobre a água comumente utilizada na produção de concretos, suas características e, sobretudo, a sua influência nas propriedades físicas e mecânicas de argamassas e concretos. E é neste contexto que se viabilizou o presente trabalho, focado na análise e performance de concretos produzidos a partir do uso de uma água referenciada como magnetizada, que foi previamente submetida a um campo magnético fixo. O estudo da utilização da água magnetizada já é realidade em alguns países, tais como: Rússia, China, Japão, Estados Unidos e agora no Brasil. A magnetização da água proporciona à mesma uma redução de sua tensão superficial e, por conseqüência, uma melhor hidratação dos compostos cimentícios. Em função desta melhoria, há uma mudança na reologia do concreto, tanto no estado fresco quanto endurecido, com registros de ganhos de resistência, consistência e trabalhabilidade, se comparado com um concreto de mesma composição, e que foi confeccionado a partir de uma água sem tratamento prévio. Os resultados mostram que a resistência à compressão do concreto produzido com a água magnetizada é superior àquele com água normal sem tratamento, e a partir desta situação é possível reduzir o consumo de cimento, bem como os custos de produção dos concretos na indústria da construção civil.

Palavras Chave: Concreto; água magnetizada; redução de cimento; tensão superficial; hidratação do cimento.

ABSTRACT

It is known, nowadays, that very few has been studied and researched about the water used in the concrete productions. And it is in this context that we have the possibility to study the concrete fabrication using the magnetic water, also used in researches developed in Russia, China, Japan, United States and now in Brazil. The magnetization of water causes a decrease in its superficial tension, offering better hydration to the cement's compounds. In face of this improvement in hydration on increase in the concrete's compressive strength, consistency and workability are registered, comparing to a concrete with the same composition, but prepared with normal water, not previously treated. The results showed that the compressive strength of the concrete prepared with magnetized water was higher than those prepared with normal water. Therefore, it is possible to reduce the consumption of cement, as well as the concrete's production costs in the civil construction industry.

Key words: Concrete; magnetized water; cement's reduction; superficial tension; cement's hydration.

1 INTRODUÇÃO E RELEVÂNCIA DO TRABALHO

As propriedades das águas vêm sendo estudadas sistematicamente por mais de 80 anos. No entanto, poucos foram os ganhos de conhecimento obtidos por esses estudos, especialmente no que diz respeito à água de amassamento de concretos e argamassas (MIKHANLVSKII *et al*, 1976). Até o presente momento, a normalização vigente da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), admite como suficiente avaliar apenas as características de potabilidade e composição química da mesma.

Pesquisas desenvolvidas em países como China, Japão, Estados Unidos e Rússia revelaram que a água de amassamento de concretos, previamente magnetizada, poderá interagir na sistemática de hidratação dos componentes cimentícios (SU *et al*, 2000). Estudos dão conta de que no Brasil o primeiro equipamento utilizado proporcionava um campo magnético reduzido, insuficiente para a obtenção da desejável redução da tensão superficial das moléculas da água. Já em 1999 foi desenvolvido um outro equipamento que proporcionou a geração de um campo magnético mais potente (GOMES *et al*, 1999). Somente no ano de 2002 foi possível desenvolver um equipamento capaz de proporcionar um campo magnético da ordem de 0,8 Tesla, suficiente para a realização dos objetivos almejados, quais sejam: tornar a água mais fluida e com uma maior capacidade e eficiência de hidratação e molhagem. Estas pesquisas foram desenvolvidas pelo Departamento de Engenharia e Materiais de Construção (DEMC) da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) e proporcionaram observar consideráveis melhorias das propriedades físicas e mecânicas dos concretos tanto no estado fresco quanto no estado endurecido, a partir do uso da água magnetizada.

A justificativa para a realização deste trabalho partiu da possibilidade de se produzir concretos mais baratos através de uma tecnologia focada na água de amassamento utilizada para a produção dos mesmos. É sabido que o produto mais caro de um concreto é o cimento e, assim sendo, torna-se mister utilizar

dosagens bem proporcionadas, as quais satisfaçam às especificações de desempenho a partir do menor custo possível. Além disso, todo empenho possível deve ser feito no sentido de reduzir o consumo de cimento numa correta dosagem, sem, evidentemente, interferir nas propriedades desejáveis a um concreto, especialmente a trabalhabilidade, a consistência, a resistência, o módulo de elasticidade e a durabilidade.

A produção de cimento provoca comumente um considerável impacto ao meio ambiente, sem contar que é grande geradora de CO₂, cuja emissão tem sido objeto de planejamento e controle. Desta forma, estudos de novos mecanismos, ou novas tecnologias ou processos que permitam produzir concretos duráveis, a partir da redução do consumo de cimento, são sempre bem vindos e oportunos. Em resumo, é peça importante para o adequado desenvolvimento sustentável. A sustentabilidade promove a redução da extração de materiais da natureza, minimizando os impactos ambientais.

É importante ressaltar que a conseqüente redução do consumo de cimento e de aditivos tensoativos na produção de concreto, a partir do uso da tecnologia da água magnetizada, proporcionará uma redução dos custos das construções, viabilizando para muitos a tão sonhada casa própria. Outro impacto importante desta redução de consumo de cimento promovida pela utilização da água magnetizada, esta ligada diretamente às indústrias de artefatos de cimento (blocos e tijolos para alvenaria, pisos, lajes, tubos, etc).

Do ponto de vista tecnológico, este trabalho irá contribuir com a comunidade científica, para um melhor entendimento em relação aos mecanismos e a performance de hidratação do cimento durante a produção de concretos, a partir do uso da água magnetizada.

Quanto à relevância do trabalho sob a ótica do impacto ambiental, é fácil entender que, quanto menos cimento for requerido pelas construções, menor será a emissão dos gases poluentes na atmosfera, garantindo assim menos agressão ao meio ambiente.

Em suma, este trabalho está focado na avaliação do uso da água magnetizada na produção de concretos por centrais dosadoras e objetiva produzir concretos duráveis e de boa qualidade, a partir da redução de consumo de cimento e de custos de produção.

2 OBJETIVOS

O objetivo principal deste trabalho é a avaliação do uso da água de amassamento, submetida a um campo magnético fixo, na confecção de concretos produzidos em centrais dosadoras.

Nesta direção, pretende-se atingir os seguintes objetivos específicos:

- Avaliar o comportamento, no estado fresco, de diversos concretos produzidos com e sem água magnetizada, dando ênfase na determinação da consistência e da trabalhabilidade;
- Avaliar o comportamento, no estado endurecido, de concretos produzidos com água magnetizada, com foco, sobretudo nas propriedades mecânicas, tais como: resistência à compressão; resistência à tração; módulo de elasticidade dinâmico e absorção de água;
- Avaliação da redução do consumo de cimento e aditivos tensoativos em concretos produzidos a partir do uso da água magnetizada.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 O Concreto

3.1.1 Introdução

Etimologicamente a palavra “concreto” origina-se do latim “concretum” que significa condensado, solidificado, compacto. No Brasil este termo designa material que se constitui de água, cimento, areia, pedra britada ou natural, adições e aditivos.

As datas mais importantes que marcaram a história do concreto desde o seu início foram as seguintes:

- 5600 a.C. – indício que o concreto mais antigo foi descoberto na cidade de Lepenski Vir, na Iugoslávia às margens do rio Danúbio;
- 1950 a.C. – descoberta de uma mistura de agregados com um ligante, provavelmente cal ou gesso, nas pirâmides do Egito;
- 1817 – Louis Vicat redigiu um artigo onde mostrou que a queima conjunta de calcário e argila promoviam a obtenção de cimento;
- 1818 – a Academia das Ciências de Paris aprovava a descoberta de Louis Vicat, o qual estava autorizado a aplicar sua descoberta na construção da ponte de Souil-lac;
- 1824 – o inglês Joseph Aspdin patenteava a fabricação do cimento, semelhante ao de Vicat, diferindo apenas na temperatura de calcinação que era mais elevada;
- 1848 – Joseph Louis Lambot impulsionou a expansão do concreto ao adicionar ferragens em sua massa na construção de um barco;

- 1850 – Louis Vicat observou as primeiras alterações que a água do mar proporcionava ao seu produto recém descoberto, surgindo aqui o início da preocupação com a durabilidade dos componentes de concreto;
- 1852 – construiu-se o primeiro pavimento de concreto armado;
- 1865 – W. B. Wilkinson construiu uma casa de concreto armado em Newcastle-on-Tyne;
- 1867 – Joseph Monier, um jardineiro do palácio de Versailles, patenteava um “sistema de caixas-reservatórios portáteis de ferro e cimento aplicáveis à horticultura”. Não explorou a idéia e vendeu a patente aos alemães;
- 1888 – Doehning lançou a idéia de concreto protendido, a qual não implacou. Candlot determinou a causa principal da degradação do concreto – a formação do sulfoaluminato de cálcio;
- 1890 – início do que se sabe até hoje de concreto armado, devido aos estudos experimentais e teóricos de Considere, Rabut e Mesnager, os quais estabeleceram as leis fundamentais da resistência do concreto;
- 1896 – R. Feret descobria a relação entre a resistência à compressão e compacidade do concreto, que mais tarde seria atribuída à curva de Abrams;
- 1898 – o arquiteto Auguste Perret expandia as obras em concreto armado na época;
- 1900 – Mörsch desenvolve a base científica do dimensionamento do concreto armado;

- 1907 – os americanos Fuller e Thompson propuseram a primeira curva granulométrica simplificando as várias tentativas de encontrar a melhor compactidade;
- 1917 – Freyssinet aplicou pela primeira vez a vibração no concreto;
- 1918 – Duff Abrams introduziu as noções de módulo de finura e trabalhabilidade na confecção de concretos;
- 1923 – Ruína de uma obra na Califórnia devido a expansões do concreto, as quais não podiam ser explicadas até esta data;
- 1926 – surgiram os primeiros vibradores internos;
- 1928 – surgimento do concreto protendido através de Freyssinet;
- 1950 – Jacques Ferran evidenciou as reações químicas e físico-químicas entre os componentes hidratados do cimento e a superfície dos agregados.

Portanto, esses estudos e descobertas foram de extrema importância para a utilização e consolidação do concreto como material de construção no século XX. Como também se observou no histórico apresentado, a preocupação com a durabilidade dos componentes de concreto teve início em 1850, uma vez que o concreto apresenta alta alcalinidade e enorme energia interna tornando-o um material instável. Devido a este fato, raras são as ruínas e estruturas de concreto que foram encontradas pelos pesquisadores, sobretudo aquelas edificadas pelos romanos, sendo notório que apenas as construções em pedras se perpetuaram até os dias atuais (COUTINHO, 1988).

Em função destas considerações, os engenheiros projetistas de estruturas de concreto armado devem estar sempre atentos não somente à resistência característica à compressão do concreto, mas também ao tipo de cimento, qualidade do agregado, fator água/cimento, adições e aditivos utilizados na dosagem do concreto, como forma de garantir à estrutura uma durabilidade mínima requerida por projeto, função também de sua utilização.

As causas que evidenciam as manifestações patológicas nas estruturas de concreto se relacionam com a agressividade do meio e às características da própria estrutura quanto à qualidade dos materiais empregados, projetos, execução e utilização. Assim, os avanços dos pesquisadores nem sempre foram assimilados pelos usuários dessas pesquisas, sendo que o setor da construção civil não empregou corretamente as pesquisas desenvolvidas em laboratórios, culminando na prática, em experiências mal sucedidas. Tais insucessos se refletiram nas patologias das estruturas de concreto que resultaram na diminuição da vida útil prevista em projeto e, sobretudo, alto custo de reparo prematuro das mesmas.

Um grande problema relacionado com a falta de durabilidade das estruturas de concreto armado nos dias de hoje é evidenciado por constantes mudanças das propriedades dos cimentos, na medida em que estão cada vez mais finos, fato que proporciona maiores resistências e que acabam induzindo os construtores a uma retirada das formas e moldes com precocidade. Tal fato acaba expondo a superfície do concreto às intempéries em idade muito jovem, ocasião em que o mesmo ainda não tem a necessária maturidade (MEHTA, 1994).

Outro problema com a durabilidade é o fracionamento do conhecimento dos vários engenheiros inseridos no processo construtivo, porque os projetistas de estrutura não possuem conhecimento dos materiais e vice-versa os tecnologistas. Deve-se lembrar aqui que os ícones das construções do passado eram excelentes

projetistas estruturais e profundos conhecedores e detentores da tecnologia de execução do concreto.

A preocupação com a durabilidade das estruturas de concreto é evidente e no Brasil a norma NBR 6118 - *Projeto de estruturas de concreto - Procedimento* (ABNT, 2004) apresenta dois capítulos específicos sobre este assunto.

Por fim, um concreto utilizado em uma obra exige de seu executor, um perfeito conhecimento das propriedades e também das qualidades dos materiais constituintes, bem como do proporcionamento destes, da técnica, do preparo e da utilização.

3.1.2 Materiais

Os materiais que são utilizados e combinados para a confecção dos vários tipos de concreto são: cimento, agregados, água, aditivos e adições. Tais materiais serão descritos a seguir:

3.1.2.1 Cimento

O cimento pode ser definido como um aglomerante hidráulico obtido através da mistura proporcionada de calcário (Carbonato de cálcio), argila (silicatos e aluminatos), e adições (gesso, escória de alto-forno, materiais pozolânico e outras) em fornos rotativos com temperaturas em torno de 1400°C.

A partir de uma análise química do cimento, podemos determinar os seus principais componentes, expressos em óxidos, conforme a Tabela 3.1, se apresenta uma notação própria da química de cimento (abreviação), que muito nos auxilia a compreender os fenômenos envolvidos com a sua hidratação e endurecimento (TAYLOR, 1997):

Tabela 3.1 – Principais componentes do cimento

ÓXIDOS	NOMENCLATURA	ABREVIÇÃO
CaO	Cal	C
SiO ₂	Sílica	S
Al ₂ O ₃	Alumina	A
Fe ₂ O ₃	Óxido de Ferro	F
MgO	Magnésia	M
SO ₃	Anidrido Sulfuroso	\bar{S}
Na ₂ O e K ₂ O	Álcalis	-

Portanto, uma última consideração a ser destacada neste tópico refere-se aos tipos de cimento Portland produzidos pela indústria brasileira de cimento e suas respectivas normas, como está apresentado na Tabela 3.2 (MEHTA, 1994).

Tabela 3.2 – Denominação dos cimentos de acordo com as normas brasileiras

DENOMINAÇÃO DOS CIMENTOS	SIGLA	NORMA
Portland Comum	CPI	NBR 5732
Portland Comum com Adição	CP I-S	NBR 5732
Portland Composto com Escória	CP II-E	NBR 11578
Portland Composto com Pozolana	CP II-Z	NBR 11578
Portland Composto com Fíler	CP II-F	NBR 11578
Portland de Alto-Forno	CP III	NBR 5735
Portland Pozolânico	CP IV	NBR 5736
Portland de Alta Resistência Inicial	CP V-ARI	NBR 5733
Portland Branco	CPB	NBR 12989
Portland Resistente a Sulfatos	Acrescenta "RS" aos anteriores	NBR 5737

3.1.2.2 Agregados

Agregado pode ser definido como um material sem forma e volume definido que não entra em reação complexa com a água, de propriedades adequadas para utilização no concreto. Os agregados constituem cerca de 60% a 80% do volume do concreto, barateando o custo do mesmo.

Numa classificação muito importante dos agregados, quanto às dimensões de suas partículas podem ser entendidos como miúdos ou graúdos. Agregado miúdo é aquele que apresenta partículas menores que 4,8 mm (passante na peneira n° 4 conforme NBR 7211 – *Agregados para concreto* (ABNT, 1983)) e agregado graúdo é aquele que apresenta partículas maiores que 4,8 mm (retidas na peneira n° 4).

Os agregados podem ser de origem natural e/ou artificial de rochas ígneas, metamórficas ou sedimentares. Os agregados naturais compreendem aqueles que são encontrados na natureza sob a forma de agregados como as areias de minas, cursos de água, seixos e outros. Já os agregados artificiais compreendem aqueles que sofreram algum tipo de beneficiamento como britagem, peneiramento e etc. Assim, os agregados artificiais mais utilizados na confecção de concreto são as britas de gnaiss e calcário (MEHTA, 1994).

Quando considera a massa unitária dos agregados, eles podem ser também classificados como ultraleves (poliestireno expandido, vermiculita, vidro expandido e outros), leves (argila expandida, escória de alto-forno expandida, cinzas volantes sinterizadas e outros), normais (areia, rocha britada e outros) e pesados (limonita, magnetita, barita e outros).

3.1.2.3 Água de amassamento

Em particular, toda água que não apresente cheiro, cor e/ou sabor, pode ser utilizada como água de amassamento na confecção de concreto. Porém, existe uma desconfiança na utilização de uma água que apresente características diferentes das que foram enunciadas anteriormente. Também devemos ter o cuidado de que toda água que serve para beber possa ser utilizada em concretos e que a recíproca, não é verdadeira. Este tópico será melhor discutido no item 3.3 desta dissertação.

3.1.2.4 Aditivos

Aditivos podem ser definidos como substâncias que se adicionam durante o amassamento do concreto, que lhe conferirão mudança em suas propriedades tanto no estado fresco quanto no estado endurecido.

A utilização de aditivos é bastante antiga, praticada desde o surgimento dos ligantes hidráulicos quanto do próprio cimento. Os primeiros aditivos como o sangue, a clara do ovo, a banha e o leite foram utilizados pelos romanos no concreto de pozolana. Já no final da década de 60, os aditivos eram subprodutos industriais e em meados da década de 70 possuíam formulações específicas com estruturas moleculares definidas (COUTINHO, 1988).

Os efeitos que se esperam dos aditivos incorporados durante a confecção dos concretos podem ser:

- a) aprimorar a trabalhabilidade;
- b) acelerar e/ou retardar a pega;
- c) aumento de resistência nos primeiros meses;
- d) acelerar o endurecimento nas primeiras idades em tempo frio;
- e) incrementar a resistência aos ciclos de gelo e degelo;
- f) incremento na impermeabilidade;
- g) impedir a segregação e a sedimentação do cimento nas caldas de injeção;
- h) promover a expansão;
- i) melhorar a aderência ao agregado;
- j) promover coloração;
- k) preparar concretos leves;
- l) promover propriedades germicidas, fungicidas e inseticidas;
- m) inibir a corrosão das armaduras;
- n) ajudar na performance dos concretos bombeados;
- o) melhorar a compacidade;
- p) diminuir a retração;
- q) aumentar a durabilidade.

A norma brasileira NBR EB 1763 – *Aditivos para concreto de cimento Portland* (ABNT, 1992) classifica os aditivos conforme a seguinte notação:

- tipo P - aditivo plastificante;
- tipo R - aditivo retardador;
- tipo A - aditivo acelerador;
- tipo PR - aditivo plastificante retardador;
- tipo PA - aditivo plastificante acelerador;
- tipo IAR - aditivo incorporador de ar;
- tipo SP - aditivo superplastificante;
- tipo SPR - aditivo superplastificante retardador;
- tipo SPA - aditivo superplastificante acelerador.

Por fim, é relevante salientar que, a melhor condição para se empregar aditivos em concretos é a sua utilização de maneira correta e segura. Não se deve pensar, em hipótese nenhuma, que a utilização de aditivos possa corrigir concretos mal confeccionados. Diante dos vários tipos de aditivos listados anteriormente, esta pesquisa utilizou, para a confecção dos concretos, somente o aditivo plastificante. Este aditivo possui a capacidade de reduzir a água de amassamento do concreto e é classificado como tensoativo. Este tema será abordado no item 3.3.5, onde estará descrito o mecanismo de redução da tensão superficial da água promovido pela ação de aditivos tensoativos.

3.1.3 Tipos

Os tipos de concreto podem ser definidos de acordo com sua massa específica sendo:

- concreto leve: massa específica entre 400-1800 kg/m³;
- concreto normal ou tradicional: massa específica entre 2300-2500 kg/m³;
- concreto pesado: massa específica acima de 2500 kg/m³.

Quanto à resistência os concretos podem ser classificados da seguinte maneira:

- concreto de baixa resistência: ≤ 20 MPa.
- concreto de resistência normal: 20 MPa a 40 MPa.
- concreto de alta resistência: > 40 MPa (MEHTA, 1994).

Além do que foi exposto por MEHTA, gostaria também de expor uma outra classificação para os concretos. Trata-se dos concretos especiais que serão listados a seguir, e ficam como sugestão de estudos complementares:

- concreto normal;
- concreto para pavimentação;
- concreto auto-adensável;
- concreto estrutural leve;
- concreto com alta densidade;
- concreto com alta trabalhabilidade;
- concreto com retração compensada;
- concreto reforçado com fibras;
- concreto contendo polímeros;
- concreto pesado para blindagem de radiação;
- concreto massa;
- concreto com ar incorporado;
- concreto branco;
- concreto colorido;
- concretos refratários;
- concretos de alto desempenho (CAD);
- concreto condutivo;
- concreto translúcido;
- concretos de ultra-alto-desempenho (CUAD) (VASCONCELOS, 1992).

3.1.4 Dosagem

Após a seleção dos materiais que irão compor o traço do concreto para se atingir o desempenho desejado, realiza-se um passo seguinte que é a dosagem do concreto. A dosagem do concreto possui a característica principal de promover a proporção ideal de seus constituintes que atenda às especificações pré-estabelecidas. O traço do concreto pode ser especificado tanto em peso quanto em volume (COUTINHO, 1988).

Conseqüentemente a uma dosagem bem feita, se tem um produto com uma trabalhabilidade e resistência bem definida. Estas duas características são os requisitos mais importantes de um concreto bem dosado. De igual importância, não se deve esquecer também dos fatores de durabilidade e deformabilidade que são bastante discutidos e apresentados em vários trabalhos atualmente elaborados.

No Brasil, ainda não se tem uma descrição consensual de como deve ser realizado um estudo de dosagem, o que caracteriza vários pesquisadores a estabelecerem seus próprios métodos (CONCRETO, 2005).

A partir dos vários tipos de concretos existentes, é notório que para cada um deles, existe, na literatura mundial, diversos métodos de dosagem do concreto ideal, que satisfaça o requisito de desempenho a um menor custo possível ou seja, pressupõe-se escolher materiais adequados a preços razoáveis. Portanto, uma consideração importantíssima é reconhecer que cimento custa muito mais caro que agregado. Além disso, todo empenho possível deve ser feito no sentido de reduzir o consumo de cimento numa correta dosagem sem, evidentemente, deturpar as propriedades esperadas do concreto, especialmente a trabalhabilidade, consistência, resistência, módulo e durabilidade.

Devido à complexidade de conferir ao concreto um melhor proporcionamento dos materiais constituintes é que vários pesquisadores e profissionais consideram que a dosagem do concreto é mais uma arte do que ciência (MEHTA, 1994).

3.1.5 Mistura

Diante do proporcionamento dos materiais que irão compor o concreto é que se define a sua mistura, para promover o revestimento de todas as partículas com a pasta de cimento, constituindo uma massa homogênea.

A partir da especificidade de cada obra e volume de concreto necessário, o processo de mistura desse concreto poderá ser feita na própria obra ou em centrais produtoras de concreto. Como se pode perceber, a mistura de concretos poderá ser realizada manualmente ou mecanicamente. As misturas manuais devem ser realizadas somente em obras de pequena importância onde o volume (cerca de 1 a 2 m³ por hora) e a responsabilidade não justificarem a utilização de equipamentos mecânicos (GIAMMUSSO, 1992). Existem vários tipos de equipamentos para a realização das misturas mecanizadas e que serão somente citados como podemos ver abaixo:

- betoneira basculante;
- betoneira de eixo horizontal e com inclinação variável;
- misturador de eixo vertical;
- caminhão betoneira.

De um modo geral, para uma melhor consistência da massa, recomendam-se os seguintes passos de adicionamento dos materiais nos equipamentos mecanizados. Primeiramente adiciona-se uma certa quantidade da água necessária ao amassamento, juntamente com uma certa quantidade de agregado graúdo. Logo em seguida adiciona-se o agregado miúdo e o cimento. Por fim adiciona-se o restante da água e o restante do agregado graúdo. O aditivo deve ser previamente misturado à primeira parcela de água adicionada. Um tempo ideal

de amassamento em betoneiras varia de 31 segundos até 130 segundos para uma melhor homogeneidade da massa.

3.1.6 Transporte

O concreto confeccionado em betoneira na obra ou em centrais de concretagem deve ser transportado o mais rápido possível até o local de lançamento e adensamento do mesmo. Este transporte deve ser realizado com o máximo de cuidado para que o concreto não segregue e enrijeça, perdendo assim a sua homogeneidade (REBUT, 1975). A seguir serão citados os equipamentos de manuseio e transporte do concreto até o local de lançamento:

- caminhão agitador;
- caminhão betoneira;
- caminhão transportador;
- grua;
- caçamba;
- carrinho de mão;
- calha;
- esteira rolante;
- equipamento de projeção pneumática;
- bombas;
- tremonha e outros.

3.1.7 Propriedades do concreto fresco

Como se sabe, para se obter um concreto que atenda aos parâmetros de estabilidade e durabilidade conforme a NBR 6118 – *Projetos de estrutura de concreto - Procedimento* (ABNT, 2003), é muito importante que as suas propriedades sejam bem definidas, para se atingir esses objetivos. As principais

propriedades do concreto fresco são: a trabalhabilidade, a consistência, a integridade da massa e o poder que ela tem de reter a água.

Trabalhabilidade é a harmonia das propriedades do concreto fresco, a qual facilita o seu manuseio sem perda de sua homogeneidade. Conseqüentemente, outras propriedades intrinsecamente ligadas a trabalhabilidade são a fluidez e a coesão. A fluidez é a facilidade de mobilidade do concreto fresco e a coesão é a resistência deste concreto à exsudação e à segregação.

Os fatores que afetam a trabalhabilidade são: a qualidade dos agregados, relações de água/cimento e agregado/cimento, aditivos e adições.

Destaca-se aqui também a propriedade de tempo de pega dos concretos cujas causas se apresentam no momento que a água entra em contato com o cimento, desencadeando as diversas reações de hidratação. Vale a pena ressaltar que o tempo de pega do concreto é diferente do tempo de pega do cimento que compõe esse mesmo concreto. Assim o tempo de pega do concreto é definido pelo início da solidificação da massa fresca sendo dividido em duas etapas. A primeira é especificada como tempo de início de pega que é marcada pela dificuldade, ou melhor, pela não possibilidade de se misturar, transportar e lançar o concreto fresco. Já a segunda é especificada como tempo de fim de pega, o qual é marcado pelo início da resistência (COUTINHO, 1988).

O processo mais utilizado pelos laboratórios e canteiros de obra para se ter noção da trabalhabilidade a partir da consistência do concreto é a realização do ensaio de abatimento do tronco de cone (*slump test*). Este ensaio é normalizado pela NBR NM 67 – *Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone* (ABNT, 1998). Existem outros tipos de ensaios para se medir a trabalhabilidade do concreto como o ensaio do fator de compactação, ensaio Vebe, ensaio de espalhamento, ensaio de penetração, e mais recentemente os ensaios de funil em V, fluxo no cone de Abrams e o fluxo na caixa em L.

Por fim, como foram destacados diversas propriedades que o concreto fresco possui e que nesta etapa são realizadas inúmeras operações com ele, as quais serão discutidas posteriormente. Estas operações compreendem a mistura, transporte, lançamento, adensamento e cura.

3.1.8 Lançamento

O lançamento do concreto deve ser feito o mais próximo possível do local de seu adensamento final. Para se evitar o aparecimento de juntas frias, juntas de concretagem e planos de fratura, o concreto deve ser lançado rapidamente, evitando assim, que a primeira camada de concretagem atinja a pega antes da camada subsequente.

Para que esta operação seja realizada com sucesso, as superfícies das fôrmas devem estar preparadas para o recebimento do concreto e conseqüentemente o lançamento e adensamento devem ser realizado por mão-de-obra qualificada e rigorosamente fiscalizada.

3.1.9 Adensamento

A etapa do adensamento consiste em vibrar o concreto para que o ar contido em seu interior seja expulso para o exterior, proporcionando uma melhor acomodação de seus constituintes. O adensamento pode ser realizado de forma manual (através de hastes) ou mecânica (através de vibradores).

Estudos comprovam, como se pode observar na Figura 3.1, que a presença de apenas 5% de vazios no interior da massa proporciona uma queda de 30 % da resistência à compressão, o que equivale a um aumento de 25% da água de amassamento. Desta maneira, um bom adensamento do concreto ainda é mais importante do que o controle da água de amassamento (COUTINHO, 1988).

Vale a pena destacar outro importante fator que até então era proibido de ser executado nas construções devido a pouca ou nenhuma informação disponível no mundo científico. Trata-se da revibração do concreto, que se realizada 1 ou 2 horas após o adensamento e vibração inicial, antes da finalização da pega, em certas ocasiões específicas, se faz necessário para que se minimize fissuras de retração, juntas frias e de concretagem, originadas do primeiro adensamento e/ou devido ao fenômeno de exsudação do concreto.

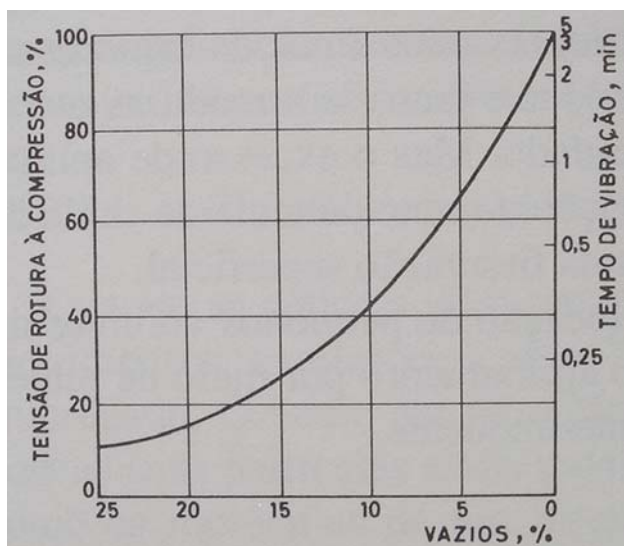


Figura 3.1 – Curva da relação entre o volume de vazios e a resistência à compressão (COUTINHO, 1988)

3.1.10 Cura

A cura pode ser definida como o processo de impedimento da evaporação da água de amassamento necessária à hidratação do cimento, promovendo o controle da temperatura interna do concreto por um certo período de tempo para que este alcance uma resistência esperada (GIAMMUSSO, 1992).

Os processos de cura para os concretos podem ser feitos através do represamento, imersão, borrifamento, neblina ou vapor de água. Também se podem utilizar sacos de aniagem, sacos de cimento e ou mantas geotêxtil embebidas em água. Existem também outros processos de vedação da superfície de concretagem como as mantas de papel impermeável, de polietileno ou compostos formadores de membrana de cura (produtos resinosos ou parafínicos).

3.1.11 Propriedades do concreto endurecido

As propriedades do concreto endurecido se verificam após o final de sua pega. O concreto endurecido se torna sensível às condições ambientais, físicas, químicas e mecânicas. Cabe aqui ressaltar que nem sempre é satisfatório desenvolver um concreto altamente qualitativo, em função de suas propriedades, uma vez que se faz necessário considerar a economia relativa a cada especificidade de projeto e principalmente que atenda as condições de segurança, estabilidade e serviço durante a sua vida útil. Procura-se, a seguir, evidenciar as propriedades que o concreto endurecido possui, de uma maneira bem resumida. Portanto, estas propriedades são:

a) Massa específica:

A massa específica dos concretos pode variar de acordo com os tipos de agregados que os constituem.

b) Atrito:

O coeficiente de atrito depende das superfícies de contato com o concreto. Esta propriedade é mais utilizada e desenvolvida em tubulações e pavimentos de concreto. “O coeficiente de atrito de alvenaria sobre o concreto é tomado entre 0,50 e 0,60. O coeficiente de atrito de madeira sobre o concreto é da ordem de 0,40, variando desde 0,32 para contraplacado liso até 0,42 para madeira bruta

serrada. O coeficiente para o aço sobre concreto alcança cerca de 0,30 para concreto não vibrado até 0,40 para concreto vibrado” (BAUER, 1987).

c) Resistência à abrasão:

Esta propriedade se torna importante principalmente nas superfícies sujeitas à movimentação de cargas, uma vez que o desgaste do concreto se processa de duas formas. A primeira é devido ao rompimento dos grãos do agregado e a segunda é caracterizada pelo arrancamento dos próprios grãos do agregado.

d) Condutibilidade elétrica:

Esta propriedade é extremamente variável devido à composição do concreto e, sobretudo à sua umidade, tornando-o um não condutor de eletricidade e muito menos um isolante. Para concretos comuns dosados com 300 kg/m^3 de cimento, a resistência elétrica varia de 10^4 a 10^7 ohms/cm², entre as idades de 1 a 800 dias, havendo um aumento de 1000 vezes em sua resistência. Para efeito de comparação, temos a resistividade para a ardósia e o mármore de 10^8 e 10^9 , respectivamente (BAUER, 1987).

e) Condutibilidade térmica:

Um valor médio do coeficiente de condutibilidade térmica para o concreto comum segundo BAUER (1987) é $k = 1,45 \text{ kcal/m,h,}^\circ\text{C}$.

f) Calor específico:

Esta propriedade nos concretos varia de acordo com a temperatura e o teor de água, entre limites relativamente estreitos de $0,20 \text{ kcal/kg,}^\circ\text{C}$ a $0,25 \text{ kcal/kg,}^\circ\text{C}$.

g) Coeficiente de dilatação térmica:

Conforme a NBR 6118 - *Projeto de estruturas de concreto - Procedimento* (ABNT, 2003) o coeficiente de dilatação térmica do concreto pode ser admitido como sendo igual a $10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ na análise estrutural.

h) Resistência ao fogo:

O comportamento do concreto em temperaturas elevadas vai depender dos seus constituintes. A resistência do concreto à compressão começa a diminuir, significativamente, a partir da temperatura de 200 °C. Para temperaturas acima de 500 °C a resistência do concreto é da ordem de 50% da resistência original.

A título de informação, BAUER (1987) apresentou uma sucessão de cores de um concreto submetido ao sinistro de um incêndio:

- entre 300 e 600 °C, o concreto tem coloração rosa;
- entre 600 e 900 °C, a cor do concreto vai do vermelho para o cinzento;
- entre 900 e 1200 °C, sua cor apresenta-se em tom amarelo-claro;
- acima de 1200 °C, a cor se torna amarela.

Portanto, um fator que pode melhorar a resistência do concreto à ação do fogo é protegê-lo com revestimentos como argamassas, gesso ou outros.

i) Propriedades radioativas:

Devido aos aparelhos radioativos é que se teve a necessidade de construção de anteparos e invólucros que minimizassem ou absorvessem as altas energias geradas por eles, aumentando assim a segurança do elemento homem. Tal fato abriu caminho para a utilização do concreto de alta densidade, barateando o custo das obras, uma vez que o chumbo tem alto custo. Portanto, os concretos com massa específica em torno de 4000 kg/m^3 , barram duas vezes mais as radiações que os concretos convencionais.

j) Adesão:

Sabemos que o sucesso de uma ligação superficial (argamassas, texturas, etc.) com o concreto se deve ao grau de irregularidade da mesma. Se a superfície do concreto estiver lisa, essa ligação se torna fraca.

Outro ponto a se destacar é a ligação de concreto novo ao concreto velho, necessário em reparos estruturais. Esta união, no geral, é fraca, devido ao efeito da retração no concreto novo ser acentuada, promovendo a movimentação do mesmo e conseqüentemente comprometendo a ligação. Assim, se faz necessário a utilização de pontes de aderência em vários métodos construtivos.

k) Permeabilidade e absorção:

A permeabilidade é a principal propriedade para os concretos expostos às intempéries, o que a torna importantíssima no aspecto da durabilidade das estruturas de concreto armado. Portanto, a permeabilidade se identifica com a passagem da água através do concreto. Já a absorção é o processo físico que o concreto possui em reter a água nos poros e capilares (MEHTA, 1994).

A permeabilidade do concreto pode ser obtida através do aparelho portátil Germanns Waterpermeability Test (GWT) fabricado pela Germann Instruments A/S. Os valores típicos da permeabilidade, no geral, para os concretos variam de 92×10^{-4} a 30×10^{-10} cm/s, devido ao fator água/cimento e a quantidade de cimento utilizado nos mesmos. A absorção pode ser determinada facilmente em função do peso seco e peso saturado de corpos de prova de concreto.

l) Resistências:

O concreto é um excelente material que resiste aos esforços de compressão e não muito bem aos esforços de tração. Segundo Mehta (1994), a resistência à tração e à flexão típica do concreto são da ordem de 10 e 15%, respectivamente, da resistência à compressão (f_c). Isto é atribuído à estrutura heterogênea do próprio

concreto. Assim o concreto se torna vulnerável ao cisalhamento, em virtude das tensões de distensão em planos inclinados.

Os principais fatores que influenciam na resistência mecânica dos concretos são:

- fator água/cimento (a/c);
- idade do concreto;
- forma das partículas e granulometria dos grãos dos agregados;
- tipo de cimento;
- moldagem dos corpos de prova;
- forma e dimensões dos corpos de prova;
- velocidade de aplicação de carga durante o ensaio;
- duração da carga;
- aferição das prensas de compressão.

Segundo PETRUCCI (1995), as relações entre as resistências à compressão em função das idades de 3, 7, 28, 90 e 365 dias são:

- $f_{c7} = 1,35 \text{ a } 1,65 f_{c3}$
- $f_{c28} = 1,70 \text{ a } 2,50 f_{c3}$
- $f_{c28} = 1,35 \text{ a } 1,65 f_{c7}$
- $f_{c90} = 1,05 \text{ a } 1,20 f_{c28}$
- $f_{c365} = 1,10 \text{ a } 1,35 f_{c28}$

m) Módulo de Elasticidade Estático (MEE) e Módulo de Elasticidade Dinâmico (MED):

O módulo de elasticidade do concreto é definido pelo quociente de sua tensão pela sua deformação. A partir do diagrama tensão-deformação, observa-se que o MEE (obtido pela NBR 8522 – *Concreto – Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação e da curva tensão deformação*) também pode ser a

tangente, a tangente na origem e a secante dessa curva. Já o MED pode ser definido através do pulso de velocidade ultra-sônico (obtido pela NBR 8802 – *Concreto endurecido – Determinação da velocidade de propagação de onda ultra-sônica* (ABNT, 1994)). O MED é o mais próximo do MEE da tangente na origem e consideravelmente maior do que o MEE secante. Verificou-se nos ensaios realizados em laboratórios que a relação entre o MEE e o MED varia de 0,5 a 0,8, dependendo da resistência do concreto e da heterogeneidade do mesmo. É neste contexto que se nota a impossibilidade do concreto apresentar somente um módulo de elasticidade característico. Tal fato é devido às ligações cimento-agregado e a estrutura do cimento hidratado que são variáveis.

Portanto, o módulo de elasticidade à compressão do concreto pode variar de 14 a 40 GPa (MEHTA, 1994).

n) Fluência:

Por fim, esta propriedade está diretamente relacionada com a deformação do concreto ao longo do tempo submetido a cargas de carregamento. Essas deformações são de origem plástica (lentas) que se sobrepõem as de origem elástica (instantânea). A Tabela 3.3 demonstra a deformabilidade de uma amostra de concreto ao fim de 3 anos, para várias condições de carregamento.

Tabela 3.3 – Deformação da amostra de concreto em várias condições de carregamento (BAUER, 1987).

Valor do Carregamento	Deformação	Origem das
(kg/cm²)	(mm/m)	Deformações
0	- 0,4	Retrações de Secagem e Térmicas
50	- 1,0	Retrações mais Deformações lentas
100	- 1,7	Retrações mais Deformações lentas
150	- 2,5	Deformações lentas

Destaca-se ao final deste tópico, que a tecnologia do concreto deve ainda estar intimamente conectado a um programa de garantia da qualidade do mesmo, através de procedimentos de controle. Tal preocupação é pertinente pelo fato do porte das estruturas projetadas e velocidades de construções das mesmas. É neste contexto que as tomadas de decisões em aceitar ou rejeitar a qualidade do concreto não podem ser deixadas, apenas, para os ensaios de compressão aos 28 dias. Inúmeros casos evidenciam que os corpos de prova, em certas obras, não representam verdadeiramente a qualidade do concreto na estrutura, devido às condições de adensamento e cura. Para uma alternativa aos ensaios de resistência convencionais, existem outros métodos de ensaios “*in loco*” não destrutivos, que são eficazes no controle do concreto.

Um ensaio não destrutivo que se destaca, e que foi amplamente utilizado para obter os módulos de elasticidade dinâmicos, dos vários concretos confeccionados neste trabalho, é o ensaio de ultra-sonografia. Tal ensaio é normalizado pela norma brasileira NBR 8802 - *Concreto endurecido – Determinação da velocidade de propagação de onda ultra-sônica* (ABNT, 1994), pela norma inglesa B.S. 1881 e pela americana ASTM C597.

3.2 O Concreto Produzido nas Centrais

3.2.1 Introdução

A partir do desenvolvimento dos grandes centros urbanos, principalmente no que se refere à construção civil, se observa cada vez mais agilidades dos processos construtivos nos canteiros de obra. Como a tecnologia dos concretos vem se desenvolvendo há décadas, surgiu no decorrer da história a necessidade de entregar concretos prontos nesses canteiros, em oposição à clássica mistura “*in situ*”.

Esta técnica de fornecimento de concretos prontos se impôs no Brasil, na década de 70, após ter sido bastante desenvolvida em outros países, principalmente nos

Estados Unidos. Assim, o concreto pronto pode ser caracterizado por ser executado no todo ou em parte, em usinas de concretagem, ou também denominadas centrais de concreto (REBUT, 1975).

Será dada ênfase neste tópico às centrais de concretagem brasileiras e que são filiadas a uma instituição que as rege. Esta associação é a Associação Brasileira das Empresas de Serviços de Concretagem (ABESC). A ABESC ratifica o compromisso de suas empresas associadas com a busca constante pela qualidade, com a pesquisa de novas tecnologias, com a normalização de seus serviços e capacitação profissional de seus colaboradores diretos e indiretos (Manual do concreto dosado em central, 2005).

Dados da ABESC (2005) dizem que em 1997 existiam mais de 100 empresas distribuídas pelo Brasil, totalizando aproximadamente 550 centrais dosadoras e uma frota composta por mais de 4.800 caminhões-betoneira atendendo a mais de 1.600 municípios. Na Europa, cerca de 55% dos cimentos produzidos são destinados às centrais de concretagem, enquanto que, aqui no nosso país, este índice é da ordem de 13% e os mais otimistas suspeitam que ele será estabilizado em 30%.

As perspectivas de utilização dos serviços de concretagem no Brasil tendem a aumentar devido à busca constante da qualidade, necessidade de redução de custos e a racionalização dos canteiros de obra. Além desses podemos identificar também:

- dificuldade de confeccionar concretos nos canteiros de obra, os quais demandam altos custos, principalmente com mão-de-obra;
- qualidade do concreto confeccionado no canteiro de obra;
- modernização da construção civil - gestão da qualidade;
- eliminação de perdas de agregados e cimento;

- racionalização do número de operários na obra e conseqüente redução de encargos sociais e trabalhistas;
- maior produtividade de transporte, lançamento e adensamento do concreto;
- velocidade das obras;
- obediência aos cronogramas;
- projetos arquitetônicos arrojados exigindo o máximo de segurança, qualidade e durabilidade;
- tecnologia em constante evolução;
- garantia da qualidade do concreto devido aos equipamentos e controle adotado pelas centrais dosadoras.

Na verdade o Brasil está passando por uma transformação na qualidade de produção de concretos, e deverá substituir o processo primitivo de dosagem e mistura de concretos em obra e partir para a utilização de concretos dosados em centrais, acompanhando a tendência da construção civil em todo o mundo.

3.2.2 Normalização

Os concretos dosados em centrais são normalizados pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) através do Comitê Brasileiro de Cimento, Concreto e Agregados (CB-18). Portanto, as normas que orientam sobre a melhor utilização dos concretos são:

- NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento;
- NBR 7212: Execução de concreto dosado em central;
- NBR 8953: Concreto para fins estruturais – classificação por grupo de resistência;
- NBR 12654: Controle tecnológico de materiais componentes do concreto;
- NBR 12655: Concreto - Preparo, controle e recebimento;
- NBR 12821: Preparação de concreto em laboratório.

Será destacada e explanada a partir de agora a NBR 7212 - *Execução de concreto dosado em central* (ABNT, 1984), enfatizando o concreto dosado em central, visto que alguns trabalhos práticos foram realizados em uma central de concreto. Esta norma fixa as condições exigíveis para a confecção dos concretos, evidenciando as etapas, desde o recebimento de materiais até a aceitação e rejeição, dos concretos produzidos em centrais.

O concreto dosado em central é definido como o concreto dosado e misturado em equipamento estacionário ou em caminhão betoneira, transportado pelo mesmo ou por caminhão tipo caçamba, para fornecimento em local e tempo determinados, antes do início de sua pega, com propriedades e especificações preestabelecidas. A expressão “concreto” citada neste tópico tem o significado de concreto dosado.

As condições gerais de armazenamento em uma central de concreto, dos materiais constituintes do concreto, devem ocorrer em locais ou recipientes apropriados. Estes recipientes não poderão permitir a contaminação dos mesmos e também não se devem misturar materiais de mesma espécie e diferentes procedências. Assim, os cuidados esperados para os agregados, cimentos, água e aditivos são:

- agregados ⇒ evitar misturas de granulometrias e procedências diferentes;
- cimentos ⇒ armazenar em silos e evitar misturar com outros tipos de cimento e procedências diferentes. Melhor consumi-lo em 90 dias;
- água ⇒ armazenar de maneira adequada e ser de procedência conhecida e qualificada;
- aditivos ⇒ armazenar e identificar, evitar misturas com outros tipos de aditivos, seguir as recomendações do fabricante, principalmente quanto ao seu prazo de validade que é de 12 meses.

Os agregados e o cimento devem ser quantificados em massa, considerando o desvio absoluto das balanças. Estes materiais devem ser dosados separadamente. A quantidade de água deve ser estabelecida também em massa ou volume, não se esquecendo da umidade dos agregados que deverá ser descontada em sua massa final. Os aditivos devem ser adicionados de forma uniforme na massa do concreto.

Outro cuidado que se deve tomar é a aferição periódica dos equipamentos, envolvidos no processo produtivo do concreto dosado em central. Recomenda-se aferições a cada período de três meses, ou após volume de concreto produzido de 5000m³, o que vier primeiro.

As misturas podem ser, de acordo com cada tipo de central de concretagem, mistura completa em equipamento estacionário, mistura completa em caminhão betoneira e mistura parcial na central e complementação na obra. Para qualquer tipo de mistura utilizado é dever da central considerar as especificações do fabricante dos equipamentos como capacidade, tempo, velocidade e número de rotações.

As adições de água suplementar devem ser realizadas antes do início da descarga do concreto e este deve obedecer, rigorosamente, o valor de abatimento especificado no pedido. Essas adições suplementares são de responsabilidade da empresa de serviços de concretagem e devem ser anotadas na nota fiscal da mesma.

O tempo de transporte do concreto da central de dosagem até a obra deve ser relacionado a temperatura, umidade relativa do ar, propriedades do cimento, peculiaridades da obra, uso de aditivos retardadores, refrigeração e outros. A temperatura ambiente limite recomendada de concretagem deve estar compreendida no intervalo de 10°C e 32°C. Caso seja necessário concretagem fora desse intervalo, devem ser adotados cuidados especiais.

As condições específicas do pedido do concreto para as centrais dosadoras podem ser relativas à resistência característica à compressão, ou ao consumo de cimento, ou à composição da mistura (traço). Quando o pedido é pela resistência característica à compressão, deve ser especificada a própria resistência característica à compressão, a dimensão característica máxima do agregado graúdo e o abatimento do concreto fresco (*slump*). Se o pedido é pelo consumo de cimento, o concreto é especificado através do consumo de cimento por metro cúbico de concreto, a dimensão característica máxima do agregado graúdo e o abatimento do concreto fresco (*slump*). Por fim, o pedido solicitado pela composição do traço deve ser especificado quanto às quantidades por metro cúbico, bem como por algumas especificidades como o tipo e a marca do cimento, marca e função do aditivo, relação água/cimento máxima, consumo de cimento, tipo de lançamento, módulo de elasticidade, entre outros.

O local e a data de entrega do concreto deve ser citado no contrato ou pedido de fornecimento do mesmo. A unidade de volume de entrega é o m³ medido após de adensado, este não deve ser inferior a 1/5 da capacidade do equipamento de mistura ou agitação e também deve ser múltiplo de 0,5 m³. A verificação física do volume é de responsabilidade do contratante dos serviços. A entrega do concreto deve ser, sempre, acompanhada da nota fiscal contendo os dados da empresa fornecedora, bem como a quantidade de cada constituinte, volume, hora de início da mistura (primeira adição de água), *slump*, dimensão máxima característica do agregado graúdo, resistência característica à compressão, aditivo utilizado, quantidade de água adicionada na central e quantidade máxima de água a ser adicionada na obra.

A avaliação do desvio padrão dos corpos de prova de uma central de concreto é realizada mediante análise estatística a partir dos valores de resistência de seus concretos conforme especificado na NBR 7212 - *Execução de concreto dosado em central* (ABNT, 1984), especificamente em seu item 6.

Toda empresa fornecedora de concreto dosado em central deve permitir o acesso de seus contratantes às suas instalações. Finalmente, a aceitação ou rejeição do concreto poderá ser confirmada mediante a análise, criteriosa, do contratante, simplesmente pela conformidade ou desconformidade com o que foi combinado através das especificações do pedido inicial.

3.2.3 Central de concreto

Central de concreto pode ser definido como o local onde estão instalados todos os equipamentos necessários às operações de dosagem e, dependendo do caso, mistura do concreto de acordo com normalização.

A partir deste conceito, podemos identificar as três maneiras possíveis de produção de concreto realizado em uma central. A primeira é aquela em que a mistura é totalmente confeccionada na própria central. A segunda maneira consiste em uma mistura parcial na central e o restante em caminhões betoneira. Por fim, os concretos são dosados na central e misturados totalmente nos caminhões betoneira. Este último processo é o mais utilizado comercialmente.

A produção de concretos para o primeiro processo necessita de enormes betoneiras de grande capacidade, que são instaladas sob os silos de armazenamento de agregados e aglomerantes, e que são providos de balanças que medem a massa dos materiais necessários ao traço pedido. O transporte deste concreto pode ser realizado por caminhões basculantes de carroceria metálica ou caminhões betoneira. Destaca-se neste momento que, quando o transporte é realizado por caminhão betoneira em qualquer situação, é aplicada uma pequena velocidade à betoneira, para que o concreto retarde por mais tempo o seu início de pega. Além disso, o tempo máximo de agitação lento do concreto deve ser de seis horas, o que não influenciará na sua resistência (REBUT, 1975).

O segundo processo de produção de concreto necessita, após, aproximadamente 30 segundos de mistura nas instalações fixas como no primeiro processo, de ter a

mistura completada nos caminhões betoneira com velocidade de rotação maior do balão até 100 rotações por minuto. Posteriormente a este passo, retorna-se para a velocidade de agitação, como descrito anteriormente, até a descarga final na obra.

Finalmente aos processos de produção de concreto, ele também pode ser dosado na central por meio de seus equipamentos. Os agregados devem estar armazenados em silos ou no pátio. Se eles estiverem nos silos, estes possuem balanças em suas bases para medir os materiais. Já os do pátio, necessitam de pá carregadeira que carrega os alimentadores metálicos, providos de balança, que após a medida da massa transportam os materiais por correias transportadoras até os caminhões betoneiras. Os caminhões betoneira, geralmente, são abastecidos abaixo dos silos de aglomerantes, que também possuem balanças em suas bases. Portanto, é no caminhão betoneira que se processa toda a fase de mistura dos constituintes do concreto, da dosagem até a entrega final do mesmo nas obras.

A água e os aditivos, em todos os processos de produção de concreto em central, são dosados por volume ou massa, por meio de equipamentos específicos para este fim.

Como se viu, os cuidados com a mistura do concreto devem ser especiais, a fim de ponderar a possível perda de trabalhabilidade entre o início e o fim de pega, principalmente durante o transporte, que às vezes é realizado por grandes distâncias. Outros cuidados que se deve ter nas centrais produtoras de concreto, e que estão relacionadas direta ou indiretamente com o mesmo são:

- O amassamento do concreto deve ser realizado até que o mesmo apresente cor e consistência uniformes;
- As betoneiras não devem ser carregadas além de sua capacidade; quando sobrecarregadas, estas, apresentam tensões e deformações excessivas do equipamento, bem como uma mistura do concreto não uniforme;

- As velocidades de operação das betoneiras devem seguir as recomendações dos fabricantes e serem aferidas com freqüência;
- A performance da betoneira é reduzida quando as suas pás e paredes estão com incrustações de concreto, sendo de extrema importância à limpeza das mesmas ao término de cada período de masseiras;
- Conseqüentemente, a manutenção dos equipamentos deve ser periódica, uma vez que os desgastes propiciam redução da eficiência;
- O transporte deve ser realizado de forma a evitar a segregação e/ou a perda de argamassa de cimento.

Os concretos produzidos pela central podem apresentar duas formas distintas de fornecimento: o concreto convencional e o concreto bombeado.

O concreto convencional possui a característica de ser fornecido às obras em caminhões betoneira. As descargas destes caminhões podem ser realizadas diretamente no local de adensamento ou descarregados em carrinho de mão, grua e depois transportados até o local de adensamento. Este concreto possui as seguintes especificações técnicas que podem variar de acordo com os materiais da região:

- abatimento do tronco de cone (*slump test*): 5 ± 1 cm;
- dimensão máxima dos agregados: 25 mm;
- cimento: pode-se utilizar qualquer um dos cimentos produzidos;
- aditivos;
- lançamento: convencional.

O concreto bombeado também é fornecido às obras por caminhão betoneira. O concreto descarregado é lançado diretamente no local de adensamento por meio de tubulações rígidas e tubulações maleáveis, evitando segregações e perdas de material. O lançamento é realizado através de equipamento provido de bombas hidráulicas, podendo vencer distâncias verticais acima de 140 metros ou

horizontais além de 500 metros. O concreto bombeável possui as seguintes especificações técnicas que podem variar de acordo com os materiais da região:

- abatimento do tronco de cone (*slump test*): 9 ± 1 cm;
- dimensão máxima dos agregados: 25 mm;
- cimento: pode-se utilizar qualquer um dos cimentos produzidos;
- aditivos;
- lançamento: bombeado.

Outras vantagens que se pode associar à utilização de concretos dosados em central são:

- maior controle dos materiais empregados;
- automatização da dosagem dos materiais;
- moldagens de corpos de prova e ensaios realizados;
- maior produtividade no lançamento do concreto;
- eliminação das perdas dos materiais;
- responsabilidade e garantia da resistência do concreto, através dos certificados de resistência e da dosagem dos materiais componentes.

Existem situações em que são necessárias rapidez e velocidade na obra, principalmente se esta estiver afastada dos grandes centros urbanos. Diante desta necessidade, existem centrais móveis de concretagem compostas por caixas de agregados, silos de cimento horizontais, esteiras e balanças dosadoras. Esta estrutura foi projetada em cima de carretas para facilitar o transporte rodoviário e conseqüentemente, iniciar operação com extrema rapidez em qualquer lugar. A unidade móvel é instalada sobre um radier e necessita de um muro de arrimo rampado para acessibilidade da pá carregadeira que alimentará o conjunto (REBUT, 1975).

Em São Paulo existe uma parceria entre ABESC e a Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB) que implantou um programa de gestão para a fiscalização da fumaça preta emitida pela frota das centrais de concreto. Outras medidas ambientais se referem à reutilização das sobras de concreto, controle das emissões de poluentes particulados e efluentes líquidos.

Finalmente, não existem muitos estudos de laboratório, devido à estrutura necessária, sobre concretos bombeados. As experiências que se tem relatado são de canteiro de obra.

3.2.4 Controle e fiscalização

Sabemos que a utilização de concretos dosados em centrais imprime uma maior velocidade de construção e conseqüentemente, as tomadas de decisões também acompanham este mesmo ritmo, não sendo deixadas para os 28 dias como de praxe. Os técnicos envolvidos na concepção de todo o projeto necessitam desenvolver ou aprovar um programa de garantia da qualidade, que além de outras coisas, envolva a escolha de técnicas de ensaios e análise estatística nos procedimentos de controle. O objetivo principal de um programa desse é garantir a qualidade de um concreto, desde a sua concepção inicial, preservando suas propriedades, estabilidade e durabilidade ao longo de sua vida útil.

É neste contexto que será discutido neste item os meios e ensaios de controle da qualidade do concreto. Os cuidados para se ter um concreto aceitável dentro de suas especificações, devem ser tomados tanto no seu estado fresco quanto no estado endurecido. O controle e a fiscalização no concreto fresco objetiva a trabalhabilidade, a perda de abatimento, a exsudação, a segregação, a retração, a pega e a temperatura de concretagem. Já no estado endurecido, o controle e a fiscalização podem ser realizados com ensaios destrutivos ou ensaios não destrutivos. Os ensaios destrutivos são os de arrancamento e extração de corpos de prova. Os ensaios não destrutivos podem ser realizados em corpos de prova moldados durante a concretagem através do ensaio de resistência acelerada, ou

diretamente na estrutura de concreto concebida através dos ensaios de dureza superficial, técnica de resistência à penetração, método da velocidade de propagação da onda ultra-sônica, cobrimento e diâmetro das armaduras.

A trabalhabilidade do concreto está diretamente ligada à sua coesão e consistência. Assim, o seu controle deve ser direcionado para a quantidade de água, teor de cimento, granulometria dos agregados e aditivos. Percebemos que se um estudo de dosagem for mal feito, a partir de erros no proporcionamento dos materiais citados anteriormente, e este mesmo concreto for aplicado estruturalmente, teremos problemas durante o seu transporte, lançamento, adensamento e pós-endurecimento (NEVILLE, 1982).

A perda de abatimento do concreto acontece quando as reações de hidratação, a adsorção e a evaporação consomem as águas livres, iniciando o seu enrijecimento. Logo, um controle deste fator exige o emprego de cimento de pega normal, menor tempo total de mistura, transporte, lançamento, adensamento e acabamento e por fim, que a temperatura do concreto (calor de hidratação), água e dos agregados não seja alta.

O controle da segregação e exsudação pode ser feito controlando a quantidade de agregado graúdo, a quantidade de partículas finas e os erros durante o lançamento e adensamento.

A retração plástica do concreto fresco é observada quando se percebe que a superfície superior assentou, devido ao seu lançamento em peças de grande profundidade. Assim, medidas de controle que minimizam as retrações envolvem:

- as fôrmas devem ser umedecidas antes do lançamento do concreto;
- os agregados devem ser umedecidos quando secos e absorventes;
- redução da velocidade dos ventos e temperatura sobre a superfície do concreto lançado e adensado por meios construtivos temporários;

- promover o abaixamento da temperatura do concreto fresco pelo resfriamento dos agregados e água;
- evitar atrasos de concretagem reduzindo o tempo entre o lançamento e início de cura;
- no caso de retração que aparecer durante o trabalho de desempenho do concreto, promover a revibração, se o mesmo ainda se encontra no estado plástico. Tal atitude alivia as tensões surgidas além de melhorar a aderência com a armadura e aumentar a resistência do concreto;
- aplicar os procedimentos de cura necessária.

O ensaio para medir o tempo de início de pega e o tempo final de pega consiste em obter uma quantidade de argamassa do concreto produzido, compactá-la em um recipiente padrão e medir a força necessária para fazer penetrar uma agulha nesta argamassa. Tal ensaio é normalizado pela norma brasileira NBR 9832 - *Concreto e argamassa - Determinação dos tempos de pega por meio da resistência à penetração - Método de ensaio* (ABNT, 1992). Logo, os principais fatores que controlam os tempos de pega são os mesmos citados para a trabalhabilidade.

As precauções para controlar a temperatura interna e externa do concreto envolvem, para concretagem em clima frio, evitar confeccioná-lo a temperatura superior a 21°C, e para concretagem em clima quente, evitar produzi-lo a temperatura superior a 29°C (NEVILLE, 1982). Em ambas as situações é mais fácil aquecer e/ou esfriar a água de amassamento devido ao seu calor específico ser igual a 1, cinco vezes maior que o calor específico médio para o cimento e agregados que é 0,22.

Até aqui se viu o controle e a fiscalização necessários sobre o concreto fresco e dando seqüência a este tópico, evidenciará a partir de agora os ensaios de controle e fiscalização da qualidade dos concretos endurecidos, que poderão ocorrer tanto nas primeiras idades (a partir do final de sua pega) quanto em idades

mais avançadas. Serão relatados primeiramente métodos destrutivos e posteriormente métodos não destrutivos.

O controle tecnológico do concreto pelo ensaio de arrancamento é normalizado pela ASTM C 900. Este ensaio consiste em arrancar do concreto um parafuso específico previamente moldado no mesmo. Mede-se a força necessária ao seu arrancamento através de um dinamômetro. A resistência de arrancamento é cerca de 20 % da resistência à compressão e é uma medida direta da resistência ao cisalhamento. O dano que este ensaio promoveu a superfície do concreto deve ser reparado logo após a sua realização. Portanto, este ensaio é extremamente importante para determinar a resistência nas primeiras idades e conseqüentemente informar o momento seguro para a desmoldagem das fôrmas.

Outro método destrutivo consiste na extração de corpos de prova das peças da estrutura de concreto por meio de uma coroa rotativa diamantada. Tal ensaio é normalizado pela NBR 7680 - *Extração, preparo, ensaio e análise de testemunhos de estruturas de concreto – Procedimento* (ABNT, 1983). É importante saber que as resistências dos corpos de prova extraídos são menores do que as dos corpos de prova moldados durante o lançamento do concreto fresco. Destaca-se também o cuidado que se deve ter ao extrair corpos de prova de regiões que tenham sofrido exsudação (parte superior da peça estrutural ser mais fraca que a parte inferior da mesma).

Um ensaio de resistência acelerada (método da água em ebulição) aplicado ao concreto nas primeiras idades é normalizado pela NBR 8045 - *Concreto - Determinação da resistência acelerada à compressão - Método da água em ebulição* (ABNT, 1993). Tal método consiste na cura normal dos corpos de prova durante 24 horas e posteriormente na cura em banho de água a 100°C por um período de 305 horas, e ensaio de rompimento 1 hora depois. Este método está cada vez mais sendo utilizado para se ter uma avaliação preliminar após dois dias

e meio a partir da concretagem, e se este mesmo concreto irá atingir o nível de resistência desejado.

Os ensaios não destrutivos possuem a característica de serem portáteis e de fácil aplicação na estrutura de concreto. MALHOTRA (1984) disse que para a utilização destes ensaios é conveniente que os mesmos possuam correlações desenvolvidas em laboratório, dos concretos utilizados nas obras de construção civil.

O primeiro ensaio não destrutivo consiste na obtenção da resistência à compressão do concreto através da determinação da dureza superficial do mesmo, pelo princípio da energia de impacto. O equipamento deste ensaio foi desenvolvido em 1948 pelo engenheiro suíço Ernest Schmidt, o qual ficou conhecido como esclerômetro de Schmidt. No Brasil existe a norma NBR 7584 - *Concreto endurecido – Avaliação da dureza superficial pelo esclerômetro de reflexão* (ABNT, 1995) que regulamenta tal ensaio. O cuidado que se deve ter é quanto à superfície analisada, profundidade de carbonatação, e umidade da peça de concreto.

Mais um ensaio não destrutivo se refere à técnica de resistência à penetração, a qual consiste em um dispositivo de pólvora conhecido como pistola de Windsor. Esta pistola atira um pino metálico no concreto e através do comprimento exposto deste, se mede a resistência à penetração do concreto. Também é um excelente método utilizado nas primeiras idades do concreto, principalmente para fins de retirada das fôrmas. Atualmente no Brasil este ensaio não possui normalização, mas ele é normalizado pela ASTM C 803.

Outro ensaio não destrutivo é o método da velocidade de onda ultra-sônica através do equipamento de ultra-som, que foi desenvolvido em 1945 por Jones e Gatfield na Inglaterra, e paralelamente por Leslie e Cheesman, em 1949, no Canadá. O princípio de funcionamento deste método consiste em promover a passagem de ondas eletrovibratórias pelo concreto e medir o tempo necessário

gasto por estas ondas para atravessá-lo. Com este equipamento podemos determinar a homogeneidade e compacidade do concreto, detectar falhas de concretagem, monitorar as variações ao longo do tempo decorrentes de agressividade do meio, avaliar a resistência à compressão e módulo de elasticidade dinâmico.

Não se pode deixar de registrar também a mão-de-obra empregada na produção de concretos, uma vez que ela é um dos fatores primordiais na sua qualidade. Portanto, as empresas além de absorverem pessoal desqualificado devem promover treinamentos, com intuito de minimizar seus problemas e melhorar a forma artesanal de construir em nosso país.

Os métodos de controle e fiscalização do concreto, descritos neste trabalho, permitem que engenheiros, fiscais, projetistas e consultores possam avaliar e intervir de forma rápida e segura quando da detecção de problema na estrutura. A Figura 3.2 mostra hipoteticamente um processo de fissuração de uma estrutura de concreto armado, que é uma patologia corrente nas edificações.

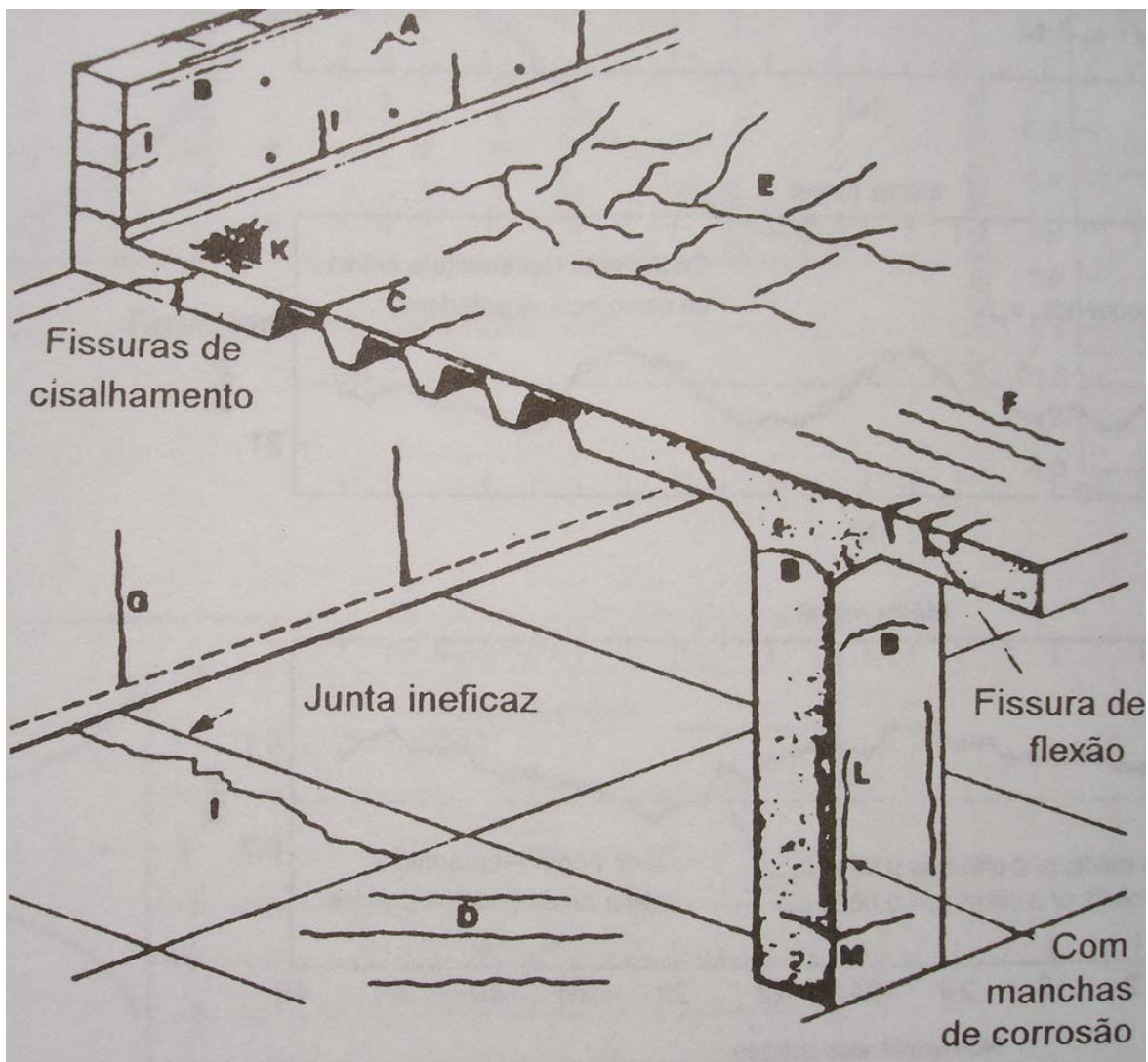
3.3 Água no Concreto

3.3.1 Introdução

Sob a forma de rios, lagos, água do mar, chuva, lençóis subterrâneos, neve e vapor, a água é sem dúvida o líquido mais abundante da natureza. Entretanto, a água no concreto deve ser vista como material primordial, uma vez que ela é de fundamental importância às reações de hidratação do cimento e atua como agente promovedor da plasticidade dos constituintes do mesmo.

As propriedades da água vêm sendo estudadas sistematicamente por mais de 80 anos. Infelizmente poucos foram as evoluções de conhecimento obtidos por esses estudos, especialmente no que diz respeito à água de amassamento de concretos

e argamassas. Até o presente momento, a normalização vigente recomenda apenas a avaliação de características como composição química e potabilidade.



A, B e C – Fissuras de assentamento plástico; D, E e F – Fissuras de retração plástica; G – Fissuras de contração térmica (calor de hidratação); I – Fissuras retração por secagem; K – Fissuras mapeadas; L e M – Fissuras por corrosão de armadura

Figura 3.2 – Fissuração de uma hipotética estrutura de concreto (MEHTA, 1994)

A partir do que já foi explanado sobre a água de amassamento, especificamente no item 3.1.2.3, acrescenta-se aqui que uma água imprópria para o consumo humano, não necessariamente também se torna imprópria para a confecção de concretos. Assim, quaisquer águas ácidas, salobras, salgadas, coloridas, com mau cheiro ou recicladas de processos industriais não devem ser rejeitadas de imediato. Deve-se realizar testes comparativos com alguma água limpa de referência e avaliar seu uso para cada especificidade de concreto desejado. Então, na comparação entre as águas, a resistência dos corpos de prova (7 e 28 dias), confeccionadas com água duvidosa, deve ser maior ou igual a 90% da resistência dos corpos de prova produzidos com água limpa. Também se deve avaliar o tempo de pega a um grau aceitável (MEHTA, 1994).

A qualidade da água é de fundamental importância e não deve apenas ser considerada quanto à resistência dos concretos. Entretanto, a utilização dessas águas requer algumas medidas cuidadosas. Logo, uma água que possui elevada quantidade de partículas finas em suspensão deve ser realizada a sua decantação para posterior utilização. As águas salobras podem ser usadas sem problemas desde que se verifiquem as composições dos cloretos e sulfatos. A água do mar pode ser utilizada em concretos simples sem função estrutural em que também não se importa com a aparência do mesmo. Entretanto, não se recomenda, na prática, a utilização desta água, a menos que isso seja inevitável. Já as águas naturais, discretamente ácidas, também não causam nenhum efeito ao concreto, mas devem ser criteriosamente analisadas.

Nota-se que a água é a condição “*sine qua non*” para a confecção dos concretos, cuja sua função principal é a hidratação do cimento, o qual adquire propriedade adesiva promovendo a pega e o endurecimento desse concreto. Nesta hidratação, os compostos resultantes não hidratam à mesma velocidade, sendo que os aluminatos hidratam primeiramente aos silicatos. Os aluminatos estão diretamente relacionados à perda de consistência e pega, enquanto que os silicatos definem as características de ganho de resistência dos concretos. Para uma melhor

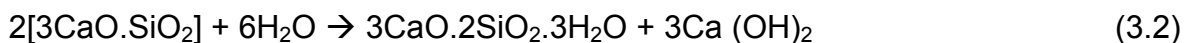
compreensão do processo de hidratação do cimento assim que a água entra em contato com este, é necessário o conhecimento das abreviações principais dos compostos do cimento Portland:

- C – Óxido de Cálcio (CaO);
- S – Sílica (SiO₂);
- F – Ferro (Fe₂O₃);
- H – Água (H₂O);
- C₃S – Silicato Tricálcico (3CaO.SiO₂);
- C₂S – Silicato Bicálcico (2CaO.SiO₂);
- C₃A – Aluminato Tricálcico (3CaO.Al₂O₃);
- C₄AF – Ferro Aluminato Tetracálcico (4CaO.Al₂O₃.Fe₂O₃).

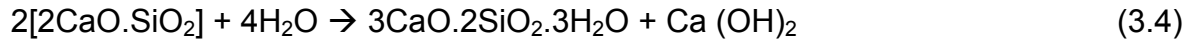
Observa-se que os dois silicatos de cálcio anteriores são os compostos mais importantes do cimento. O C₃S é responsável pelo ganho de resistência inicial até o final do primeiro mês, enquanto que o C₂S promove o ganho de resistência ao longo de um ano ou mais. As reações de hidratação do C₃A se processam rapidamente com grande liberação de calor. Se estas reações não forem de alguma forma retardadas, o cimento Portland não terá nenhum propósito na construção civil. Para que isto não ocorra, adiciona-se gipsita no processo de fabricação do mesmo. Já as reações de hidratação do C₄AF são mais lentas e se comportam de maneira semelhante ao do composto C₃A.

Portanto, serão apresentadas a seguir as principais reações de hidratação do cimento tanto na forma adotada pelo meio técnico, quanto na forma quimicamente correta.

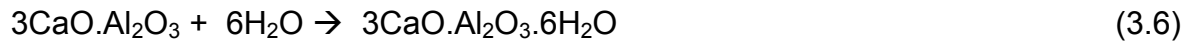
- *Hidratação do C₃S:*



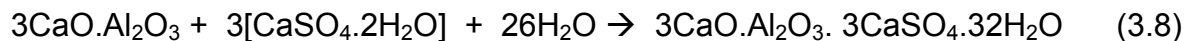
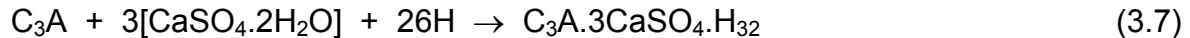
- *Hidratação do C₂S:*



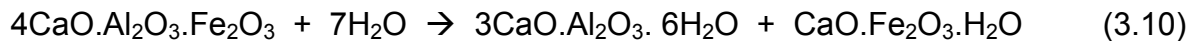
- *Hidratação do C₃A:*



- *Hidratação do C₃A com o gesso:*



- *Hidratação do C₄AF:*



3.3.2 A estrutura da água

As propriedades da água têm sido sistematicamente estudadas por mais de 80 anos. Infelizmente, esses estudos resultaram em uma quantidade modesta de conhecimentos sobre a estrutura da água. Muito pouco é sabido sobre o comportamento da água próxima a uma interface sólida ou não, embora não se tenha muitas informações experimentais.

A molécula de água (H—O—H) possui ligação covalente. “Devido à diferença nos centros de carga do hidrogênio e do oxigênio, o próton do íon de hidrogênio positivamente carregado pertencente a uma molécula de água, a qual atrai os elétrons negativamente carregados das moléculas de água vizinhas. Esta força de atração relativamente fraca, chamada ligação de hidrogênio, é responsável pela estrutura ordenada da água”. (MEHTA, 1994).

Pode-se observar na estrutura do gelo, Figura 3.3a, o maior exemplo da organização de longo alcance na estrutura da água proveniente da ligação de hidrogênio. Verifica-se que cada molécula de água no gelo é rodeada por quatro outras moléculas de modo que o grupo possui uma molécula no centro e as outras quatro nos ângulos de um tetraedro. Assim, nas três direções, as moléculas e seus grupos são mantidos unidos por ligações de hidrogênio. O gelo funde a 0°C quando aproximadamente 15% das ligações de hidrogênio se rompem. Como resultado da ruptura parcial na direção da ligação tetraédrica, cada molécula de água pode vir a adquirir mais de quatro vizinhos próximos, aumentando a densidade de 0,917 para 1. O inverso deste processo é responsável pelo fenômeno que a água líquida, ao solidificar-se, expande-se ao invés de contrair-se.

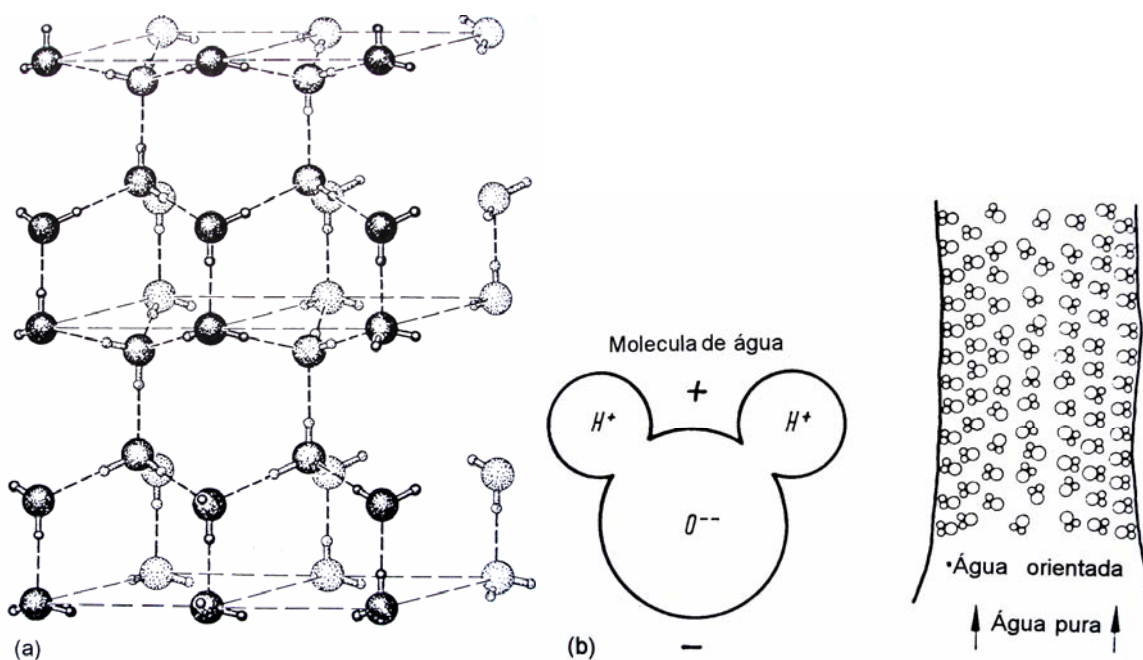


Figura 3.3 – (a) Estrutura do gelo; (b) estruturas de moléculas de água orientadas em um microporo (MEHTA, 1994)

Já a água na temperatura ambiente, quando comparada à estrutura do gelo, apresenta aproximadamente 50% das ligações de hidrogênio rompidas. Logo, os

materiais que possuem estas características de ligações rompidas, têm cargas superficiais desequilibradas, que conseqüentemente geram energia de superfície. Portanto, esta energia superficial nos líquidos promove tensão superficial, a qual é responsável pela tendência de um grande número de moléculas se aderirem. A tensão superficial de um líquido qualquer pode ser definida como a força necessária para afastar as moléculas deste mesmo líquido. A partir desta definição, conclui-se que é a alta tensão superficial da água que a impede de agir como uma agente plastificante eficiente nas misturas de concreto.

Observa-se a expansão em muitos sistemas quando se gera a água com estrutura orientada pelas ligações de hidrogênio nos microporos. No entanto, se a água for capaz de permear estes microporos e se as forças de atração na superfície destes forem suficientemente fortes para romperem a tensão superficial da massa de água e dispuserem as moléculas para a forma de uma estrutura orientada (semelhante à do gelo), esta água irá requerer mais espaço e conseqüentemente causará expansão. Como pode ser visto na Figura 3.3b.

Por outro lado, quando uma molécula encontra uma interface sólida, em função da existência do fenômeno da tensão superficial, a sua interatividade pode ser apresentada sobre três aspectos, como mostrado na Figura 3.4. Na Figura 3.4a observa-se uma água com elevada tensão superficial, sinalizando para a existência de um ângulo tangente obtuso. No caso da Figura 3.4b, a tensão superficial não é tão grande, mas ainda suficiente para o alcance de um ângulo tangente próximo de 90° . Finalmente, na Figura 3.4c a tensão superficial é reduzida e proporciona uma área de molhagem da superfície sólida muito maior que nos dois casos anteriores. É neste contexto que a redução da tensão superficial da água promoverá na confecção de concretos uma hidratação mais eficiente dos compostos cimentícios.

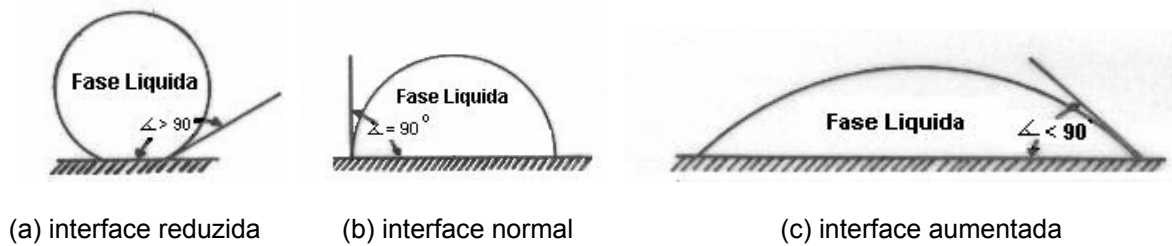


Figura 3.4 – Tipologias da ação da tensão superficial nas moléculas de água junto a sólidos (HANSEN, 1971)

HANSEN (1971) revela um modelo, como pode ser observado na Figura 3.5, no qual se observam evidências em relação à existência de um ordenamento das estruturas da água próxima a certas interfaces líquido/sólido. Esta evidência é baseada em várias observações experimentais de vários pesquisadores, mas uma grande importância deve ser dada em relação à existência de anomalias térmicas nas propriedades da água vicinal. Um modelo de três camadas da estrutura da água próxima a certas interfaces água/sólido é analisada com alguns detalhes; neste modelo uma camada de água ordenada (estruturalmente) deve ser originada próxima à interface com o sólido, a extensão do ordenamento para o líquido decresce em função da distância com a interface. À medida que o grau de ordenamento decai, a desordem local aumenta. A distâncias muito grandes da superfície nota-se que a água mantém sua estrutura original, tal como referenciado na Figura 3.3. Devido ao “arranjo desfeito” entre a estrutura original da água (desconhecida) e a água organizada próxima à interface, uma região de desordem acentuada pode ocorrer, semelhante à desordem estrutural postulada no modelo de hidratação de Frank-Wen (1957) (GIBBS, 1994).

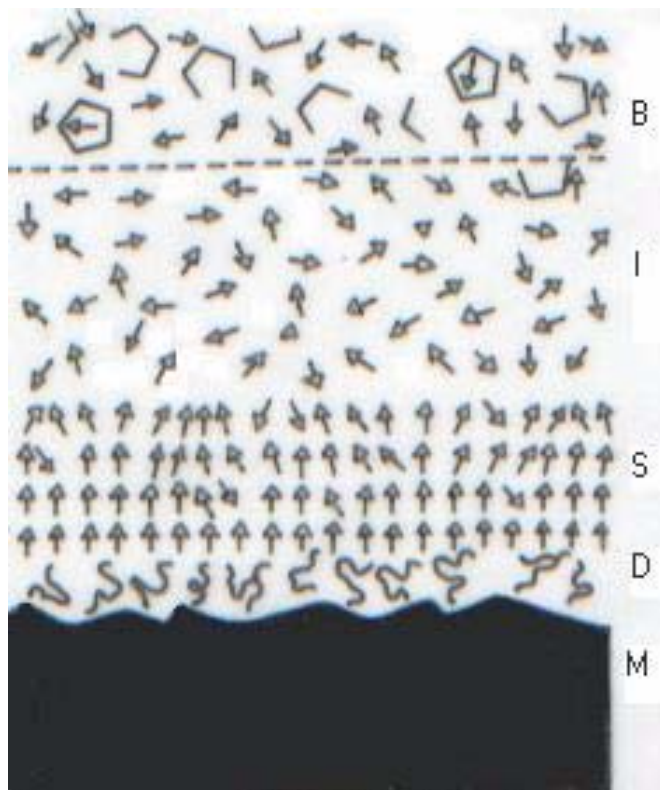


Figura 3.5 – Superfície sólida sendo *M*; superfície de transição sendo *D*; interação dipolo-dipolo sendo *S*; região de desordem sendo *I*; estrutura inicial da água sendo *B*. (HANSEN, 1971)

A partir das anomalias térmicas nas propriedades da água, o Gráfico 3.1 mostra a tensão superficial da água em função da temperatura apresentada por HANSEN (1971).

A dificuldade maior para o entendimento dos modelos discutidos até aqui é torná-los quantitativo. Devido as diferentes “fases” (fases no sentido de tipos de estruturas da água) é claro que uma grande quantidade de parâmetros de ajuste devem ser usados. Por isso, uma concordância quantitativa (ou semiquantitativa) entre valores calculados (estimados) e observados não são provas suficientes do modelo se testado em apenas uma pequena parte do fenômeno.

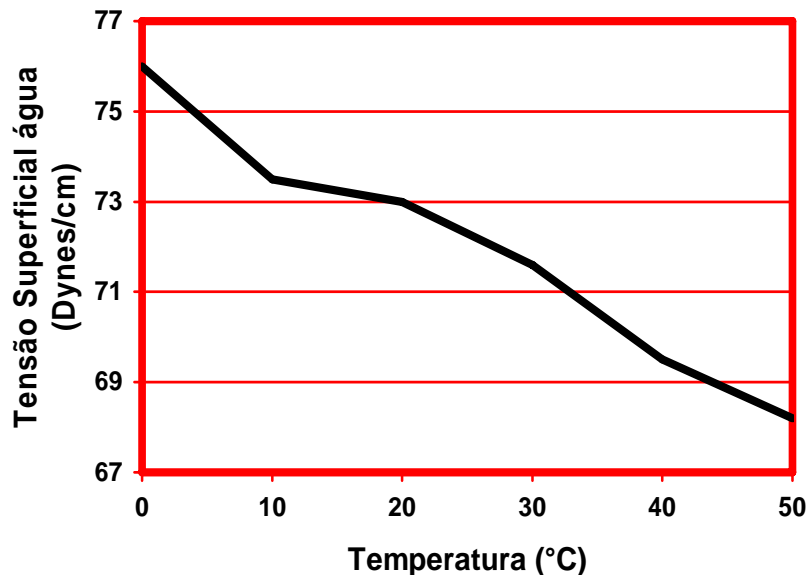


Gráfico 3.1 – Tensão superficial da água em função da temperatura (HANSEN, 1971)

Entretanto, a água é o solvente universal por excelência. Sendo uma molécula polar, apresenta a característica de dissociar as substâncias ionizáveis em íons positivos e negativos. Entretanto, as reações desta com o concreto serão cada vez mais intensas quanto maior for a concentração desses íons dissolvidos. Como as moléculas de água são pequenas, elas são capazes de penetrar em cavidades e/ou poros extremamente finos. Conseqüentemente, tal característica proporcionará a deterioração do concreto endurecido sob o efeito das intempéries.

3.3.3 Constituição e contaminantes

Sabe-se que a água é o principal fator de deterioração do concreto, a qual pode agir de forma física ou química. Conseqüentemente, serão revistas as suas principais características da mesma que a fazem o principal agente de deterioração dos materiais. Como solvente universal, a água possui a extraordinária habilidade de dissolver mais substâncias do que qualquer outro fluído conhecido. Conseqüentemente, algumas águas apresentam muitos íons e

gases em sua constituição, tornando-se capazes de deteriorar quimicamente materiais sólidos.

Diante disso, quando se deseja analisar quimicamente uma água, que possa ser utilizada na confecção de concretos, por um laboratório, este apresenta os seguintes parâmetros listados na Tabela 3.4. Tais parâmetros devem ser cuidadosamente inspecionados e comparados com as referências padrão segundo normas.

Além disso, uma água para utilização na confecção de concretos pode apresentar as seguintes características:

- pH entre 6,0 a 8,0;
- Sólidos totais \leq 4000 mg/L;
- Sulfatos \leq 300 mg/L;
- Cloretos \leq 250 mg/L;
- Açúcar – ausente.

Por outro lado, uma água não potável pode apresentar as seguintes características em sua constituição:

- Sólidos em suspensão – 2000 mg/L;
- Sólidos dissolvidos – 2000 mg/L;
- Carbonatos e bicarbonatos alcalinos - 1000 mg/L;
- Sulfetos – 15 mg/L;
- Magnésio – 150 mg/L.

Entretanto, se faz necessário a explanação dos principais agentes agressivos presentes nas águas bem como os seus tipos.

Tabela 3.4 – Parâmetros analisados em uma água normal para confecção de concretos

ITEM ANALISADO
pH
Condutividade elétrica ($\mu\text{mhos/cm}$)
Turbidez (NTU)
Cloretos $[\text{Cl}^-]$ (mg/L)
Oxigênio Consumido (mg/L)
Acidez Carbônica (mg/L)
Alcalinidade bicarbonatos em CaCO_3 (mg/L)
Dureza total CaCO_3 (mg/L)
Cálcio (mg/L)
Magnésio (mg/L)
Sulfatos $[\text{SO}_4]^{2-}$ (mg/L)

Os sulfatos são um dos agentes mais agressivos ao concreto. Eles promovem a degradação (expansão) do mesmo ao longo do tempo e também são reativos com o aluminato tricálcico (C_3A) da pasta de cimento. Devido a isto, os teores de sulfatos devem ser criteriosamente controlados (HELENE, 1993).

Segundo vários pesquisadores, a deterioração do concreto pode ser explicada por um ou a combinação dos seguintes fatores relacionados aos sulfatos (EQUIPE DE FURNAS, 1997):

- A conversão de hidróxido de cálcio no cimento endurecido em sulfato de cálcio, cristalizando-se e conseqüentemente expandindo-se;
- A conversão dos aluminatos de cálcio hidratados e ferritos em sulfoaluminatos de cálcio e sulfoferritos, com conseqüente expansão;
- A decomposição de silicatos de cálcio hidratados, com séria perda de resistência.

As substâncias em suspensão que normalmente são encontradas na água são a argila e o silte. Tais substâncias podem afetar a compacidade do concreto e o crescimento dos cristais hidratados.

COUTINHO (1988) destaca que a presença de anidrido carbônico (CO_2) na água ocorre sob três formas distintas: carbonatos, bicarbonatos e em equilíbrio. A lixiviação do concreto é acelerada devido à presença de CO_2 dissolvido na água, convertendo o hidróxido de cálcio em carbonato de cálcio. Entretanto, o dióxido de carbono em excesso reage com a água para formar ácido carbônico e conseqüentemente reagirá com o hidróxido de cálcio para formar o bicarbonato de cálcio solúvel, que ataca o hidróxido de cálcio. Se todo hidróxido de cálcio for consumido ocorrerá à decomposição de silicatos e aluminatos de cálcio hidratados, comprometendo todo o cimento endurecido.

A presença excessiva de cloro na água é prejudicial ao concreto, pois ao reagir com a cal liberada durante a hidratação do cimento forma compostos solúveis em água. Tal fenômeno promove a lixiviação do hidróxido de cálcio. Sabe-se, da literatura sobre durabilidade de concreto armado, que uma das causas principais do processo de corrosão de armaduras se deve ao excesso de íons cloretos, os quais destroem a camada passivadora do aço.

Os sais de ácido nítrico (NaNO_3 , KNO_3 , $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$, $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2$, $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$) não atacam o concreto. Somente o nitrato de amônia age de forma semelhante aos cloretos, produzindo nitrato de cálcio altamente solúvel, com desprendimento de amoníaco.

Os fluoretos, com exceção do fluoreto de amônia, agem de forma favorável, pois transformam a cal em fluoreto de cálcio, de elevada dureza.

O dicromato de potássio atua de maneira agressiva ao concreto (EQUIPE DE FURNAS, 1997).

Os carbonatos não são danosos ao concreto sendo que somente uma pequena parte é solúvel.

Quanto à presença de bactérias na água, estas são mais relevantes àquelas pertencentes ao ciclo do enxofre, como o *Thiobacillus Thiooxidans*, que oxidam o enxofre formando o ácido sulfúrico. Tal processo promove a diminuição do pH do concreto e formação de sulfoaluminatos de cálcio, o que acaba por provocar expansões no interior da peça.

Se uma água contiver substâncias orgânicas tais como sacarose, óleos, graxas e outras, estas causam alguns danos ao concreto. Pequenas quantidades de sacarose retardam a pega dos concretos, mas aumentam a resistência à compressão dos mesmos em longo prazo. Por outro lado, se a dosagem de sacarose for muito elevada, esta atua de forma inversa ao exposto anteriormente. Dependendo das percentagens de óleos minerais em relação à massa do cimento, estes podem promover reduções da resistência à compressão a valores que excedam 30%. Além disso, os óleos médios e pesados possuem em sua composição naftalina e benzina que atacam o concreto. Quanto às graxas, dependendo de sua concentração, estas também são perniciosas quando contêm ácidos livres ou que, por saponificação, formam sais de cálcio.

Portanto, a partir dos principais agentes agressivos contidos na água, podemos exemplificar os diversos tipos de água que poderão ser utilizadas para a confecção de concretos.

Como já foi dito, uma água que possua grande quantidade de partículas em suspensão deve ser deixada em repouso, para que o fenômeno de decantação se processe, e conseqüentemente, seja utilizada na confecção de concretos.

Ao se utilizar águas salobras na confecção de concretos, os valores não devem ultrapassar a 500 ppm e 1000 ppm para os cloretos e sulfatos, respectivamente, os quais não são prejudiciais (NEVILLE, 1982).

As águas puras são as águas de chuva, destiladas, de poços de regiões silicosas, bem como as águas drenadas de regiões montanhosas. Tais águas não contêm sais dissolvidos e, por isso, tendem a dissolver a cal tornando o concreto mais poroso e diminuindo-lhe a resistência, afetando consideravelmente a sua durabilidade. Conseqüentemente, quando a cal é lixiviada até a superfície do concreto, reage com o CO_2 atmosférico e estabelece o fenômeno conhecido como carbonatação por eflorescência. Tal fenômeno é inofensivo ao concreto, mas quando se instala nos poros do concreto promovem a expansão, degradando o mesmo. Se este processo ocorrer de forma contínua, inevitavelmente, o concreto ficará mais poroso, tornando-se um canal aberto para o ataque de outros íons agressivos. Diante disso, no concreto armado as reações de carbonatação promovem o abaixamento do pH, que conseqüentemente faz com que a película passivadora da armação perca sua propriedade, resultando em um início de corrosão.

Verifica-se que a água do mar apresenta em sua constituição cloretos e sulfatos ligados ao magnésio e álcalis. Entretanto, estes sais dissolvidos que compõem a água do mar não são tão agressivos ao concreto. As ações químicas dos sais de sulfatos são mais lentas e menos energéticas nas águas do mar do que nas águas doces sulfatadas. A preocupação maior é com ações químicas dos cloretos.

Segundo COUTINHO (1988), a salinidade da água do mar é cerca de 3,5%, cuja distribuição dos íons é em média:

- Cl^- (1,898%);
- Br^- (0,006%);
- SO_4^{2-} (0,265%);
- Mg^{2+} (0,127%);
- Ca^+ (0,040%);
- Sr^{2+} (0,001%);
- K^+ (0,038%);
- Na^+ (1,056%).

Assim, águas do mar com elevados teores de cloretos podem causar eflorescência e umidade persistente na superfície do concreto. Não devendo ser utilizadas em concretos aparentes. No entanto, elas podem ser utilizadas em concretos simples sem função estrutural. Já em concreto armado acredita-se que tal água propicia o risco de corrosão das armaduras. Por outro lado, quando o concreto armado estiver submerso, aparentemente, não se observa nenhum fator prejudicial (NEVILLE, 1982). Em concreto protendido não se utiliza água do mar, por que nas seções dos fios das cordoalhas os efeitos da corrosão são mais sérios. Portanto, não se recomenda, na prática, a utilização desta água, a menos que isso seja inevitável.

No caso de águas residuais de indústrias, deverão ser analisados os íons presentes. Dependendo dos fatores de temperatura e também das quantidades encontrados de ácidos, compostos de enxofre, cloretos de amônio, magnésio e cálcio, os quais são agentes agressivos, propiciam a deterioração do concreto.

Resumidamente, a forma mais geral de ataque dos diversos tipos de águas na confecção de concretos é aquela em que, inicialmente, ocorre a ação química sobre o aglomerante, seguida de uma dissolução ou cristalização, com expansão

dos produtos formados. Por fim, quando se suspeitar da qualidade de uma água qualquer, para utilização na confecção de concretos, esta deve ser ensaiada e comparada a uma água potável comum. Tais ensaios visam à comparação dos tempos de início e fim de pega, bem como dos valores obtidos das resistências. As diferenças das resistências dos concretos confeccionados com a água duvidosa não poderão ser inferiores a 10% das resistências obtidas para os concretos que utilizaram a água potável comum.

Por fim, apresenta-se na Tabela 3.5, um resumo das substâncias conhecidas e os seus efeitos deletérios ao concreto (EQUIPE DE FURNAS, 1997).

3.3.4 A água no concreto endurecido

Verificou-se que a água é um constituinte primordial da pasta de cimento e a sua função na coesão do concreto é importantíssima. Diante disso, é conveniente apresentar as diferentes formas da água presentes no concreto endurecido, uma vez que ele é um material muito higroscópico. Tal propriedade se deve, principalmente, ao caráter hidrófilo do cimento. Assim, COUTINHO (1988) descreve de forma sucinta os diversos tipos da água presentes na pasta endurecida de um concreto, a saber:

- a) Água de constituição → água presente na constituição do sal, perdendo a sua identidade molecular, uma vez que os grupos hidróxidos se prendem por ligações primárias, covalentes, aos íons metálicos;
- b) Água de cristalização ou de hidratação → esta água é parte integrante de vários produtos hidratados do cimento. Ela se liga à rede cristalina do sal também por meio de ligações primárias, de modo que sua saída não se perde por secagem, somente por aquecimento, destruindo a estrutura cristalina do sal sem que este altere suas propriedades ou composição química;

Tabela 3.5 – Substâncias que afetam o concreto (EQUIPE DE FURNAS, 1997) ^(a)

ÁCIDO				
Material	Efeitos no Concreto	Material	Efeitos no Concreto	
Sulfuroso	Desintegração	Bórico	Nenhum	
Sulfúrico		Oxálico		
Carbônico		Esteárico	Desintegração lenta	
Nítrico		Oléico		
Clorídrico		Acético		
Lático		Tânico	Desintegração quando dissolvido em água	
Muriático		Sulfídrico		
Fosfórico	Ataque lento à superfície			
SAIS E ÁLCALIS				
Material	Efeitos no Concreto	Material	Efeitos no Concreto	
Carbonato de Amônia	Nenhum	Sulfato de Amônia	Desintegração	
Carbonato de Potássio		Sulfato de Potássio		
Carbonato de Sódio		Sulfato de Alumínio		
Hidróxido de Sódio		Sulfato de Magnésio		
Hidróxido de Cálcio		Sulfato de Zinco		
Hidróxido de Potássio		Sulfato de Sódio		
Nitrato de Cálcio		Sulfato de Níquel		
Nitrato de Potássio		Sulfato de Cálcio		
Nitrato de Sódio		Sulfato de Cobre		
Silicatos		Sulfato de Ferro		
Permanganato de Potássio		Cloreto de Magnésio		Desintegração lenta
Cloreto de Cálcio		Nenhum (exceto quando submetido ao efeito molhagem / secagem)		
Cloreto de Potássio		Cloreto de Mercúrio		
Cloreto de Sódio		Cloreto de Zinco		
Fluoretos	Nenhum (exceto fluoreto de amônia)	Cloreto de Cobre		
Nitrato de Amônia	Desintegração	Cloreto de Amônia		

Tabela 3.5 – Substâncias que afetam o concreto (EQUIPE DE FURNAS, 1997) ^(b)

DERIVADOS DE PETRÓLEO			
Material	Efeitos no Concreto	Material	Efeitos no Concreto
Gasolina	Nenhum, mas requer concreto impermeável e tratamento de superfície	Óleos minerais leves	Nenhum, mas requer concreto impermeável e tratamento de superfície
Querosene			
Benzina		Óleos minerais pesados	Nenhum
ÓLEOS VEGETAIS			
Material	Efeitos no Concreto	Material	Efeitos no Concreto
Amêndoa	Desintegração lenta na superfície do concreto	Tungue	Desintegração lenta na superfície do concreto
Rícino		Côco	
Oliva		Noz	
Amendoim			
GORDURA ANIMAL			
Material	Efeitos no Concreto	Material	Efeitos no Concreto
Toucinho e Peixe	Desintegração lenta na superfície do concreto	Banha	Desintegração lenta na superfície do concreto
SOLVENTES			
Material	Efeitos no Concreto	Material	Efeitos no Concreto
Xileno	nenhum	Antraceno	Nenhum
Tolueno		Cresol	Desintegração lenta
Benzeno		Fenol	
DIVERSOS			
Material	Efeitos no Concreto	Material	Efeitos no Concreto
Detergente, Cerveja e Cidra	Desintegração	Álcool e Mel	Nenhum
Salmoura	Desprezível em concretos impermeáveis	Glicose e Glicerina	Desintegração lenta

- c) Água zeolítica → água ligada à rede cristalina do sal, mas que se interpõe nas lamelas desta rede, de modo que a sua saída ou entrada não modifica a estrutura do sal; verifica-se que apenas o espaçamento entre as lamelas é alterado. As ligações aqui nesta água são mais fracas do que nas águas anteriores;
- d) Água adsorvida → é a água que está sob a influência de forças de atração, de adsorção, de superfície ou de Van der Waals, que atraem as moléculas dos fluidos da sua vizinhança. As moléculas de água são fortemente atraídas pela superfície dos cristais dos componentes hidratados do cimento. As energias de ligação de moléculas individuais de água diminuem com a distância em relação à superfície do sólido, assim a porção maior da água adsorvida pode ser perdida por secagem da pasta a 30% de umidade relativa. Esta perda é a causa principal da retração da pasta na secagem;
- e) Água capilar → é a água que ocupa o espaço além da ação das forças de adsorção, resultando da condensação do vapor de água nos capilares. A sua quantidade varia em função da umidade relativa do ar e com o raio do capilar;
- f) Água livre → é uma categoria da água capilar, a qual apresenta capilares grandes, da ordem de 0,05 μm . Sua remoção não causa qualquer variação de volume. Portanto, é a água que não sofre ação de quaisquer forças, ficando livre para evaporar-se durante o endurecimento do concreto;
- g) Água retida por tensão capilar → esta água está presente nos capilares de diâmetros pequenos, cerca de 0,005 a 0,05 μm , cuja remoção pode causar o fenômeno de retração do concreto.

Para uma melhor compreensão do exposto, observa-se na Figura 3.6 a esquematização das categorias de água na pasta de cimento hidratado. A

eliminação da água presente no interior do concreto, através da secagem natural ou forçada (por aquecimento) é bem típica para uma água zeolítica e/ou adsorvida, as quais podem ser confundidas. Para a água de constituição, as saídas dos íons hidroxilas podem ocorrer primeiramente aos da eliminação total da água de cristalização e até da adsorvida.

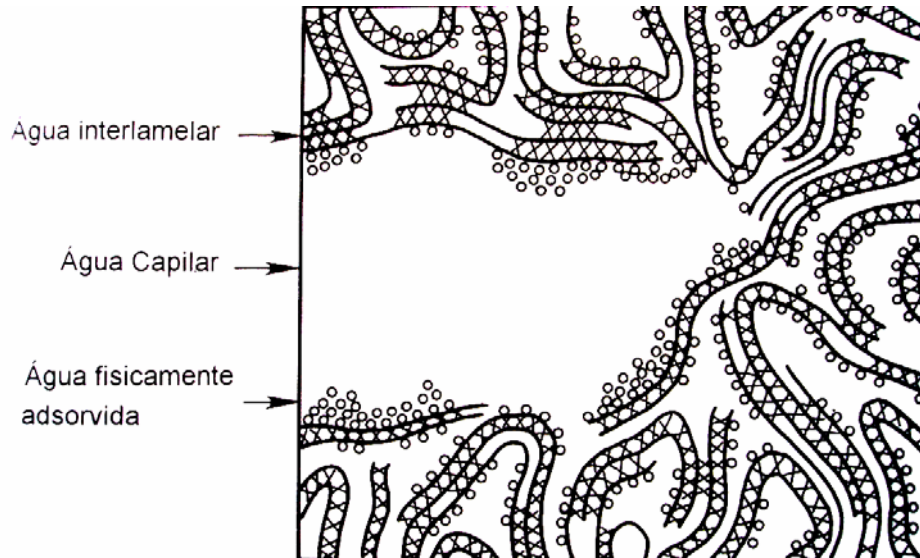


Figura 3.6 - Esquemática das categorias de água na pasta de cimento hidratado (MEHTA, 1994)

Portanto, ao se tratar do fenômeno de secagem do concreto, é mais fácil e prático distinguir apenas duas espécies de água, a partir do conceito de evaporação: a evaporável e a não evaporável.

3.3.5 Mecanismo de redução da tensão superficial pela ação de aditivos tensoativos

No item 3.1.2.4 foi apresentada uma noção mais geral dos vários tipos de aditivos que podem ser utilizados na confecção de concretos. Aqui será enfatizado, como referenciado pelo título, somente os aditivos tensoativos.

Entende-se por aditivos tensoativos aqueles que possuem a capacidade de reduzir a água de amassamento de uma mistura de concretos e argamassas, e que também são denominados por aditivos plastificantes. Antes de descrever o mecanismo de sua ação e de mencionar as substâncias que lhe servem de base, convém fazer uma descrição geral e esquemática de sua nomenclatura e constituição.

As substâncias tensoativas são aquelas que possuem propriedades físico-químicas de modificarem a tensão superficial da água (dissolvente). Suas moléculas, essencialmente orgânicas, apresentam-se alongadas e tem uma extremidade hidrófila (capacidade de atrair água) e a outra hidrófoba (capacidade de repelir água). A extremidade hidrófila contém grupos hidroxicarboxílicos ($-\text{COOH}$), grupos carboxilatos de sódio, cálcio, etc ($-\text{COONa}$, $\text{COO}-\text{Ca}-\text{OCC}$), também grupos do ácido sulfônico ($-\text{SO}_3\text{H}$) e grupos de sais sulfonatos de sódio, cálcio, etc ($-\text{SO}_3\text{Na}$, $\text{SO}_3-\text{Ca}-\text{SO}_3$).

Para baixar a tensão superficial da água é necessária pequena quantidade destes produtos tensoativos, de maneira que em meio aquoso, as suas moléculas tendem a migrar para a superfície onde a parte hidrófoba apresenta grande tendência para sair da água e, na superfície de separação água-ar, orientam-se de modo a se afastarem da água, ocupando uma posição normal a esta superfície. Tal fato se observa na Figura 3.7.

Em virtude do custo do cimento surgiram no mercado os aditivos superplastificantes, também denominados tensoativos, os quais são substâncias produzidas industrialmente, não sendo, como os plastificantes, subprodutos industriais. Os aditivos superplastificantes não serão objeto de estudo desta dissertação, uma vez que atuam de modo idêntico ao que será exposto para os aditivos plastificantes.

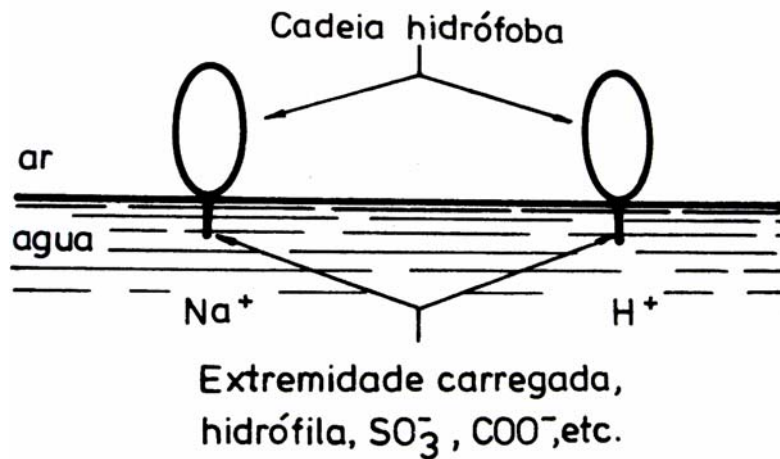


Figura 3.7 – Esquema da molécula de uma substância tensoativa

(COUTINHO, 1988)

Assim, o termo plastificante origina-se das primeiras adições feitas aos concretos, de materiais pulverulentos e de grande finura como a diatomite, cal gorda, bentoite, pozolanas e etc. Tais materiais eram adicionados à massa do cimento em quantidades reduzidas (cerca de 2 a 3%), com o que era possível reduzir a água de amassamento e manter a trabalhabilidade desejada, ou aumentá-la sem incrementar a quantidade de água. Em especial, os plastificantes são adicionados ao concreto para satisfazer o seguinte:

- aumento das resistências;
- promover a redução do cimento sem afetar as resistências bem como a trabalhabilidade;
- propiciar o aumento da trabalhabilidade, conservando as dosagens de água e cimento;
- reduzir a permeabilidade.

Como foi dito anteriormente, o aditivo plastificante é um material constituído por moléculas tensoativas com uma parte hidrófila, com função de baixar a tensão superficial da água na intersuperfície em que está adsorvida, e a outra parte, hidrófoba, menos importante, neste caso. Como o grupo hidrófilo é predominante, este tem forte tendência para ser adsorvida pelas partículas mais finas do agregado, e especialmente pelo cimento. Ao se misturar cimento e agregados com água, não se verifica uma total dispersão destes pelo líquido. O que se nota é a associação de grãos com diversas dimensões, que se aderem devido à ação dos meniscos de água provocados pelo ar incluído entre os grãos, conferindo uma boa coesão capilar. Tal fato pode ser observado na Figura 3.8.

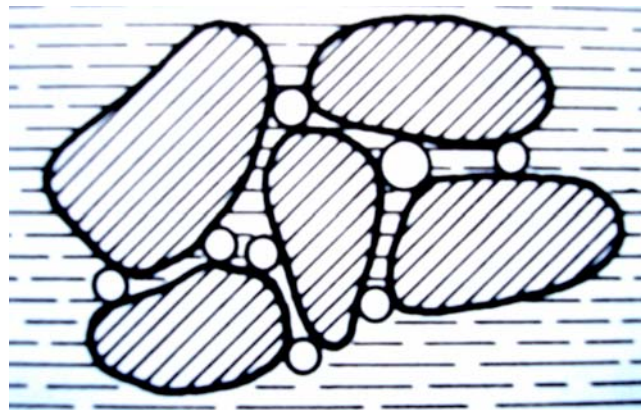


Figura 3.8 – Partículas de cimento floculadas, aglomeradas pelas tensões capilares devidas à presença de ar e água (COUTINHO, 1988)

Por outro lado, quando as partículas de cimento entram em contato com a água na qual se dissolveu um plastificante, estas são mais bem molhadas devido à adsorção da parte hidrófoba da molécula do dispersante. Assim, a parte ionizada confere à partícula uma carga de modo que o ar que estava entre elas é expulso, obtendo a dispersão do cimento, conforme se observa na Figura 3.9.

A partir dos fenômenos conhecidos da físico-química das superfícies, percebe-se que as moléculas ficam orientadas à superfície do grão com a parte hidrófoba rigidamente ligada à superfície agregado e do cimento e a extremidade liófila bem mergulhada na água, constituindo a chamada camada fixa; além desta camada surge uma outra constituída pelos íons libertados pela molécula do tensoativo, originando uma segunda camada de íons de sinal oposto aos da primeira. Como as forças de atração da primeira camada vão diminuindo de intensidade à medida que se aumenta a distância a partir da partícula, a segunda camada é constituída por uma atmosfera de íons cuja concentração vai diminuindo com a distância denominando uma camada difusa.

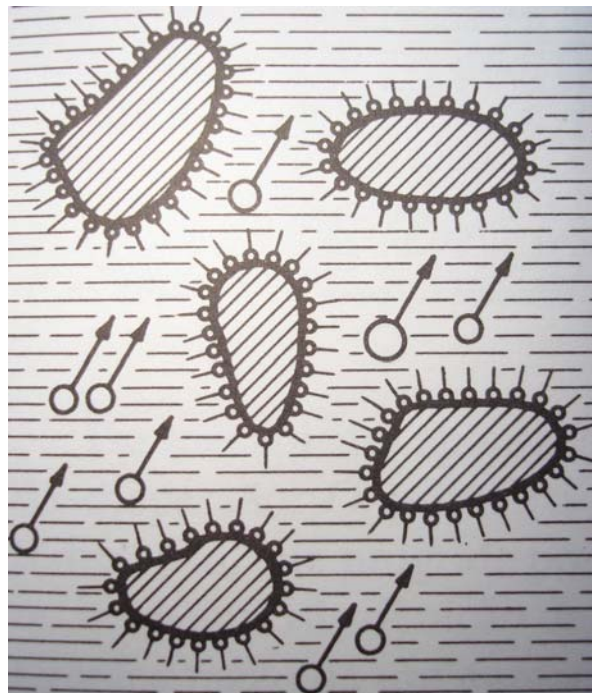


Figura 3.9 – Expulsão do ar sob a ação de um plastificante (COUTINHO, 1988)

Assim, as partículas de cimento adquirem um potencial elétrico com repulsão eletrostática entre elas. Este potencial orienta por sua vez os dipolos que constituem as moléculas de água ao redor das partículas. Forma-se então uma camada de moléculas de água que impede a aproximação entre essas partículas.

Diante disso, obtém-se uma diferença de potencial entre a interface da dupla camada e um ponto qualquer da solução, a qual se denomina potencial eletrocinético ou potencial zeta. O valor deste potencial governa todo o comportamento do cimento em suspensão aquosa. Tal fato é observado na Figura 3.10.

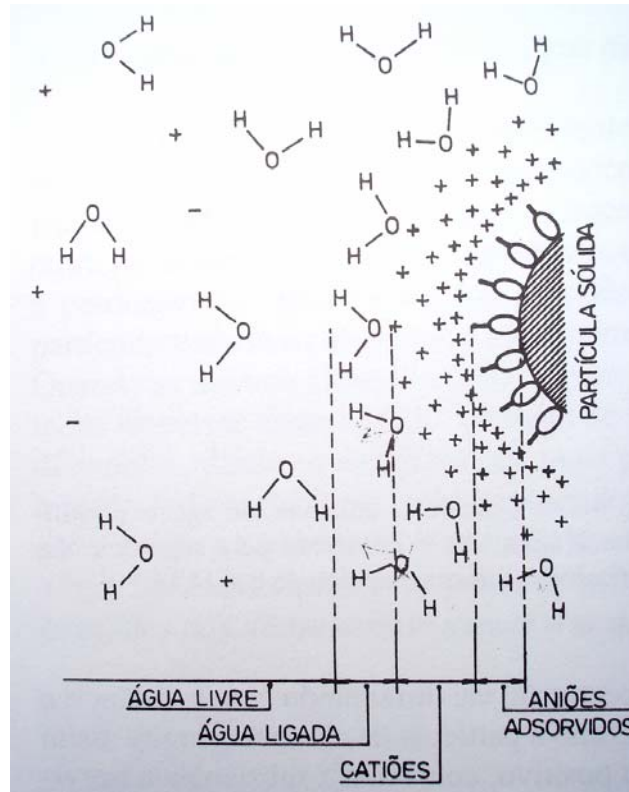


Figura 3.10 – Esquema teórico da atmosfera iônica (COUTINHO, 1988)

A redução da tensão intersuperficial, o aumento do potencial eletrocinético e a formação de uma camada protetora e aderente de moléculas de água contribuem conjuntamente para a dispersão e estabilidade dos grãos de cimento em meio aquoso. Conseqüentemente a este mecanismo, a água que separava os grãos de cimento, na ausência do dispersante (Figura 3.11), fica livre entre as partículas dispersas. Devido à camada das moléculas de água orientadas ao redor das

partículas, o atrito entre estas é muito reduzido (Figura 3.12), não sendo necessária para a sua redução à existência de camadas muito espessas de água, o que permite aproximá-las umas das outras (Figura 3.13) sem que aumente o atrito. Devido a isso, denominam-se estes aditivos como agentes redutores de água de amassamento durante a confecção de concretos.

Do mecanismo de ação do aditivo tensoativo destacado, resultam dois efeitos essenciais da dispersão. O primeiro é expor maior área superficial dos grãos de cimento à hidratação, proporcionando um melhor desempenho desta e uma distribuição mais uniforme por toda massa de concreto. Desta maneira consegue-se um incremento nas resistências, quando comparado a um concreto que não utilizou um aditivo tensoativo, conservando o mesmo fator água/cimento (Figura 3.14). O outro efeito consiste na redução da água de amassamento, quando se pretende manter a trabalhabilidade igual à do concreto sem esse tipo de aditivo tensoativo. Assim, todo aditivo tensoativo que permita uma redução de pelo menos 5% da água de amassamento, é um redutor de água.

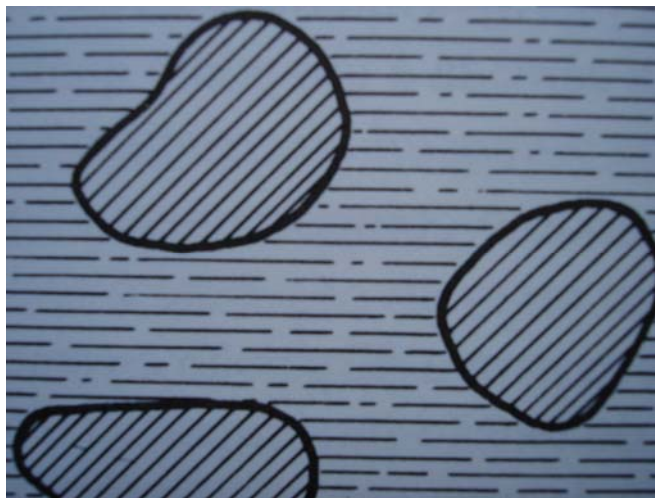


Figura 3.11 – Quando não há plastificante, a quantidade de água necessária para a mobilidade das partículas é grande (COUTINHO, 1988)

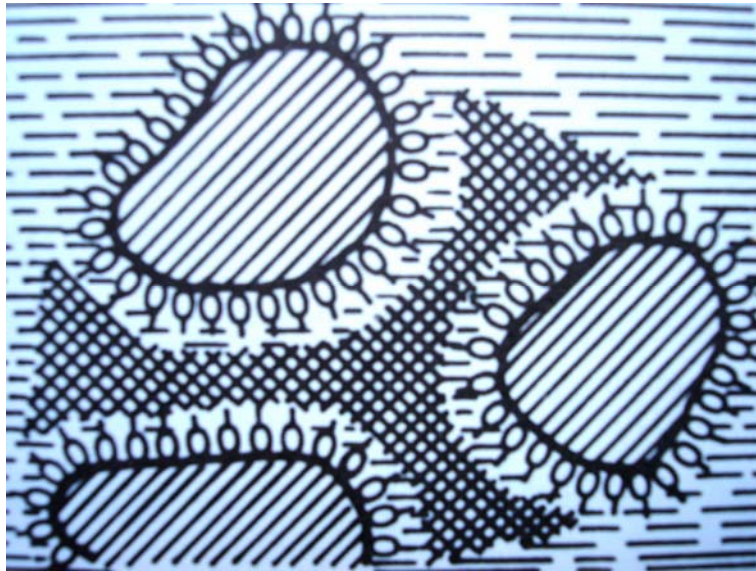


Figura 3.12 – Quando se adiciona plastificante, as partículas se repelem e a água que fica livre entre elas não é necessária para a sua mobilidade

(COUTINHO, 1988)

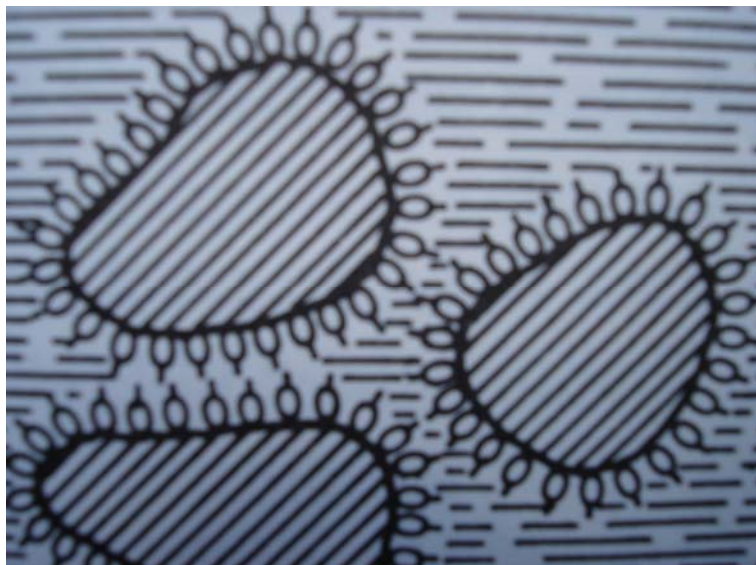


Figura 3.13 – As distâncias entre as partículas reduzem-se e a água em excesso pode ser dispensada (COUTINHO, 1988)

A título de curiosidade, as substâncias químicas de base, iônicas e não iônicas dos aditivos tensoativos são os seguintes, conforme COUTINHO (1988):

- sabões de resina ou abietatos alcalinos de sódio ou potássio, obtidos a partir do tratamento de uma resina vegetal;
- linhossulfonatos de amônio, magnésio, cálcio, ou sódio, que são subprodutos da fabricação da pasta de papel;
- alquilarilsulfonato que são detergentes sintéticos com cadeias de poucos átomos de carbono;
- sal de hidrocarboneto sulfonado que são subprodutos do tratamento dos petróleos;
- ácidos polihidroxicarboxílicos como o ácido salicílico e seus sais;
- ésteres de poliglicol, em geral monoésteres de poliálcoois, ou condensados de álcoois com o óxido de etileno.

3.4 A Indução Magnética da Água

3.4.1 Introdução

Serão abordadas neste item noções sobre eletromagnetismo, uma vez que o protótipo utilizado para magnetizar a água foi desenvolvido com tal propriedade. Esta pesquisa se preocupou somente com a utilização da água magnetizada na produção dos concretos e não em descrever como foi desenvolvido o equipamento usado para magnetizá-la.

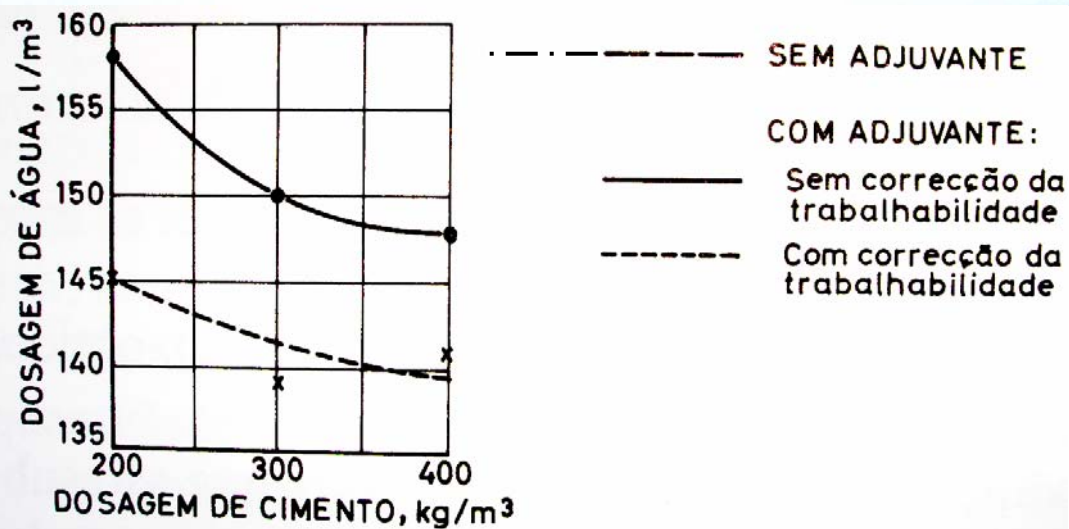
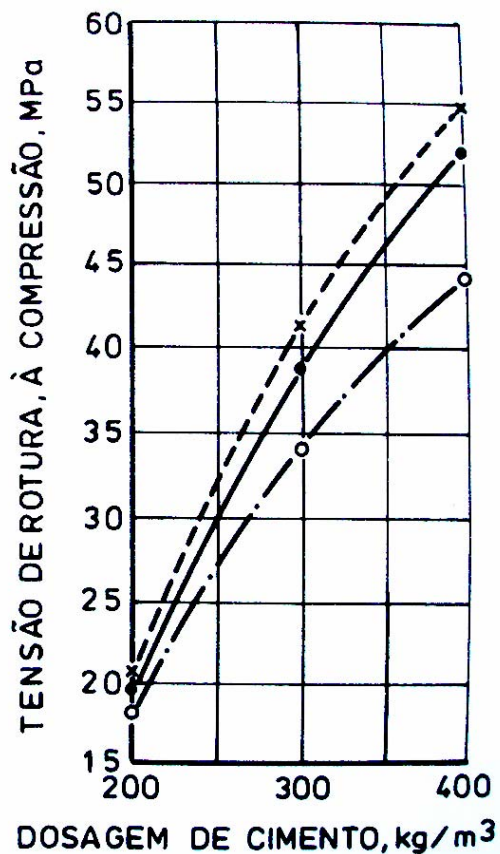
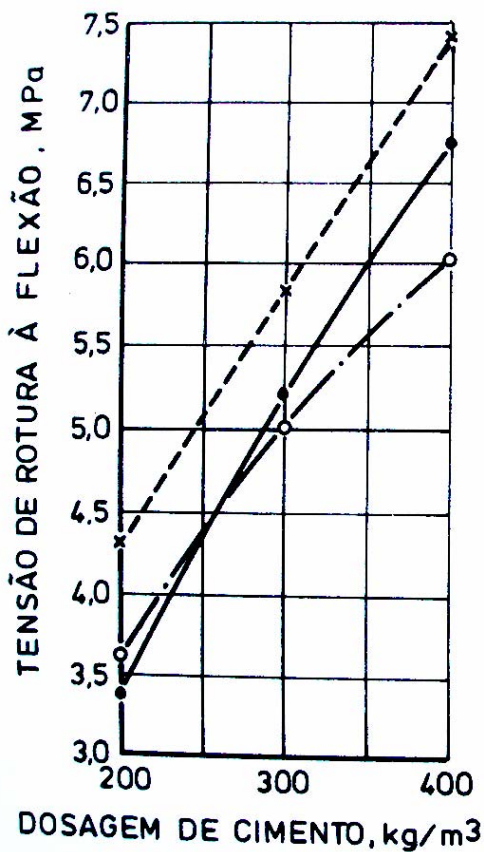


Figura 3.14 – influência da adição de um plastificante ao concreto sem correção da trabalhabilidade e com correção da trabalhabilidade inicial pela diminuição da água de amassamento. Resistências aos 28 dias (COUTINHO, 1988)

O conhecimento do magnetismo remonta aos gregos, os quais observaram que algumas pedras, conhecidas atualmente como magnetita, atraíam o ferro e também eles notaram que ao se atritar uma barra de âmbar, esta atraía pequenas partículas. Somente muito tempo depois eles desenvolveram as bússolas para determinar uma direção a partir destas pedras-ímãs. Hoje em dia, verifica-se a presença dos ímãs e materiais magnéticos nos videocassetes, fitas cassetes, cartões de crédito, fones de ouvido, instrumentos musicais, informática e mesmo em tintas para impressão de papel moeda (HALLIDAY *et al*, 2003).

Faraday foi o precursor da indução quando expressou a lei da indução de Faraday que diz que uma força eletromotriz é induzida em uma espira quando o número de linhas de campo magnético estiver variando ao atravessá-la. A partir da noção de fluxo magnético, pode-se enunciar esta mesma lei de uma maneira mais quantitativa: a intensidade da força eletromotriz induzida em uma espira condutora é igual à taxa na qual o fluxo magnético através desta espira varia com o tempo e conseqüentemente também se produz um campo elétrico. Portanto, o processo de produção da corrente e da força eletromotriz induzidas, por meio de um campo magnético variável é denominado de indução. Por outro lado, devido à simetria que é tão poderosa em física, tem-se a seguinte questão: um fluxo elétrico variável pode induzir um campo magnético? Respondendo positivamente a esta pergunta, por analogia, a lei de indução de Maxwell diz que um campo magnético induzido surge na região envolta por um laço fechado devido à variação do fluxo elétrico.

3.4.2 Mecanismos de obtenção

Da física, sabe-se que um ímã produz um campo magnético em todos os pontos do espaço ao seu redor. Um tipo familiar de ímã surge quando uma bobina de fio é enrolada em volta de um núcleo de ferro e uma corrente passa por este, sendo a intensidade do campo magnético determinada pela intensidade desta mesma corrente. Um exemplo de eletroímã na indústria é aquele utilizado para separar ferro velho. Por outro lado, existem os ímãs permanentes, aqueles utilizados para

vedação em portas de geladeira, que não necessitam de corrente elétrica para promoverem um campo magnético. Diante disso, se faz necessário formular uma pergunta; como surgem os campos magnéticos? Uma primeira resposta a esta pergunta associa-se ao fato de as partículas carregadas eletricamente em movimento, uma corrente em um fio, por exemplo, criam campos magnéticos. A outra resposta é que partículas elementares, como os elétrons, possuem um campo magnético intrínseco em sua volta; ou seja, este campo é uma característica nata destas partículas, como também são a sua massa e carga (HALLIDAY *et al*, 2003).

O campo magnético também pode ser definido em termos da força magnética exercida sobre uma partícula eletricamente carregada em movimento. A unidade no sistema internacional para o campo magnético é o newton por coulomb metro por segundo, que também é chamada de *tesla* (T). Uma unidade mais antiga para o campo magnético é o *gauss* (G), ainda em uso corrente. Assim, podemos evidenciar que

$$1 \text{ tesla} = 10^4 \text{ gauss.}$$

A Tabela 3.6 apresenta alguns campos magnéticos aproximados em algumas situações.

Tabela 3.6 – Campos magnéticos aproximados (HALLIDAY *et al*, 2003)

Na superfície de uma estrela de nêutron	10^8 T
Próximo a um grande eletroímã	1,5 T
Próximo a uma pequena barra imantada	10^{-2} T
Na superfície da Terra	10^{-4} T
No espaço interestelar	10^{-10} T
Menor valor em um ambiente blindado magneticamente	10^{-14} T

As propriedades magnéticas dos materiais podem ser explicadas através dos seus átomos e elétrons. Os ímãs possuem dois pólos, o pólo sul e o pólo norte por

convenção, o que os caracteriza como um fiel exemplo de dipolo magnético. Isto tanto é verdade que, ao se partir um pedaço de ímã em vários pedaços menores, até os seus átomos individuais, não se conseguirá isolar um único pólo. Enfatizando ao que já foi dito, a estrutura magnética mais simples que pode existir é um dipolo magnético. A partir do conceito de dipolo magnético, surge então o enunciado da lei de Gauss para campos magnéticos. A lei afirma que o fluxo magnético resultante através de qualquer superfície gaussiana fechada é nulo.

O magnetismo pode ser explicado através de três tipos gerais: diamagnetismo, paramagnetismo e ferromagnetismo. O diamagnetismo é manifestado pelos materiais mais comuns, o qual é tão fraco que poderá ser mascarado pelos outros dois tipos de magnetismo. Assim, no diamagnetismo, são gerados fracos momentos de dipolo magnético pelos átomos do material quando este é colocado em um campo magnético externo.

O paramagnetismo se manifesta por materiais que contenham elementos de transição, elementos de terras-raras (lantanídeos) e elementos actinídeos. Os átomos dos materiais com esta característica possuem um momento de dipolo resultante permanente, os quais estão orientados aleatoriamente e este material carece de um campo magnético resultante. Este campo magnético resultante é gerado a partir de um campo magnético externo que alinha parcialmente os momentos de dipolo magnético atômicos. Tal alinhamento e campo magnético resultante desaparecem ao se retirar o campo externo.

Por fim, o ferromagnetismo é uma propriedade do ferro, do níquel, cobalto gadolínio e de alguns outros elementos (ligas e compostos destes elementos). A característica de regiões com fortes momentos de dipolo magnético, apresentados por estes materiais, se devem ao fato de alguns dos elétrons possuir momentos de dipolo magnético resultante alinhados. Um campo externo pode então alinhar os momentos magnéticos de tais regiões, produzindo um forte campo magnético

para uma amostra do material; o campo persiste parcialmente quando o campo magnético externo é removido (HALLIDAY *et al*, 2003).

3.4.3 Benefícios proporcionados à água

Antes de descrever os benefícios proporcionados à água, deve-se entender sobre a definição de momento de dipolo elétrico como sendo um vetor que aponta da extremidade negativa para a extremidade positiva do dipolo.

Diante disso, a molécula de água (H_2O) é um dipolo elétrico, tal molécula pode ser observado na Figura 3.15. Observa-se nela que os pontos em negrito evidenciam os núcleos de oxigênio (que possui oito prótons) e os dois núcleos de hidrogênio (que possuem um próton cada). As áreas sombreadas em torno dos núcleos representam as regiões nas quais podem estar localizados os elétrons.

Na molécula de água, os átomos de hidrogênio e o átomo de oxigênio não se apresentam alinhados e sim formando um ângulo de 105° como destaca a Figura 3.15. Conseqüentemente, as moléculas de água apresentam um lado mais “hidrogênio” e outro lado mais “oxigênio” bem definidos. Além disso, os 10 elétrons da molécula de água tendem a permanecer mais próximo do núcleo de oxigênio do que dos núcleos de hidrogênio (HALLIDAY *et al*, 2003). Desta maneira, o lado de oxigênio da molécula tende a ser mais negativo do que o lado de hidrogênio, criando assim um momento de dipolo \vec{p} que aponta na direção do eixo de simetria da molécula, como mostrado.

Portanto, se esta molécula de água for colocada em um campo elétrico externo \vec{E} , ela se comportará do mesmo modo que seria esperado do mais abstrato dipolo elétrico. Assim, uma vez que o campo elétrico é uniforme, a força resultante desse campo sobre o dipolo é nula e o centro de massa do dipolo não se move. No entanto, as forças sobre as extremidades carregadas produzem um torque resultante sobre o dipolo em torno do seu centro de massa. A partir deste contexto

é que se verifica o benefício ganho pela água magnetizada, que agora se apresenta de forma orientada como se observou na Figura 3.3.

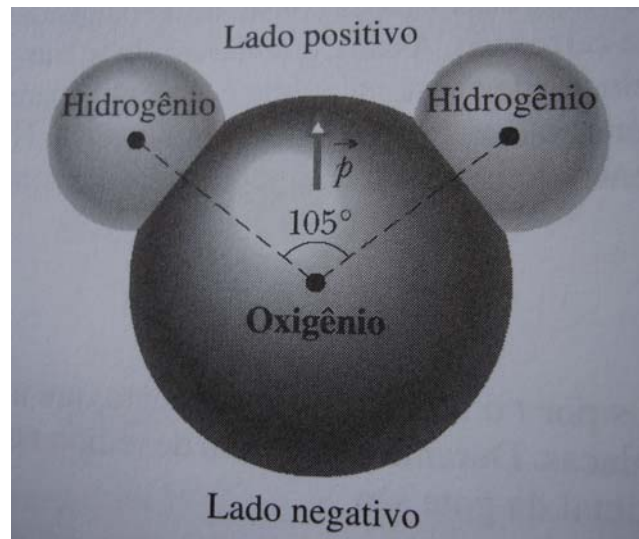


Figura 3.15 – Molécula de água mostrando os três núcleos (representados por pontos) e as regiões nas quais os elétrons podem estar localizados

(HALLIDAY *et al*, 2003)

Por outro lado, outras moléculas (chamadas de moléculas não-polares) e todos os átomos isolados, os centros das cargas positivas e negativas coincidem, não gerando nenhum momento de dipolo (Figura 3.16a). Entretanto, ao se colocar um átomo ou uma molécula não-polar em um campo elétrico externo \vec{E} , este distorce as órbitas dos elétrons e separa os centros das cargas positivas e negativas. Isto se observa na Figura 3.16b. Devido à carga negativa dos elétrons, estes tendem a ser deslocado no sentido contrário ao campo. Este movimento cria um momento de dipolo \vec{p} que aponta na mesma direção e sentido do campo. Segundo Halliday *et al*, este dipolo é induzido pelo campo e o átomo ou molécula é então polarizado pelo campo (ele possui um lado positivo e um lado negativo). Quando este é removido, o momento de dipolo induzido e polarização desaparecem.

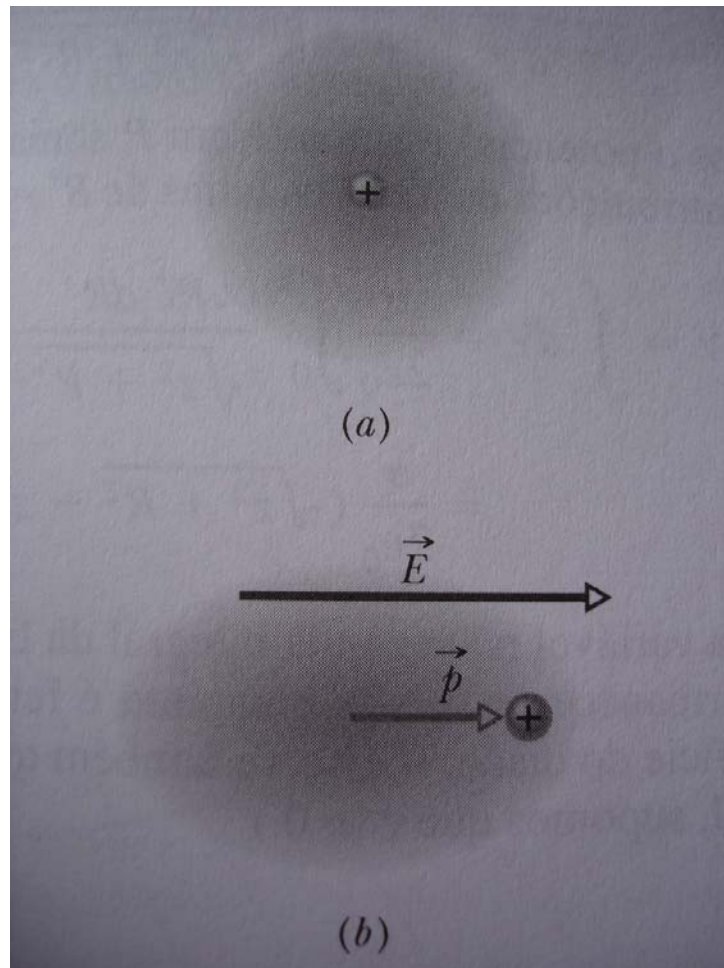


Figura 3.16 – (a) Um átomo, mostrando o núcleo carregado positivamente e os elétrons carregados negativamente (sombreados). Os centros das cargas positiva e negativa coincidem. (b) Se o átomo for colocado em um campo elétrico externo \vec{E} , as órbitas dos elétrons são distorcidas, de modo que os centros das cargas positiva e negativa não mais coincidem. Surge um momento de dipolo induzido \vec{p} . A distorção foi bastante exagerada na figura (HALLIDAY *et al*, 2003)

3.4.4 Tensão superficial da água

As forças atrativas entre moléculas neutras, quimicamente saturadas, postuladas por Van der Waals, são também originadas por interações elétricas. Estas atrações intermoleculares são reconhecidas de três maneiras. Primeiramente, quando duas moléculas com dipolos permanentes se orientam reciprocamente de tal maneira, resultando em uma atração. Posteriormente, se dá quando as moléculas dipolares induzem a formação de dipolos em outras moléculas, originando também em uma atração. E finalmente, a existência de forças atrativas entre as moléculas apolares. Forças estas que são conhecidas como forças de dispersão devidas à polarização provocada em uma das moléculas pelas flutuações da repartição de cargas na outra molécula, e vice-versa. A partir desse exposto, as forças de atração de Van der Waals de curto alcance entre as moléculas, responsáveis pela existência do estado líquido, são uma evidência bastante conhecida. Desta maneira, os fenômenos que regem a tensão superficial são explicáveis e se balizam por estas forças (SHAW, 1975).

As moléculas situadas no interior de um líquido estão sujeitas a forças de atração iguais em todas as direções, enquanto que as moléculas situadas, por exemplo, numa superfície de separação líquido-ar estão submetidas a forças de atração desequilibradas, do que resulta uma força em direção ao interior do líquido. Assim, uma grande quantidade de moléculas se deslocará da superfície para o interior do líquido e a superfície tenderá a contrair-se espontaneamente. Isto explica a tendência da forma esférica que as gotículas de um líquido ou bolha de um gás assumem. Conseqüentemente, existe uma diferença de pressão ao longo de uma superfície curva, caracterizando uma maior pressão na parte côncava desta mesma curva. Portanto, é mais conveniente definir tensão superficial e energia livre superficial como sendo o trabalho necessário para aumentar a superfície em uma unidade de área, por um processo isotérmico e reversível. A Tabela 3.7 apresenta alguns valores da tensão superficial para alguns líquidos à temperatura de 20 °C.

Tabela 3.7 – Tensões superficiais para alguns líquidos à temperatura de 20 °C (SHAW, 1975).

LÍQUIDO	TENSÃO SUPERFICIAL
	(dina/cm)
Água	72,75
Benzeno	28,88
Ácido acético	27,60
Acetona	23,70
CCl ₄	26,80
Etanol	22,30
n-Octanol	27,50
n-Hexano	18,40
n-Octano	21,80
Mercúrio	485,00

Sabe-se que a tensão superficial da maioria dos líquidos diminui com o aumento da temperatura, linearmente, exceto alguns metais, e se torna muito pequena nas proximidades da temperatura crítica, na qual as forças coesivas intermoleculares tendem a zero. Existem diversas equações empíricas que relacionam a tensão superficial com a temperatura, sendo uma das mais satisfatórias a equação de Ramsay e Shields.

Existem diversos métodos com suas equações para se medir a tensão superficial de um líquido, sendo eles:

- método do capilar;
- método das placas de Wilhelmy;
- método do anel;
- métodos baseados em volume e peso da gotícula;
- método da gota pendente e;
- método do jato oscilante.

Quando uma gota de água é colocada sobre uma superfície sólida plana, ela poderá espalhar-se completamente sobre toda a superfície, ou, mais provavelmente, ela permanecerá como uma gota, com um certo ângulo de contato com a superfície sólida. Tal fenômeno pode ser observado na Figura 3.17.

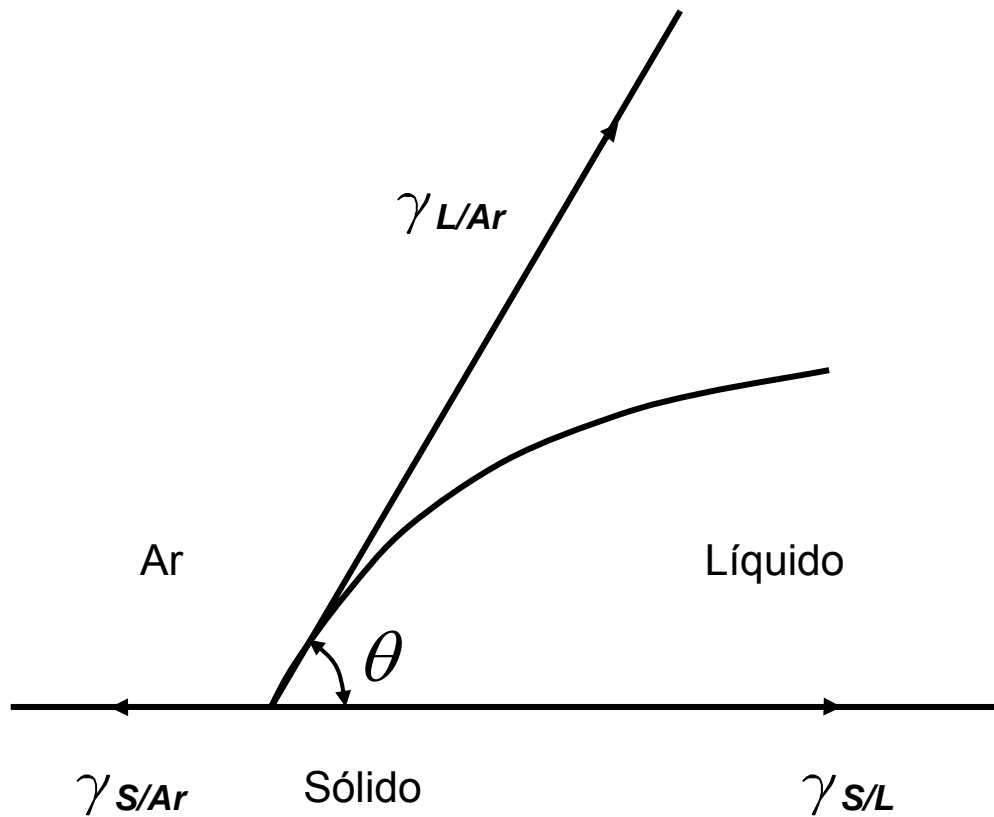


Figura 3.17 – Gota de um líquido colocado sobre uma superfície (SHAW, 1975)

É pela equação de Young que se calcula o ângulo de contato entre as superfícies.

$$W_{S/L} = \gamma_{L/Ar} + (1 + \cos \theta) \quad (3.11)$$

Esse ângulo de contato será nulo quando as forças de atração entre líquido e sólido forem iguais ou maiores do que as forças de atração entre líquido e líquido e finito quando o líquido adere ao sólido com força menor do que a força que causa sua própria coesão (SHAW, 1975). Deste modo, o sólido se mostrará

completamente umedecido pelo líquido se o ângulo de contato for nulo e parcialmente umedecido se este ângulo de contato possuir um valor infinito. Entretanto, alguns autores relacionam valores para este ângulo menores que 90° a ocorrência de umedecimento e para valores maiores de 90° a ocorrência de não umedecimento.

Diante do exposto anteriormente, parece fácil medir o ângulo de contato, mas isto não é verdade, sendo complicado devido aos fatores a seguir:

- se uma superfície estiver contaminada, isto tende a diminuir o ângulo de contato;
- as superfícies sólidas diferem das superfícies líquidas por apresentarem imperfeições mesmo depois de um excelente polimento segundo os mais rigorosos padrões ópticos, quando comparada com uma superfície líquida em repouso;
- depender se o líquido em uma superfície seca está avançando ou retrocedendo de uma superfície úmida. Este efeito de histerese é mais evidenciado em superfícies impuras. A diferença entre estes ângulos de contato de líquidos que avançam ou retrocedem pode chegar a ser de até 50° . Tal efeito pode ser observado, por exemplo, através de gotas de chuva em uma vidraça suja.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Introdução

A partir de agora será descrito o que foi desenvolvido nesta pesquisa. Sabe-se que a água de amassamento utilizada na confecção de concretos influencia significativamente as suas propriedades. Contudo, estudos sobre a mesma ainda são bastante escassos. O início das pesquisas usando água magnetizada se deu por volta de 1962 por Wulachoufuski e Alnanina na Rússia. Pesquisas também realizadas na China, Japão e Estados Unidos revelaram ganhos significativos às propriedades do concreto como a trabalhabilidade, reação de hidratação acelerada, ganho de resistência à compressão e uma melhor impermeabilidade à penetração de agentes externos.

Conseqüentemente observou-se um ganho em resistência à compressão e uma redução da quantidade de cimento utilizado nos concretos fabricados com a água magnetizada. Desta maneira, os estudos de SU e WU (2003) confirmam uma economia de cimento da ordem de 5% e os ganhos de resistência à compressão em torno de 10% para concretos confeccionados com cinzas volantes. Por outro lado, SU, WU e MAR (2000) obtiveram um ganho em resistência à compressão dos concretos confeccionados com escória de alto forno entre 10% e 23%.

Serão apresentados os ensaios físicos dos materiais utilizados nesta pesquisa de acordo com as normas técnicas conhecidas, bem como os traços de concreto utilizados, métodos empregados e principalmente os resultados alcançados. Tais resultados proporcionarão ou não um ganho adicional a toda comunidade científica.

4.2 Materiais

4.2.1 Introdução

Os materiais utilizados nesta pesquisa foram devidamente analisados e ensaiados para que fossem atingidos todos os objetivos aqui propostos anteriormente. Desta maneira, estes materiais empregados na produção dos concretos cumprem as especificações da ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, são facilmente encontrados no mercado e foram utilizados nas mesmas condições em que são empregados usualmente. Tais materiais serão descritos nos tópicos seguintes.

4.2.2 Aglomerante

O cimento utilizado nos experimentos desta pesquisa foi o cimento Portland composto com escória do tipo CPII - E 40. A composição deste cimento deve, segundo as especificações de norma e informação do fabricante, estar compreendida entre os limites fixados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Componentes do cimento Portland composto com escória

Sigla	Classe de Resistência	Componentes (% em massa)			
		Clínquer + Sulfatos de Cálcio	Escória granulada de alto-forno	Gesso	Material Carbonático
CP II-E	40	62	34	4	0

As exigências químicas para o CP II-E 40 devem estar contidas dentro dos limites estabelecidos por norma, conforme Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Exigências químicas para o cimento Portland composto com escória

Determinações químicas	Limites (% da massa)	
	CP II-E	
Resíduo insolúvel (RI)	≤ 2,5	
Perda ao fogo (PF)	≤ 6,5	
Óxido de magnésio (MgO)	≤ 6,5	
Trióxido de enxofre (SO ₃)	≤ 4,0	
Anidrido carbônico (CO ₂)	≤ 5,0	

As exigências físicas e mecânicas também são estabelecidas por norma, conforme apresentado na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Exigências físicas e mecânicas para o CP II-E 40.

Características e Propriedades		Unidade	Limites CP II-E
Finura	Resíduo na peneira 75µm	%	≤ 10,0
	Área específica	m ² /kg	≥ 280,0
	Tempo de início de pega	H	≥ 1,0
	Expansibilidade a quente	Mm	≤ 5,0
Resistência à compressão	3 dias de idade	MPa	≥ 15,0
	7 dias de idade	MPa	≥ 25,0
	28 dias de idade	MPa	≥ 40,0
	Tempo de fim de pega*	H	≤ 10,0
	Expansibilidade a frio*	mm	≤ 5,0
	Teor da escória*	%	6-34
	Teor de material pozolânico*	%	-
	Teor de material carbonático*	%	0-10

* facultativas

4.2.3 Agregado graúdo

Os agregados graúdos utilizados neste trabalho foram obtidos a partir de rochas compactas depositadas geologicamente, chamadas de jazidas, as quais foram extraídas e beneficiadas pelo processo industrial de fragmentação controlada com auxílio de britadores. Uma outra definição para os agregados graúdos pode ser entendida como o material proveniente do britamento de rochas estáveis, o qual admite um máximo de 15% de sua massa passante na peneira de 4,8 mm. A classificação destes materiais britados de acordo com suas dimensões é dada a seguir, sendo diâmetro mínimo a abertura da peneira à qual corresponde uma porcentagem retida igual ou imediatamente superior a 95%. Desta maneira:

- brita 0 \Rightarrow 4,8 – 9,5 mm
- brita 1 \Rightarrow 9,5 – 19 mm
- brita 2 \Rightarrow 19 – 25 mm
- brita 3 \Rightarrow 25 – 50 mm
- brita 4 \Rightarrow 50 – 76 mm

As britas utilizadas no presente trabalho foram as identificadas como N° 0 e N° 1, de origem calcária e adquiridas junto a um fornecedor da cidade de Pedro Leopoldo no estado de Minas Gerais. As rochas sedimentares calcárias são constituídas de mais de 50% de carbonato de sódio e suas características físicas são comumente:

- densidade \Rightarrow 2,8 kg/dm³
- taxa de ruptura sob compressão \Rightarrow 160 MPa
- taxa de ruptura sob flexão \Rightarrow 20 MPa
- taxa de ruptura sob tração \Rightarrow 8 MPa
- módulo de elasticidade \Rightarrow 74000 MPa
- coeficiente de Poisson \Rightarrow 0,23

Assim sendo, os materiais selecionados para o estudo apresentam a seguinte caracterização:

4.2.3.1 Brita calcária n° 0

Entende-se por agregado graúdo como sendo o pedregulho ou a brita proveniente de rochas estáveis, ou mistura de ambos, cujos grãos passam por uma peneira de malha quadrada com abertura nominal de 152 mm e ficam retidos na peneira ABNT 4,8 mm. Para um melhor entendimento, a Tabela 4.4 apresenta o conjunto de peneiras utilizadas para peneirar o agregado graúdo e classificá-lo.

Conseqüentemente, a composição granulométrica do agregado graúdo consiste na distribuição porcentual, em massa, das várias frações dimensionais deste agregado em relação à amostra total. Esta composição é expressa pela porcentagem individual ou acumulativa de material que passa ou fica retido nas peneiras da série normal ou intermediária.

A dimensão máxima característica do agregado graúdo é definido pela abertura da malha quadrada, em milímetros, de uma das peneiras listadas na Tabela 4.4, à qual corresponde uma porcentagem retida acumulada menor ou igual a 5% em massa. A dimensão máxima característica da brita 0 utilizada neste trabalho foi de 12,5 mm. Outra propriedade física do agregado graúdo é o seu módulo de finura. Ele é a soma das porcentagens retidas acumuladas em massa desse agregado, nas peneiras da série normal, dividida por 100. A brita 0 aqui utilizada apresentou módulo de finura igual a 5,98 conforme NBR 7211 - *Agregados para concreto* (ABNT, 1983).

Tabela 4.4 – Conjunto de peneiras conforme NBR NM-ISO 3310-1

Série Normal	Série Intermediária
ABNT 76 mm	-
-	ABNT 64 mm
-	ABNT 50 mm
ABNT 38 mm	-
-	ABNT 32 mm
-	ABNT 25 mm
ABNT 19 mm	-
-	ABNT 12,5 mm
ABNT 9,5 mm	-
-	ABNT 6,3 mm
ABNT 4,8 mm	-
ABNT 2,4 mm	-
ABNT 1,2 mm	-
ABNT 0,600 mm	-
ABNT 0,300 mm	-
ABNT 0,150 mm	-

O teor de argila em torrões e materiais friáveis consiste nas partículas presentes no agregado, as quais são suscetíveis de serem desfeitas pela pressão entre os dedos polegar e indicador. O valor para esta propriedade foi determinado pesando-se a amostra de brita 0 antes e depois de serem retirados os torrões de argila ou fragmentos friáveis. Desta maneira, esta brita 0 utilizada para as confecções dos concretos neste trabalho apresentou um teor de argila e materiais friáveis da ordem de 0,0% conforme NBR 7218 - *Agregados - Determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis - Método de ensaio* (ABNT, 1987).

O teor de material pulverulento para a brita 0 em questão foi obtido conforme NBR NM 46 - *Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 µm, por lavagem* (ABNT, 2003), na qual ele é retirado lavando-se a amostra de

agregado simplesmente, ou também com o emprego de um agente umectante dissolvido nesta água e exprimindo o peso do material retirado em porcentagem do peso da amostra. Tal valor obtido foi de 0,4%.

A massa unitária desse agregado graúdo é o quociente da massa do agregado lançado no recipiente paralelepípedo metálico pelo seu volume conforme NBR 7251 - *Agregado em estado solto - Determinação da massa unitária – Método de ensaio* (ABNT, 1982). Tal ensaio apresentou para a brita 0 utilizada neste trabalho uma massa unitária de 1,44 kg/dm³.

O valor da massa específica real da brita 0 foi obtido conforme prescreve a NBR NM 53 - *Agregado graúdo - Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água* (ABNT, 2003), a qual permite medir o volume total ocupado pelos grãos da amostra de agregado, cuja massa é previamente medida em estado seco e posteriormente saturada com superfície seca. Assim, para a brita 0 aqui analisada, a massa específica real obtida foi de 2,71 kg/dm³.

Por fim, as propriedades físicas da brita 0 relacionadas anteriormente estão resumidas e apresentadas na Tabela 4.5. A composição granulométrica deste mesmo material pode ser definida como a proporção relativa, expressa em %, dos diferentes tamanhos de grãos que se encontram constituídos no todo. A distribuição granulométrica tem uma enorme influência nas propriedades do concreto endurecido. Portanto, para esta brita 0 utilizada nesta dissertação de mestrado, a Tabela 4.6 apresenta a distribuição granulométrica da mesma.

4.2.3.2 Brita calcária nº 1

Apresentar-se-á as definições das propriedades físicas desse agregado graúdo, bem como seus respectivos valores obtidos no final deste tópico, em configuração de tabelas de uma forma sintética.

Tabela 4.5 – Propriedades físicas da brita 0 utilizada neste trabalho

Ensaio Realizado	Resultados	Limites
Massa específica (kg/dm ³)	2,71	----
Limite granulométrico do agregado graúdo	Graduação 0	----
Massa unitária (kg/dm ³)	1,44	----
Teor de argila (%)	0,0	< 3,0
Teor de material pulverulento (%)	0,4	< 1,0
Módulo de finura	5,98	----
Dimensão máxima do agregado (mm)	12,5	----

Tabela 4.6 – Granulometria da brita 0 utilizada neste trabalho

Ensaio de Granulometria			
Amostra: 3009 gramas de brita 0			
Peneira (mm)	Peso Retido (g)	Porcentagens Retidas (%)	
		Individuais	Acumuladas
19	0,0	0,00	0,00
12,5	0,0	0,00	0,00
9,5	300,6	9,99	9,99
6,3	1724,5	57,31	67,30
4,8	768,3	25,53	92,83
2,4	182,3	6,06	98,89
1,2	4,0	0,13	99,02
0,6	0,0	0,00	99,02
0,3	0,0	0,00	99,02
0,15	0,0	0,00	99,02
Fundo	29,3	0,97	100,00
Total	3009,0	100	598

Sabe-se que agregado graúdo é o pedregulho ou a brita proveniente de rochas estáveis, ou mistura de ambos, cujos grãos passam por uma peneira de malha quadrada com abertura nominal de 152 mm e ficam retidos na peneira ABNT 4,8 mm. Para um melhor entendimento, a Tabela 4.4 apresentou o conjunto de peneiras utilizadas para peneirar o agregado graúdo e classificá-lo.

Conseqüentemente, a composição granulométrica do agregado graúdo consiste na distribuição porcentual, em massa, das várias frações dimensionais deste agregado em relação à amostra total. Esta composição é expressa pela porcentagem individual ou acumulativa de material que passa ou fica retido nas peneiras da série normal ou intermediária.

A dimensão máxima característica do agregado graúdo é definido pela abertura da malha quadrada, em milímetros, de uma das peneiras listadas na Tabela 4.4, à qual corresponde uma porcentagem retida acumulada menor ou igual a 5% em massa. A dimensão máxima característica da brita 1 utilizada neste trabalho foi de 25 mm. Outra propriedade física do agregado graúdo é o seu módulo de finura. Ele é a soma das porcentagens retidas acumuladas em massa desse agregado, nas peneiras da série normal, dividida por 100. A brita 1 aqui utilizada apresentou módulo de finura igual a 7,05 conforme NBR 7211 - *Agregados para concreto* (ABNT, 1983).

O teor de argila em torrões e materiais friáveis consiste nas partículas presentes no agregado, as quais são suscetíveis de serem desfeitas pela pressão entre os dedos polegar e indicador. O valor para esta propriedade foi determinado pesando-se a amostra de brita 1 antes e depois de serem retirados os torrões de argila ou fragmentos friáveis. Desta maneira, esta brita 1 utilizada para as confecções dos concretos neste trabalho apresentou um teor de argila e materiais friáveis da ordem de 0,0% conforme NBR 7218 - *Agregados - Determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis - Método de ensaio* (ABNT, 1987).

O teor de material pulverulento para a brita 1 em questão foi obtido conforme NBR NM 46 - *Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 μm , por lavagem* (ABNT, 2003), na qual ele é retirado lavando-se a amostra de agregado simplesmente, ou também com o emprego de um agente umectante dissolvido nesta água e exprimindo o peso do material retirado em porcentagem do peso da amostra. Tal valor obtido foi de 0,5%.

A massa unitária desse agregado graúdo é o quociente da massa do agregado lançado no recipiente paralelepípedo metálico pelo seu volume conforme NBR 7251 - *Agregado em estado solto - Determinação da massa unitária – Método de ensaio* (ABNT, 1982). Tal ensaio apresentou para a brita 1 utilizada neste trabalho uma massa unitária de 1,47 kg/dm³.

O valor da massa específica real da brita 1 foi obtido conforme prescreve a NBR NM 53 - *Agregado graúdo - Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água* (ABNT, 2003), a qual permite medir o volume total ocupado pelos grãos da amostra de agregado, cuja massa é previamente medida em estado seco e posteriormente saturada com superfície seca. Assim, para a brita 1 aqui analisada, a massa específica real obtida foi de 2,70 kg/dm³.

Por fim, as propriedades físicas da brita 1 relacionadas anteriormente estão resumidas e apresentadas na Tabela 4.7. A composição granulométrica deste mesmo material pode ser definida como a proporção relativa, expressa em %, dos diferentes tamanhos de grãos que se encontram constituídos no todo. A distribuição granulométrica tem uma enorme influência nas propriedades do concreto endurecido. Portanto, para esta brita 1 utilizada nesta dissertação de mestrado, a Tabela 4.8 apresenta a distribuição granulométrica da mesma.

Tabela 4.7 – Propriedades físicas da brita 1 utilizada neste trabalho

Ensaio Realizados	Resultados	Limites
Massa específica (kg/dm ³)	2,70	----
Limite granulométrico do agregado graúdo	Graduação 1	----
Massa unitária (kg/dm ³)	1,47	----
Teor de argila (%)	0,0	< 3,0
Teor de material pulverulento (%)	0,5	< 1,0
Módulo de finura	7,05	----
Dimensão máxima do agregado (mm)	25	----

Tabela 4.8 – Granulometria da brita 1 utilizada neste trabalho

Ensaio de Granulometria			
Amostra: 5000 gramas de brita 1			
Peneira (mm)	Peso Retido (g)	Porcentagens Retidas (%)	
		Individuais	Acumuladas
25	94	1,88	1,88
19	966	19,32	21,20
12,5	1802	36,04	57,24
9,5	1749	34,98	92,22
6,3	321	6,42	98,64
4,8	0	0,00	98,64
2,4	0	0,00	98,64
1,2	0	0,00	98,64
0,6	0	0,00	98,64
0,3	0	0,00	98,64
0,15	0	0,00	98,64
Fundo	68	1,36	100,00
Total	5000	100	----

4.2.4 Agregado miúdo

Há cerca de 25 anos atrás, a maioria dos concretos no Brasil eram confeccionados com a utilização de agregados miúdos naturais como as areias de cava ou de rio. Com o passar dos tempos e a busca de novas tecnologias de produção de concretos, principalmente no que diz respeito à qualidade dos materiais e o surgimento também de novos materiais.

A indústria de extração de rochas percebeu que existia em suas instalações um grande passivo de material fino, de granulometria abaixo da peneira ABNT 4,8 mm. Diante deste problema, esta indústria lançou no mercado os chamados agregados miúdos artificiais como as areias artificiais.

O agregado miúdo natural utilizado neste trabalho é proveniente de depósito sedimentar que se formou no leito do rio, cuja extração se faz por meio de dragas de sucção, que bombeiam a água, contendo cerca de 5% a 10% de areia, para lagos de decantação, de onde o material é retirado. No entanto, a areia natural média lavada para este trabalho foi fornecida por uma empresa da cidade de São Gonçalo do Pará no estado das Minas Gerais. Apresentar-se-á as definições das propriedades físicas desse agregado miúdo, bem como seus respectivos valores obtidos no final deste tópico, em configuração de tabelas de uma forma sintética.

Entende-se por agregado miúdo como sendo areia de origem natural ou resultante do britamento de rochas estáveis, ou mistura de ambas, cujos grãos passam pela peneira ABNT 4,8 mm e ficam retidos na peneira ABNT 0,075 mm. Para um melhor entendimento, a Tabela 4.4 apresentou o conjunto de peneiras utilizadas para peneirar o agregado miúdo e classificá-lo. Conseqüentemente, a composição granulométrica do agregado miúdo consiste na distribuição porcentual, em massa, das varias frações dimensionais deste agregado em relação à amostra total. Esta composição é expressa pela porcentagem individual ou acumulativa de material que passa ou fica retido nas peneiras da série normal ou intermediária.

A dimensão máxima característica do agregado miúdo é definido pela abertura da malha quadrada, em milímetros, de uma das peneiras listadas na Tabela 4.4, à qual corresponde uma porcentagem retida acumulada menor ou igual a 5% em massa. A dimensão máxima característica do agregado miúdo utilizado neste trabalho foi de 4,8 mm. Outra propriedade física do agregado miúdo é o seu módulo de finura. Ele é a soma das porcentagens retidas acumuladas em massa do agregado, nas peneiras da série normal, dividida por 100. O agregado miúdo aqui utilizado apresentou módulo de finura igual a 2,95 conforme NBR 7211 - *Agregados para concreto* (ABNT, 1983).

O teor de argila em torrões e materiais friáveis consiste nas partículas presentes no agregado, as quais são suscetíveis de serem desfeitas pela pressão entre os dedos polegar e indicador. O valor para esta propriedade foi determinado pesando-se a amostra de areia antes e depois de serem retirados os torrões de argila ou fragmentos friáveis. Desta maneira, o agregado miúdo utilizado para as confecções dos concretos neste trabalho apresentou um teor de argila e materiais friáveis da ordem de 0,5% conforme NBR 7218 - *Agregados - Determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis - Método de ensaio* (ABNT, 1987).

O teor de material pulverulento para o agregado miúdo em questão foi obtido conforme NBR NM 46 - *Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 μm , por lavagem* (ABNT, 2003), na qual ele é retirado lavando-se a amostra de agregado simplesmente, ou também com o emprego de um agente umectante dissolvido nesta água e exprimindo o peso do material retirado em porcentagem do peso da amostra. Tal valor obtido foi de 2,6%.

A massa unitária do agregado miúdo é o quociente da massa do agregado lançado no recipiente paralelepípedo metálico pelo seu volume conforme NBR 7251 - *Agregado em estado solto - Determinação da massa unitária – Método de ensaio* (ABNT, 1982). O agregado miúdo utilizado neste trabalho obteve uma massa unitária de 1,32 kg/m³.

A massa específica real do agregado miúdo é obtida através do auxílio do frasco de Chapman conforme NBR NM 52 - *Agregado miúdo - Determinação de massa específica e de massa específica aparente* (ABNT, 2003), o qual permite medir o volume total ocupado pelos grãos da amostra de agregado, cuja massa é previamente medida em estado seco. Assim, para a areia aqui analisada, a massa específica real obtida foi de 2,61 kg/dm³.

O conhecimento do teor de umidade do agregado miúdo é de grande importância, uma vez que eles são entregues em obra sempre úmidos, isto obriga a correção da quantidade de água que deverá ser empregada na confecção dos concretos, levando em conta os reajustes nas quantidades do material, quer medidos em peso ou em volume. O teor de umidade apresentado pela areia aqui ensaiada para determinar as suas propriedades físicas foi de 4,1%.

A areia foi ensaiada conforme NBR NM 30 - *Agregado miúdo - Determinação da absorção de água* (ABNT, 2000) para determinar a sua porcentagem de absorção de água. Tal ensaio é definido pelo processo pelo qual um líquido é conduzido e tende a ocupar os poros permeáveis de um corpo sólido poroso até atingir o estado de saturação com superfície seca. Portanto, para a amostra aqui ensaiada, o valor da absorção de água foi de 0,03%.

Por fim, as propriedades físicas do agregado miúdo relacionadas anteriormente estão resumidas e apresentadas na Tabela 4.9. A composição granulométrica deste mesmo material pode ser definida como a proporção relativa, expressa em %, dos diferentes tamanhos de grãos que se encontram constituídos no todo. A distribuição granulométrica tem uma enorme influência nas propriedades do concreto endurecido. Portanto, para esta areia média utilizada nesta dissertação de mestrado, a Tabela 4.10 apresenta a distribuição granulométrica da mesma.

Tabela 4.9 – Propriedades físicas da areia utilizada neste trabalho

Ensaio Realizado	Resultados	Limites
Massa específica real (kg/dm ³)	2,61	----
Absorção (%)	0,03	< 0,05
Massa unitária (kg/dm ³)	1,32	----
Teor de argila (%)	0,50	< 1,50
Teor de material pulverulento (%)	2,60	< 5,00
Módulo de finura	2,95	----
Dimensão máxima do agregado (mm)	4,80	----
Teor de umidade (%)	4,10	----
Limite granulométrico do agregado miúdo	Zona 3 (média)	

Tabela 4.10 – Granulometria da areia utilizada neste trabalho

Ensaio de Granulometria			
Amostra: 500 gramas de areia			
Peneira (mm)	Peso Retido (g)	Porcentagens Retidas (%)	
		Individuais	Acumuladas
9,5	0	0	0
6,3	0	0	0
4,8	13,2	2,64	2,64
2,4	74,5	14,90	17,54
1,2	93,2	18,64	36,18
0,6	124,7	24,94	61,12
0,3	93,6	18,72	79,84
0,15	87,2	17,44	97,28
Fundo	13,6	2,72	----
Total	500	100	294,6

4.2.5 Adição Mineral - Pó de Pedra

É aconselhável a utilização de pó de pedra na confecção de concretos, uma vez que esta adição mineral proporciona ganhos de resistência à compressão, diminuição na permeabilidade e na capilaridade em conformidade com a trabalhabilidade do mesmo. Existem casos em que foram adicionadas quantidades de pó de pedra quase iguais às quantidades do cimento empregado. Desta maneira, as limitações para o pó de pedra não são severas como para a argila. Logo, o maior inconveniente das partículas muito finas é em relação à diminuição da resistência ao desgaste por abrasão. Entretanto, os agregados que possuírem uma quantidade de argila ou pó superiores aos limites indicados deverão ser lavados, ou se preferir, serem submetidos a ensaios previamente para estudar o seu comportamento no concreto.

A norma NBR 12655 - *Concreto - Preparo, controle e recebimento* (ABNT, 1996) define adição mineral como todos os sólidos minerais, em estado seco na forma pulverulenta, inertes ou ativos. A partir desta definição, a adição mineral utilizada neste trabalho resulta de processos industriais de britagem e foi adquirido junto ao fornecedor da cidade de Pedro Leopoldo nas Minas Gerais. Apresentar-se-á as definições das propriedades físicas desse pó de pedra, bem como seus respectivos valores obtidos no final deste tópico, em configuração de tabelas de uma forma sintética.

Sabe-se que o pó de pedra é um material de origem artificial resultante do britamento de rochas estáveis, ou mistura de ambas, cujos grãos passam pela peneira ABNT 4,8 mm e ficam retidos na peneira ABNT 0,075 mm. Para um melhor entendimento, a Tabela 4.4 apresentou o conjunto de peneiras utilizadas para peneirar essa adição mineral e classificá-la. Conseqüentemente, a composição granulométrica desta adição consiste na distribuição porcentual, em massa, das varias frações dimensionais deste material em relação à amostra total.

Esta composição é expressa pela porcentagem individual ou acumulativa de material que passa ou fica retido nas peneiras da série normal ou intermediária.

A dimensão máxima característica do pó de pedra é definido pela abertura da malha quadrada, em milímetros, de uma das peneiras listadas na Tabela 4.4, à qual corresponde uma porcentagem retida acumulada menor ou igual a 5% em massa. A dimensão máxima característica do pó de pedra utilizado neste trabalho foi de 4,8 mm. Outra propriedade física desta adição mineral é o seu módulo de finura. Ele é a soma das porcentagens retidas acumuladas em massa do material, nas peneiras da série normal, dividida por 100. O pó de pedra aqui utilizado apresentou módulo de finura igual a 1,83 conforme NBR 7211 - *Agregados para concreto* (ABNT, 1983).

O teor de argila em torrões e materiais friáveis consiste nas partículas presentes no material, as quais são suscetíveis de serem desfeitas pela pressão entre os dedos polegar e indicador. O valor para esta propriedade foi determinado pesando-se a amostra de pó de pedra antes e depois de serem retirados os torrões de argila ou fragmentos friáveis. Desta maneira, este pó de pedra utilizado para as confecções dos concretos neste trabalho apresentou um teor de argila e materiais friáveis da ordem de 0,0% conforme NBR 7218 - *Agregados - Determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis - Método de ensaio* (ABNT, 1987).

O teor de material pulverulento para o pó de pedra em questão foi obtido conforme NBR NM 46 - *Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 μ m, por lavagem* (ABNT, 2003), na qual ele é retirado lavando-se a amostra de material simplesmente, ou também com o emprego de um agente umectante dissolvido nesta água e exprimindo o peso do material retirado em porcentagem do peso da amostra. Tal valor obtido foi de 38,4% valor este bem superior ao limite de 5% e que não afetou as características e propriedades do concreto.

A massa unitária do pó de pedra é o quociente da massa deste lançado no recipiente paralelepípedo metálico pelo seu volume conforme NBR 7251 - *Agregado em estado solto - Determinação da massa unitária – Método de ensaio* (ABNT, 1982). O pó de pedra aqui utilizado obteve uma massa unitária de 1,29 kg/dm³.

A massa específica real do pó de pedra é obtida através do auxílio do frasco de Chapman conforme NBR NM 52 - *Agregado miúdo - Determinação de massa específica e de massa específica aparente* (ABNT, 2003), o qual permite medir o volume total ocupado pelos grãos da amostra deste material, cuja massa é previamente medida em estado seco. Assim, para o pó de pedra aqui analisado, a massa específica real obtida foi de 2,72 kg/dm³.

O conhecimento do teor de umidade da adição mineral é de grande importância, uma vez que este material é entregue nas obras sempre úmido, isto obriga a correção da quantidade de água que deverá ser empregada na confecção dos concretos, levando em conta os reajustes nas quantidades do material, quer medidos em peso ou em volume. O teor de umidade apresentado pelo pó de pedra, aqui ensaiado, para determinar as suas propriedades físicas foi de 3,1%.

O pó de pedra foi ensaiado conforme NBR NM 30 - *Agregado miúdo - Determinação da absorção de água* (ABNT, 2000) para determinar a sua porcentagem de absorção de água. Tal ensaio é definido pelo processo pelo qual um líquido é conduzido e tende a ocupar os poros permeáveis de um corpo sólido poroso até atingir o estado de saturação com superfície seca. Portanto, para a amostra aqui ensaiada, o valor da absorção de água foi de 0,02%.

Por fim, as propriedades físicas do pó de pedra relacionadas anteriormente estão resumidas e apresentadas na Tabela 4.11. A composição granulométrica deste mesmo material pode ser definida como a proporção relativa, expressa em %, dos

diferentes tamanhos de grãos que se encontram constituídos no todo. A distribuição granulométrica tem uma enorme influência nas propriedades do concreto endurecido. Portanto, para este pó de pedra utilizado nesta dissertação de mestrado, a Tabela 4.12 apresenta a distribuição granulométrica do mesmo.

Tabela 4.11 – Propriedades físicas do pó de pedra utilizado neste trabalho

Ensaio Realizado	Resultados	Limites
Massa específica real (kg/dm ³)	2,72	----
Absorção (%)	0,02	< 0,05
Massa unitária (kg/dm ³)	1,29	----
Teor de argila (%)	0,0	< 1,5
Teor de material pulverulento (%)	38,4	< 5,0
Módulo de finura	1,83	----
Dimensão máxima do agregado (mm)	4,80	----
Teor de umidade (%)	3,10	----

Tabela 4.12 – Granulometria do pó de pedra utilizado neste trabalho

Ensaio de Granulometria			
Amostra: 500 gramas de pó de pedra			
Peneira (mm)	Peso Retido (g)	Porcentagens Retidas (%)	
		Individuais	Acumuladas
9,5	0	0	0
6,3	0	0	0
4,8	10	2,0	2,0
2,4	84	16,8	19,0
1,2	60	12,0	31,0
0,6	43	8,6	39,0
0,3	25	5,0	44,0
0,15	18	3,6	48,0
Fundo	260	52,0	100,0
Total	500	100	183

4.2.6 Aditivo Mastermix 390 N

O aditivo utilizado na confecção dos traços de concretos para esta pesquisa foi um aditivo plastificante. Este aditivo é líquido, pronto para o uso, plastificante e redutor de água de amassamento. Também é isento de cloretos e atende aos requisitos de desempenho da norma EB 1763 (Tipo P).

Sua ficha técnica é a seguinte:

- Função Principal: Plastificante Multidosagem Polifuncional
- Base Química: Lignosulfonatos
- Aspecto: Líquido
- Cor: Castanho Escuro
- Densidade: 1,16 a 1,20 g/cm³
- pH: 7 a 9
- Sólidos: 34 a 38%

Sua aplicabilidade é bastante ampla, podendo ser utilizado em concretos convencionais e bombeados dosados em centrais, concretos para pavimentos, concretos aparentes, concretos protendidos, concretos confeccionados em obra e concretos pré-moldados. Este aditivo imprime aos mesmos, um maior tempo de trabalhabilidade, mas este tempo é função da temperatura, dos tipos de cimentos e agregados utilizados, do transporte realizado, do consumo de cimento e da própria quantidade dosada deste aditivo. Em dosagens elevadas de aditivo, este proporciona um concreto mais plástico com a mesma relação água/cimento.

Os benefícios e as propriedades que os concretos, tanto no estado fresco quanto endurecido, adquirem com a utilização deste aditivo são relacionadas abaixo:

- Facilidade no bombeamento de concretos bombeáveis;
- Melhora a trabalhabilidade e conseqüentemente aumenta o Slump;
- Redução da quantidade de água de amassamento;

- Melhora a coesão e homogeneidade da massa;
- Melhora o rendimento do cimento devido ao efeito dispersante;
- Promove um melhor adensamento;
- Reduz a permeabilidade do concreto;
- Aumenta a durabilidade do concreto;
- Diminui a retração e fissuramento do concreto nas primeiras idades;
- Ganho significativo das resistências finais dos concretos.

A sua utilização nos traços de concreto deve ser sempre feita em conjunto com a água de amassamento e nunca adicionado aos materiais secos do concreto como os agregados e cimentos. As dosagens possíveis variam de 0,2 a 1 litro de aditivo para cada 100 kg de cimento. Este aditivo proporciona uma redução da água de amassamento da ordem de 8 a 15% em uma comparação de concretos sem este aditivo. Tal redução também dependerá da quantidade utilizada, tipo de cimento e traço desenvolvido. Para se atingir a performance total deste produto, recomenda-se a execução de testes preliminares. Entretanto, se este aditivo for utilizado juntamente com outros aditivos, deve-se, dissolvê-los em água separadamente e adicioná-los à mistura um de cada vez. O tempo de pega do concreto pode ser influenciado pela temperatura e umidade ambientes, bem como o aumento do teor de dosagem deste produto.

Este aditivo plastificante polifuncional pode ser adquirido a granel, tambores de 200 litros com 236 kg de produto ou em bombonas de 30 kg. O tempo de validade é de 9 meses a partir da data de fabricação e das condições do armazenamento, que deve ser feito em locais isentos de poeira, cobertos, secos, ventilados, longe das intempéries, fontes de calor, evitando o contato com ácidos e oxidantes. Ao manusear este aditivo deve-se estar utilizando os devidos equipamentos de proteção individual como óculos, luvas e botas impermeáveis. Evite o contato com a pele e olhos, evite também fumar próximo a este produto. Finalmente, este

produto é classificado como não tóxico, não inflamável, não corrosivo, porém impróprio para o consumo humano.

4.2.7 Água de amassamento

Para a confecção dos concretos neste trabalho foram utilizados dois tipos de água necessárias ao amassamento da mistura. Primeiramente utilizou-se no traço de referência água retirada diretamente da torneira, água esta que é fornecida pela companhia de abastecimento de água do estado de Minas Gerais. Posteriormente, esta mesma água foi submetida ao processo de magnetização e utilizada.

A companhia de abastecimento de água do estado de Minas Gerais realiza anualmente diversas análises da qualidade da água fornecida. Esses testes são realizados para quatro aspectos. O primeiro é quanto ao aspecto físico, no qual se verifica a presença de cor, cheiro e sabor da água, além da sua turbidez, devido a resíduos não eliminados. O segundo aspecto é o químico, no qual se verifica a presença de materiais orgânicos ou inorgânicos que podem afetar a saúde da população. O terceiro aspecto analisado é o bacteriológico, no qual se pesquisa a presença de coliformes e outros indícios de microorganismos causadores de doenças. Por fim, o aspecto hidrobiológico verifica a presença de microorganismos (vegetais e animais) que prejudiquem o tratamento da água ou que possam liberar substâncias tóxicas. Assim, os parâmetros medidos para avaliação da qualidade da água envolvem a turbidez, cor, pH, cloro, flúor, coliforme total e *Escherichia coli*. A turbidez envolve alterações no aspecto estético da água, causado pela presença de partículas sólidas em suspensão, oriundas do contato com o solo e rochas, ou ainda aquelas provenientes de rejeitos domésticos e industriais. Quanto à cor, observam-se alterações na coloração da água, causadas pelo seu contato com resíduos de origem orgânica, como folhas e fragmentos de madeira, ou substâncias metálicas, como ferro e manganês. O pH exprime a qualidade ácida, básica ou neutra com que a água pode se apresentar. Estas características,

por sua vez, estão relacionadas com a capacidade de a mesma se apresentar incrustante ou corrosiva dos materiais dos diversos equipamentos com os quais ela entra em contato, como redes de distribuição e reservatórios, possuindo ainda uma relação direta com a eficiência da desinfecção através do cloro. Já o cloro é um produto químico utilizado para eliminar microorganismos que não foram removidos ou eliminados nas etapas anteriores do tratamento da água. A presença residual do cloro na água tratada final funciona como uma segurança adicional, contra eventuais contaminações durante o processo de distribuição. Ao se adicionar flúor à água final tratada, objetiva-se a colaboração na prevenção de cárie dental, contribuindo para a melhoria da saúde bucal da população. Finalmente, os indicadores microbiológicos de coliformes totais e *Escherichia coli* visam, respectivamente, a eliminação dos microorganismos e matéria fecal que possam causar doenças ao ser humano.

A água utilizada no concreto de referência, retirada diretamente da torneira, apresentou os seguintes parâmetros físico-químicos, como se observa na Tabela 4.13.

Já a água submetida ao processo de magnetização através dos protótipos apresentados na Figura 4.1 apresentou os seguintes parâmetros físico-químicos conforme se observa na Tabela 4.14. A Figura 4.2 apresenta o esquema de montagem do protótipo de indução magnética apresentado na Figura 4.1.

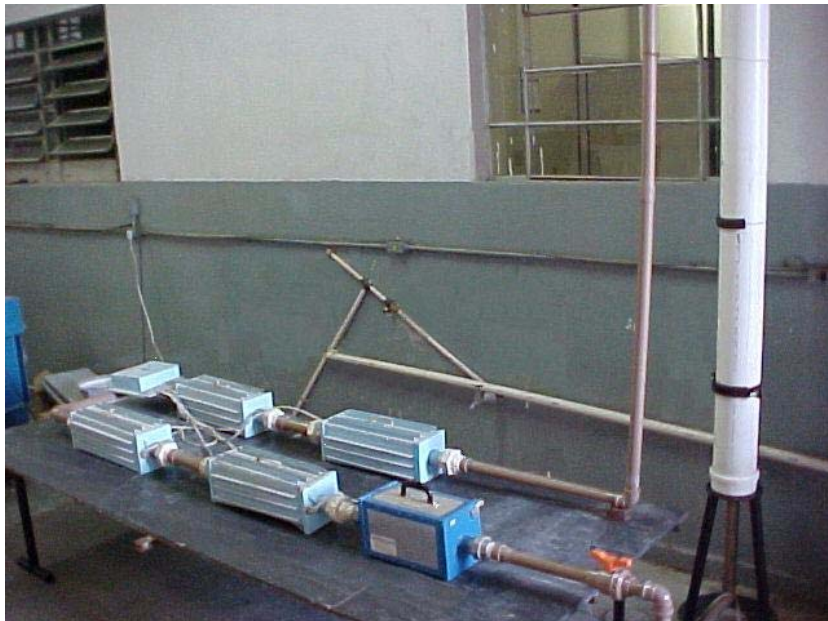
Tabela 4.13 – Parâmetros físico-químicos da água de torneira para confecção de concretos

Item Analisado	Resultados da Água	
	Água de Torneira	Referência Padrão NM 137/1997
pH	8,1	5,5 – 9,0
Condutividade elétrica (μ mhos/cm)	109	-
Turbidez (NTU)	<1	-
Cloretos [Cl ⁻] (mg/L)	10,3	< 2000* < 700** < 500***
Oxigênio Consumido (mg/L)	<1	-
Acidez Carbônica (mg/L)	2,4	-
Alcalinidade bicarbonatos em CaCO ₃ (mg/L)	29	-
Dureza total CaCO ₃ (mg/L)	46	-
Cálcio (mg/L)	14,5	-
Magnésio (mg/L)	2,4	-
Sulfatos [SO ₄] ²⁻ (mg/L)	6	< 2000

* Valor máximo para concreto simples; ** Valor máximo para concreto armado; *** Valor máximo para concreto protendido



(a)



(b)

Figura 4.1 – Protótipos de Indução magnética. (a) Montagem realizada na central de concreto; (b) Montagem efetuada no laboratório do DEMC da Escola de Engenharia – UFMG

Tabela 4.14 – Parâmetros físico-químicos da água magnetizada para confecção de concretos

Item Analisado	Resultados da Água	
	Água Magnetizada	Referência Padrão NM 137/1997
pH	8,0	5,5 – 9,0
Condutividade elétrica ($\mu\text{mhos/cm}$)	129	-
Turbidez (NTU)	22	-
Cloretos $[\text{Cl}^-]$ (mg/L)	7,4	< 2000* < 700** < 500***
Oxigênio Consumido (mg/L)	1,0	-
Acidez Carbônica (mg/L)	3,1	-
Alcalinidade bicarbonatos em CaCO_3 (mg/L)	37	-
Dureza total CaCO_3 (mg/L)	57	-
Cálcio (mg/L)	15,7	-
Magnésio (mg/L)	4,4	-
Sulfatos $[\text{SO}_4]^{2-}$ (mg/L)	15	< 2000

* Valor máximo para concreto simples; ** Valor máximo para concreto armado; *** Valor máximo para concreto protendido

A água magnetizada é aquela coletada diretamente da torneira e acondicionada em um reservatório, sendo posteriormente submetida a um campo magnético de 0,8 Tesla, por um período de 6 horas, através da passagem por quatro células de indução, a uma vazão de bombeamento em torno de 2940 litros/h. Tal processo de indução magnética da água pode ser observado nas Figuras 4.1 e 4.2.

Vale a pena ressaltar que, a escolha pela adoção do tempo de 6 horas para realizar a imantação da água, foi definida a partir de análise da tensão superficial da mesma em diversos períodos, e que foi realizada através do equipamento tensiômetro digital, modelo k10st e fabricado pela KRUSS (vide Figura 4.3). Como resultado deste estudo observou-se que a tensão superficial da água normal (obtida diretamente da torneira) apresenta um valor médio de 72,0 dina/cm. Já a mesma água contendo aditivo tensoativo (Mastermix 390 N), proporcionado na razão de 0,6% em peso de cimento, foi de 56,1 dina/cm. Por outro lado, os valores das tensões superficiais da água normal submetida ao processo de magnetização por 4 (quatro) diferentes tempos (2, 4, 6 e 8 horas) são apresentadas na Tabela 4.15. Em função da citada tabela, é notório se observar que não há mudança significativa da tensão superficial da água imantada a partir do tempo de imantação de 6 horas, e por esta razão a opção de trabalho recaiu sobre este período.

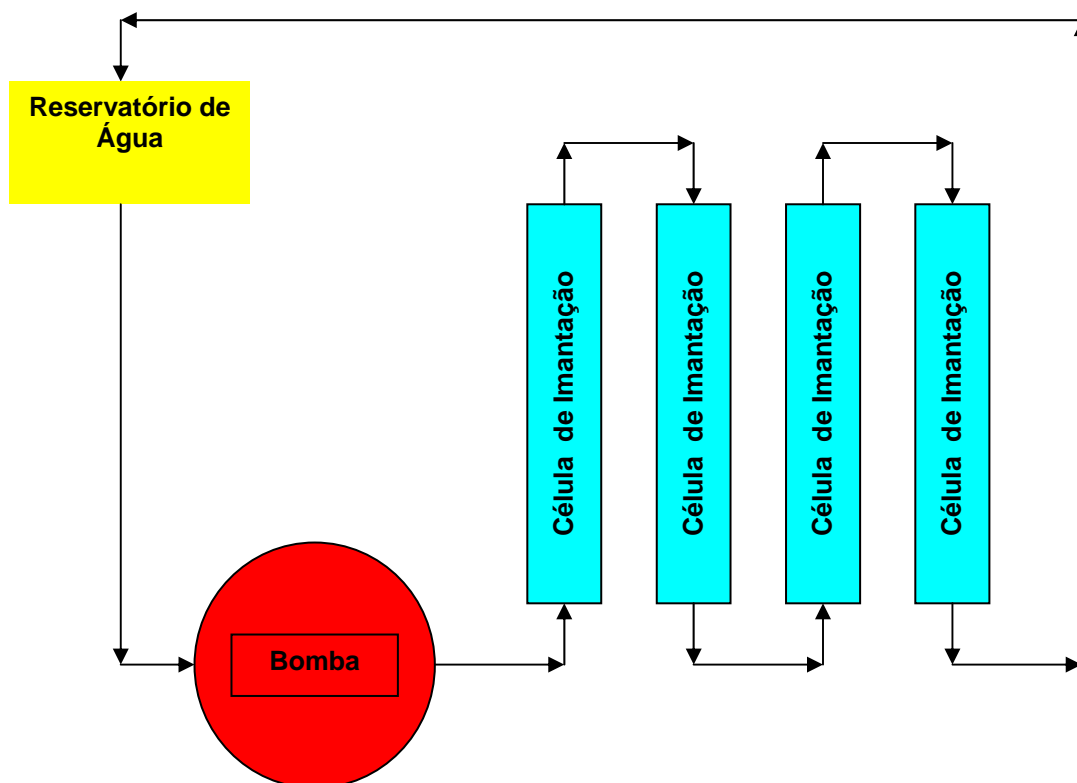


Figura 4.2 – Esquema de montagem do equipamento de indução magnética

Tabela 4.15 – Tensão superficial da água normal e com aditivo tensoativos em função do tempo de magnetização em dois esquemas de montagem

(a) Montagem na central de concreto

Tipo de água	Tempo de Imantação da água normal de torneira (horas)	Tensão Superficial (dina/cm)
Sem aditivo tensoativo	2	72,5
	4	70,7
	6	65,1
	8	64,2
Com aditivo tensoativo	2	54,0
	4	52,1
	6	49,1
	8	48,2

(b) Montagem no Laboratório UFMG

Tipo de água	Tempo de Imantação da água normal de torneira (horas)	Tensão Superficial (dina/cm)
Sem aditivo tensoativo	2	70,8
	4	67,7
	6	62,8
	8	62,2
Com aditivo tensoativo	2	53,4
	4	50,8
	6	46,5
	8	46,1

É fácil observar que os resultados da tensão superficial obtidos na montagem realizada na UFMG são inferiores àqueles obtidos na central de dosagem, motivados pelo fato de que os testes realizados na água coletada no campo só

foram realizados aproximadamente 6 horas após a sua coleta, fato que, com certeza, não interferiu na manutenção do benefício proporcionado pela magnetização da água originária da concessionária.



Figura 4.3 – Tensiômetro digital k10st fabricado pela KRUSS

4.3 Métodos

4.3.1 Introdução

Após a caracterização dos materiais empregados na confecção dos concretos; dando seqüência e conformidade aos objetivos desta pesquisa, este tópico apresenta o detalhamento do planejamento de todo o programa experimental desenvolvido. Os métodos e ensaios aqui empregados seguiram minuciosamente as recomendações das normas brasileiras e estrangeiras.

A pesquisa desenvolvida neste trabalho foi dividida em duas etapas. A primeira etapa consistiu na determinação das propriedades no estado fresco dos concretos

confeccionados com e sem água magnetizada, em especial a consistência pelo abatimento do tronco de cone. Na segunda etapa determinaram-se as propriedades mecânicas dos concretos endurecidos confeccionados com e sem água magnetizada, especificamente as resistências à compressão e à tração, módulo de elasticidade dinâmico e absorção, a fim de avaliar a redução do consumo de cimento com utilização da água magnetizada.

Deve-se salientar que os concretos confeccionados sem água magnetizada são tidos como concreto referência (padrão), alicerce de todo o estudo desta pesquisa.

4.3.2 Proporcionalamento e misturas

Primeiramente foram definidos os traços, mais utilizados, de concretos que seriam objetos de estudo desta pesquisa, fornecidos pela central de concreto. Os traços foram divididos em concretos convencionais, que apresentam como característica principal *Slump Test* (5 ± 1) cm, e concretos bombeados, que apresentam como característica principal *Slump Test* (9 ± 1). A Tabela 4.16 evidencia os materiais, como aglomerante, agregados graúdos e miúdos, aditivo e água, empregados nos traços de concreto convencional e a Tabela 4.17 apresenta também estes mesmos materiais utilizados nos traços de concreto bombeado.

Tanto para os traços de concreto Convencional quanto para os traços de concreto Bombeado será adotado os seguintes termos Água Normal e Água Magnetizada. Água Normal será definida como sendo a água fornecida pela companhia de abastecimento de água da cidade de Belo Horizonte coletada diretamente de uma torneira. Já a Água Magnetizada será esta mesma Água Normal coletada e acondicionada em um reservatório, a qual foi submetida ao processo de indução magnética (Figuras 4.1 e 4.2) por um período de 6 horas para posteriormente ser utilizada na confecção dos concretos.

Tabela 4.16 – Proporção dos materiais empregados nos traços de concreto convencional (*consumo de materiais para por m³ de concreto produzido*)

Materiais	Traços de Concreto Convencional					
	1	2	3	4	5	6
Resistência Característica (MPa)	10	15	18	20	25	30
Cimento (kg)	167	218	238	250	279	338
Agregado Graúdo (kg)						
Brita 0	276	277	277	278	278	279
Brita 1	826	829	831	832	834	837
Agregado Miúdo (kg)	579	549	536	528	512	476
Adição Mineral (kg)	311	295	289	285	275	257
Aditivo (ml)	1002	1308	1428	1500	1674	2028
Água de Amassamento (litros)	170	170	170	170	170	170
Fator a/c	1,018	0,780	0,714	0,680	0,609	0,503
Slump (cm)	5 ± 1	5 ± 1	5 ± 1	5 ± 1	5 ± 1	5 ± 1

Tabela 4.17 – Proporção dos materiais empregados nos traços de concreto bombeado (*consumo de materiais para por m³ de concreto produzido*)

Materiais	Traços de Concreto Bombeado					
	7	8	9	10	11	12
Resistência Característica (MPa)	10	15	18	20	25	30
Cimento (kg)	178	233	255	267	299	362
Agregado Graúdo (kg)						
Brita 0	153	153	154	154	154	155
Brita 1	866	870	871	873	875	876
Agregado Miúdo (kg)	603	570	556	549	530	494
Adição Mineral (kg)	324	307	300	295	285	266
Aditivo (ml)	1068	1398	1530	1602	1794	2172
Água de Amassamento (litros)	182	182	182	182	182	182
Fator a/c	1,022	0,781	0,714	0,682	0,609	0,503
Slump (cm)	9 ± 1	9 ± 1	9 ± 1	9 ± 1	9 ± 1	9 ± 1

Como a água magnetizada submetida a esse processo apresentava-se com temperatura superior à água normal, sem magnetização, foram determinados os valores destas temperaturas para possíveis observações futuras. Os valores destas temperaturas serão apresentados no item 4.3.3 deste trabalho.

A partir deste contexto, para cada uma das 6 diferentes composições de concreto convencional (10, 15, 18, 20, 25 e 30 MPa), procedeu-se à variação do tipo de água utilizado, tal como mostrado a seguir:

- Concretos convencionais de 10, 15, 18, 20, 25 e 30 MPa:
 - ✓ **Traço A:** Padrão central de concreto com água normal.
 - ✓ **Traço B:** Mesmo traço A, porém substituindo a água normal por água magnetizada.
 - ✓ **Traço C:** Manter o mesmo *slump* do traço A reduzindo (controlando a adição) a água magnetizada.
 - ✓ **Traço D:** Reduzir cimento mantendo o mesmo fator a/c do traço A e quantidade de água magnetizada reduzida do traço C.

Analogamente, para cada uma das 6 diferentes composições de concreto bombeado (10, 15, 18, 20, 25 e 30 MPa), também se procedeu à variação do tipo de água utilizada, a saber:

- Concretos bombeados de 10, 15, 18, 20, 25 e 30 MPa:
 - ✓ **Traço A:** Padrão central de concreto com água normal.
 - ✓ **Traço B:** Mesmo traço A, porém substituindo a água normal por água magnetizada.

- ✓ **Traço C:** Manter o mesmo *slump* do traço A reduzindo (controlando a adição) a água magnetizada.
- ✓ **Traço D:** Reduzir cimento mantendo o mesmo fator a/c do traço A e quantidade de água magnetizada reduzida do traço C.

Para um melhor entendimento dos *Traços A, B, C e D* têm-se:

- **Traço A:** Traços padrões da central de concreto produzidos com água normal, os quais estão identificados nas Tabelas 4.15 e 4.16, como 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 e 12, e que foram dosados para uma escala laboratorial de volume 50 litros.
- **Traço B:** Mesmo *traço A*, porém substituindo o volume de água normal pelo mesmo volume de água magnetizada.
- **Traço C:** Manter o mesmo *slump* do *traço A*, reduzindo (controlando a adição) o volume de água magnetizada, até se obter a igualdade do valor do abatimento do troco de cone.
- **Traço D:** Reduzir cimento mantendo o mesmo fator a/c do *traço A* e quantidade de água magnetizada reduzida do *traço C* através da seguinte fórmula:

$$a/c = \frac{C}{X} \quad (4.1)$$

onde:

a/c = Fator água/cimento;

C = Volume de água reduzido no *Traço C*;

X = Nova massa de cimento a ser utilizada no *Traço D*.

Posteriormente à definição dos traços de concreto que seriam utilizados neste trabalho, os materiais utilizados para a confecção dos mesmos foram adicionados

a uma betoneira com capacidade de 320 litros. O volume de concreto utilizado em cada traço desenvolvido (*Traço A, Traço B, Traço C e Traço D*), para sua respectiva resistência característica, foi de 50 litros. Os materiais foram submetidos a um rigoroso processo de pesagem, a fim de converter o proporcionamento dos mesmos do volume de 1 m³ para o volume de 0,050 m³. Desta forma, a ordem de adição dos materiais á betoneira bem como os seus respectivos tempos de mistura são apresentados na Tabela 4.18.

4.3.3 Ensaio Realizados

As temperaturas das águas de amassamento utilizadas na confecção dos concretos convencionais estão apresentadas na Tabela 4.19, enquanto que, na Tabela 4.20 podem ser observadas as temperaturas das águas de amassamento utilizadas na confecção dos concretos bombeados. Estas temperaturas foram obtidas com o auxílio de um termômetro digital.

Após a mistura dos concretos, foram realizados nos mesmos os testes de consistência pelo abatimento do tronco de cone conforme prescreve a NBR NM 67 - *Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone* (ABNT, 1998). Para a realização destes ensaios, o concreto fresco foi amostrado conforme a NBR NM 33 - *Concreto – Amostragem de concreto fresco* (ABNT, 1994). Os valores desse ensaio realizado podem ser observados tanto para os concretos convencionais (ver Tabela 4.21) quanto para os concretos bombeados (ver Tabela 4.22).

Tabela 4.18 – Ordem de colocação dos materiais na betoneira bem como seus tempos de mistura

Ordem	Movimento	Materiais	Tempo de Mistura
1°	Acionar a betoneira	-----	Indeterminado
2°	Colocação dos materiais com betoneira em movimento	Agregados Graúdos + Agregado Miúdo	Indeterminado
3°	Adição de água	Parte da Água com Aditivo	1 Minuto
4°	Desligar a betoneira	-----	Parado
5°	Colocação dos materiais com betoneira desligada	Cimento + Adição Mineral	Parado
6°	Acionar a betoneira e Adicionar a água	Restante da Água com Aditivo	3 Minutos
7°	Desligar a betoneira	-----	3 Minutos
8°	Ligar novamente a betoneira	-----	2 Minutos

Tabela 4.19 – Temperatura da água de amassamento dos concretos convencionais

Concreto	Temperatura da água de amassamento (°C)					
	10 MPa	15 MPa	18 MPa	20 MPa	25 MPa	30 MPa
Convencional						
Traço A	24,0	24,5	27,0	28,0	26,0	25,0
Traço B	33,0	32,0	34,0	38,0	32,0	36,0
Traço C	30,5	31,5	33,5	37,5	31,0	35,0
Traço D	29,5	30,5	32,5	36,5	29,0	34,0

Tabela 4.20 – Temperatura da água de amassamento dos concretos bombeados

Concreto Bombeado	Temperatura da água de amassamento (°C)					
	10 MPa	15 MPa	18 MPa	20 MPa	25 MPa	30 MPa
Traço A	27,0	24,0	29,0	26,0	27,0	30,0
Traço B	33,0	33,0	39,0	39,5	39,5	40,0
Traço C	31,5	32,5	38,0	38,5	38,5	39,5
Traço D	30,5	31,0	38,0	37,5	38,5	39,5

Tabela 4.21 – Valores da consistência pelo abatimento do tronco de cone (*slump*) dos concretos convencionais

Concreto Convencional	<i>Slump Test</i> (cm)					
	10 MPa	15 MPa	18 MPa	20 MPa	25 MPa	30 MPa
Traço A	5,7	5,6	5,4	5,9	5,1	5,5
Traço B	14,8	14,6	14,9	14,9	14,5	14,1
Traço C	5,4	5,7	5,2	5,1	5,3	4,8
Traço D	5,9	5,2	5,8	5,0	5,5	5,1

Em relação à temperatura observada na água de amassamento dos concretos e apresentadas nas Tabelas 4.20 e 4.21, MEHTA (1994) referencia que até 30°C não se observa nenhum tipo de influência nas propriedades físicas e mecânicas dos concretos produzidos. Entretanto, não foi escopo do presente trabalho avaliar com rigor e nem detalhar a influência do aumento da temperatura da água na reologia e propriedades físicas de um concreto. É necessário observar que o aumento da temperatura da água é provocado pela dissipação de energia quando do processo de sucessivas passagens pelo sistema de imantação e magnetização.

Tabela 4.22 – Valores da consistência pelo abatimento do tronco de cone (*slump*) dos concretos bombeados

Concreto Bombeado	<i>Slump Test</i> (cm)					
	10 MPa	15 MPa	18 MPa	20 MPa	25 MPa	30 MPa
Traço A	9,0	9,4	9,6	9,0	9,5	9,9
Traço B	14,8	14,6	14,4	15,0	14,1	13,8
Traço C	8,9	9,0	9,3	9,1	8,5	9,8
Traço D	8,7	8,5	8,8	8,9	8,8	10,0

A partir das variações apresentadas nas Tabelas 4.21 e 4.22 foi possível observar que:

- o aumento da consistência observada no traço B foi motivada exclusivamente pelo uso da água magnetizada;
- no traço C foi realizado um ajuste do abatimento registrado no tronco de cone, a partir da redução do volume de água imposto à mistura;
- já no traço D também foi realizado o ajuste do abatimento concomitantemente com uma redução no consumo de cimento, objetivando a manutenção do fator a/c (água/cimento) original.

Posteriormente, após a determinação da consistência dos concretos, procedeu-se à moldagem e adensamento dos corpos de prova conforme NBR 5738 - *Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova* (ABNT, 2003). Foram moldados 10 corpos de prova cilíndricos (10 cm x 20 cm) e cinco corpos de prova também cilíndricos (15 cm x 30 cm) para cada traço específico. Desta maneira, para o *Traço A*, *Traço B*, *Traço C* e *Traço D* foram moldados, respectivamente, 15 corpos de prova para cada um. Continuando, foram expostos anteriormente, 6 diferentes resistências características tanto para os traços de concreto convencional quanto para os traços de concreto bombeado; totalizando assim 12

traços. Como cada traço específico de concreto foi dividido em quatro novos traços, tem-se, multiplicando, um total de 48 traços de concreto confeccionados para o desenvolvimento desta pesquisa. Conseqüentemente, foram moldados neste trabalho 720 corpos de prova sendo 480 (10 cm x 20 cm) e 240 (15 cm x 30 cm).

Durante as primeiras 24 h após a moldagem dos corpos de prova, estes foram armazenados em local plano, protegidos contra intempéries, desmoldados, identificados e colocados em reservatório de cura contendo solução estática e saturada de hidróxido de cálcio a $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$.

Os ensaios realizados nos concretos endurecidos para a determinação de suas propriedades mecânicas, conforme prescreve a normalização estão evidenciados na Tabela 4.23.

Tabela 4.23 – Procedimentos experimentais para determinação das propriedades mecânicas dos concretos endurecidos

Propriedade Mecânica	Norma
Resistência à Compressão	NBR 5739: Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos
Resistência à Tração	NBR 7222: Argamassa e concreto – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova
Módulo de Elasticidade Dinâmico	BS 1881. Testing concrete. Part 203. Recommendations for measurement of velocity of ultrasonic pulses in concrete
Absorção	NBR 9778: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por imersão – Índice de vazios e massa específica

As resistências à compressão dos concretos específicos desta pesquisa foram determinadas, de acordo com as recomendações da NBR 5739 - *Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos* (ABNT, 1994), nas idades de 3, 7 e 28 dias. Nas idades de 3 e 7 dias foram rompidos 3 corpos de prova cilíndricos de dimensões 10 cm de diâmetro por 20 cm de altura. Já na idade de 28 dias foram rompidos 3 corpos de prova cilíndricos de dimensões 10 cm de diâmetro por 20 cm de altura e também 2 corpos de prova cilíndricos de dimensões 15 cm de diâmetro por 30 cm de altura. Para a realização destes ensaios foi utilizada uma prensa de compressão universal de 200 tf e sensibilidade de 100 kg, fabricação EMIC, munida de medidor de deformação com precisão de 0,001 mm e acoplada por sistema de aquisição de dados, denominado de *TESC*.

Portanto, os resultados dos ensaios de compressão são apresentados nas Tabelas 4.24 a 4.35 e também nos Gráficos 4.1 a 4.12.

Tabela 4.24 – Resistências à compressão do concreto convencional de 10 MPa

Concreto Convencional 10 MPa		Resistência à Compressão (MPa)		
		3 dias	7 dias	28 dias
Traço A	Valores	1,98	5,55	10,96
		2,04	5,61	10,88
		1,95	5,58	10,54
		-	-	10,78
		-	-	10,62
	Média (MPa)	1,99	5,58	10,75
	Desvio Padrão (MPa)	0,05	0,03	0,17
Traço B	Valores	2,11	5,73	11,79
		2,20	5,82	11,58
		2,15	5,94	11,62
		-	-	11,82
		-	-	11,75
	Média (MPa)	2,15	5,83	11,71
	Desvio Padrão (MPa)	0,04	0,10	0,10
Traço C	Valores	2,40	6,02	12,58
		2,38	6,10	12,63
		2,46	6,05	12,76
		-	-	12,78
		-	-	12,85
	Média (MPa)	2,41	6,05	12,72
	Desvio Padrão (MPa)	0,04	0,04	0,11
Traço D	Valores	2,01	5,80	10,98
		2,06	5,96	11,11
		2,10	5,92	10,95
		-	-	11,06
		-	-	11,16
	Média (MPa)	2,05	5,89	11,05
	Desvio Padrão (MPa)	0,04	0,08	0,08

Tabela 4.25 – Resistências à compressão do concreto convencional de 15 MPa

Concreto Convencional		Resistência à Compressão (MPa)		
		3 dias	7 dias	28 dias
Traço A	15 MPa			
		3,16	8,87	15,89
		3,14	8,80	15,78
	Valores	3,04	8,53	15,28
		-	-	15,63
		-	-	15,40
	Média (MPa)	3,11	8,73	15,60
Desvio Padrão (MPa)	0,06	0,18	0,25	
Traço B		3,40	9,54	17,10
		3,34	9,37	16,79
	Valores	3,35	9,40	16,85
		-	-	17,14
		-	-	17,04
	Média (MPa)	3,37	9,44	16,98
	Desvio Padrão (MPa)	0,03	0,09	0,15
Traço C		3,63	10,18	18,24
		3,64	10,22	18,31
	Valores	3,68	10,32	18,50
		-	-	18,53
		-	-	18,63
	Média (MPa)	3,65	10,24	18,44
	Desvio Padrão (MPa)	0,03	0,08	0,16
Traço D		3,17	8,88	15,92
		3,21	8,99	16,11
	Valores	3,16	8,86	15,88
		-	-	16,04
		-	-	16,18
	Média (MPa)	3,18	8,91	16,03
	Desvio Padrão (MPa)	0,02	0,07	0,13

Tabela 4.26 – Resistências à compressão do concreto convencional de 18 MPa

Concreto Convencional 18 MPa		Resistência à Compressão (MPa)		
		3 dias	7 dias	28 dias
Traço A	Valores	3,73	10,46	18,75
		3,71	10,39	18,62
		3,59	10,06	18,03
		-	-	18,44
	Média (MPa)	-	-	18,17
	Desvio Padrão (MPa)	3,67	10,30	18,40
		0,08	0,21	0,30
Traço B	Valores	4,02	11,26	20,18
		3,94	11,06	19,81
		3,96	11,09	19,88
		-	-	20,23
	Média (MPa)	-	-	20,11
	Desvio Padrão (MPa)	3,97	11,14	20,04
		0,04	0,11	0,18
Traço C	Valores	4,28	12,01	21,52
		4,30	12,06	21,61
		4,34	12,18	21,83
		-	-	21,87
	Média (MPa)	-	-	21,98
	Desvio Padrão (MPa)	4,31	12,08	21,76
		0,03	0,09	0,19
Traço D	Valores	3,74	10,48	18,79
		3,78	10,61	19,01
		3,73	10,46	18,74
		-	-	18,93
	Média (MPa)	-	-	19,09
	Desvio Padrão (MPa)	3,75	10,52	18,91
		0,03	0,08	0,15

Tabela 4.27 – Resistências à compressão do concreto convencional de 20 MPa

Concreto Convencional 20 MPa		Resistência à Compressão (MPa)		
		3 dias	7 dias	28 dias
Traço A	Valores	4,40	12,35	22,13
		4,37	12,26	21,97
		4,23	11,87	21,28
	Média (MPa) Desvio Padrão (MPa)	-	-	21,76
		-	-	21,44
		4,34	12,16	21,71
		0,09	0,25	0,36
Traço B	Valores	4,74	13,29	23,81
		4,65	13,04	23,38
		4,67	13,09	23,46
	Média (MPa) Desvio Padrão (MPa)	-	-	23,87
		-	-	23,73
		4,69	13,14	23,65
		0,05	0,13	0,22
Traço C	Valores	5,05	14,17	25,39
		5,07	14,23	25,50
		5,13	14,37	25,76
	Média (MPa) Desvio Padrão (MPa)	-	-	25,81
		-	-	25,94
		5,08	14,26	25,68
		0,04	0,11	0,22
Traço D	Valores	4,41	12,37	22,17
		4,46	12,52	22,43
		4,40	12,34	22,11
	Média (MPa) Desvio Padrão (MPa)	-	-	22,34
		-	-	22,53
		4,43	12,41	22,32
		0,03	0,09	0,17

Tabela 4.28 – Resistências à compressão do concreto convencional de 25 MPa

Concreto Convencional 25 MPa		Resistência à Compressão (MPa)		
		3 dias	7 dias	28 dias
Traço A	Valores	5,20	14,57	26,11
		5,16	14,47	25,92
		5,00	14,01	25,11
		-	-	25,68
	Média (MPa)	-	-	25,30
	Desvio Padrão (MPa)	5,12	14,35	25,62
		0,11	0,30	0,42
Traço B	Valores	5,59	15,68	28,10
		5,49	15,39	27,59
		5,51	15,45	27,68
		-	-	28,17
	Média (MPa)	-	-	28,00
	Desvio Padrão (MPa)	5,53	15,51	27,91
		0,05	0,15	0,26
Traço C	Valores	5,96	16,72	29,96
		5,99	16,79	30,09
		6,05	16,96	30,40
		-	-	30,46
	Média (MPa)	-	-	30,61
	Desvio Padrão (MPa)	6,00	16,82	30,30
		0,04	0,13	0,27
Traço D	Valores	5,21	14,60	26,16
		5,27	14,77	26,47
		5,19	14,56	26,09
		-	-	26,36
	Média (MPa)	-	-	26,59
	Desvio Padrão (MPa)	5,22	14,64	26,33
		0,04	0,11	0,21

Tabela 4.29 – Resistências à compressão do concreto convencional de 30 MPa

Concreto Convencional 30 MPa		Resistência à Compressão (MPa)		
		3 dias	7 dias	28 dias
Traço A	Valores	6,49	18,21	32,64
		6,45	18,08	32,40
		6,25	17,51	31,39
		-	-	32,10
	Média (MPa)	-	-	31,63
	Desvio Padrão (MPa)	6,40	17,94	32,03
		0,13	0,37	0,52
Traço B	Valores	6,99	19,60	35,13
		6,86	19,24	34,49
		6,89	19,31	34,60
		-	-	35,21
	Média (MPa)	-	-	35,00
	Desvio Padrão (MPa)	6,91	19,38	34,89
		0,07	0,19	0,32
Traço C	Valores	7,45	20,90	37,45
		7,48	20,99	37,61
		7,56	21,20	38,00
		-	-	38,08
	Média (MPa)	-	-	38,26
	Desvio Padrão (MPa)	7,50	21,03	37,88
		0,06	0,16	0,34
Traço D	Valores	6,51	18,25	32,70
		6,58	18,46	33,09
		6,49	18,20	32,61
		-	-	32,95
	Média (MPa)	-	-	33,24
	Desvio Padrão (MPa)	6,53	18,30	32,92
		0,05	0,14	0,26

Tabela 4.30 – Resistências à compressão do concreto bombeado de 10 MPa

Concreto Bombeado 10 MPa		Resistência à Compressão (MPa)		
		3 dias	7 dias	28 dias
Traço A	Valores	2,25	6,30	11,29
		2,23	6,25	11,21
		2,16	6,06	10,86
	Média (MPa) Desvio Padrão (MPa)	-	-	11,10
		-	-	10,94
		2,21	6,20	11,08
		0,05	0,13	0,18
Traço B	Valores	2,42	6,78	12,14
		2,37	6,66	11,93
		2,38	6,68	11,97
	Média (MPa) Desvio Padrão (MPa)	-	-	12,17
		-	-	12,10
		2,39	6,70	12,06
		0,02	0,06	0,11
Traço C	Valores	2,58	7,23	12,96
		2,59	7,26	13,01
		2,62	7,33	13,14
	Média (MPa) Desvio Padrão (MPa)	-	-	13,16
		-	-	13,24
		2,59	7,27	13,10
		0,02	0,05	0,11
Traço D	Valores	2,25	6,31	11,31
		2,28	6,39	11,44
		2,24	6,29	11,28
	Média (MPa) Desvio Padrão (MPa)	-	-	11,39
		-	-	11,49
		2,26	6,33	11,38
		0,02	0,05	0,09

Tabela 4.31 – Resistências à compressão do concreto bombeado de 15 MPa

Concreto Bombeado 15 MPa		Resistência à Compressão (MPa)		
		3 dias	7 dias	28 dias
Traço A	Valores	3,23	9,05	16,22
		3,20	8,99	16,10
		3,10	8,70	15,60
	Média (MPa) Desvio Padrão (MPa)	-	-	15,95
		-	-	15,72
		3,18	8,91	15,92
		0,07	0,18	0,26
Traço B	Valores	3,47	9,74	17,45
		3,41	9,56	17,14
		3,42	9,60	17,20
	Média (MPa) Desvio Padrão (MPa)	-	-	17,49
		-	-	17,39
		3,44	9,63	17,33
		0,03	0,09	0,16
Traço C	Valores	3,71	10,39	18,62
		3,72	10,43	18,69
		3,76	10,54	18,88
	Média (MPa) Desvio Padrão (MPa)	-	-	18,91
		-	-	19,02
		3,73	10,45	18,83
		0,03	0,08	0,17
Traço D	Valores	3,23	9,07	16,25
		3,27	9,18	16,44
		3,22	9,04	16,21
	Média (MPa) Desvio Padrão (MPa)	-	-	16,37
		-	-	16,52
		3,24	9,10	16,36
		0,03	0,07	0,13

Tabela 4.32 – Resistências à compressão do concreto bombeado de 18 MPa

Concreto Bombeado 18 MPa		Resistência à Compressão (MPa)		
		3 dias	7 dias	28 dias
Traço A	Valores	3,94	11,04	19,79
		3,91	10,96	19,64
		3,79	10,62	19,03
	Média (MPa) Desvio Padrão (MPa)	-	-	19,46
		-	-	19,18
		3,88	10,87	19,42
		0,08	0,22	0,31
Traço B	Valores	4,24	11,88	21,29
		4,16	11,67	20,91
		4,18	11,71	20,98
	Média (MPa) Desvio Padrão (MPa)	-	-	21,34
		-	-	21,22
		4,19	11,75	21,15
		0,04	0,11	0,19
Traço C	Valores	4,52	12,68	22,72
		4,54	12,72	22,80
		4,58	12,85	23,03
	Média (MPa) Desvio Padrão (MPa)	-	-	23,07
		-	-	23,20
		4,55	12,75	22,97
		0,03	0,09	0,20
Traço D	Valores	3,95	11,06	19,83
		3,99	11,19	20,06
		3,94	11,04	19,78
	Média (MPa) Desvio Padrão (MPa)	-	-	19,97
		-	-	20,15
		3,96	11,10	19,96
		0,03	0,08	0,16

Tabela 4.33 – Resistências à compressão do concreto bombeado de 20 MPa

Concreto Bombeado 20 MPa		Resistência à Compressão (MPa)		
		3 dias	7 dias	28 dias
Traço A	Valores	4,37	12,26	21,97
		4,34	12,16	21,80
		4,20	11,79	21,12
	Média (MPa) Desvio Padrão (MPa)	-	-	21,60
		-	-	21,29
		4,30	12,07	21,56
		0,09	0,25	0,35
Traço B	Valores	4,70	13,19	23,63
		4,62	12,95	23,21
		4,63	12,99	23,29
	Média (MPa) Desvio Padrão (MPa)	-	-	23,69
		-	-	23,55
		4,65	13,04	23,47
		0,04	0,13	0,21
Traço C	Valores	5,02	14,07	25,22
		5,04	14,12	25,31
		5,09	14,26	25,56
	Média (MPa) Desvio Padrão (MPa)	-	-	25,61
		-	-	25,75
		5,05	14,15	25,49
		0,04	0,10	0,22
Traço D	Valores	4,38	12,28	22,01
		4,43	12,42	22,27
		4,37	12,25	21,96
	Média (MPa) Desvio Padrão (MPa)	-	-	22,17
		-	-	22,37
		4,39	12,32	22,15
		0,03	0,09	0,17

Tabela 4.34 – Resistências à compressão do concreto bombeado de 25 MPa

Concreto Bombeado 25 MPa		Resistência à Compressão (MPa)		
		3 dias	7 dias	28 dias
Traço A	Valores	5,33	14,96	26,80
		5,29	14,84	26,60
		5,13	14,38	25,77
		-	-	26,35
		-	-	25,97
	Média (MPa)	5,25	14,72	26,30
	Desvio Padrão (MPa)	0,11	0,31	0,43
Traço B	Valores	5,74	16,09	28,83
		5,63	15,80	28,32
		5,65	15,85	28,41
		-	-	28,90
		-	-	28,73
	Média (MPa)	5,68	15,91	28,64
	Desvio Padrão (MPa)	0,05	0,15	0,26
Traço C	Valores	6,12	17,17	30,77
		6,14	17,23	30,88
		6,21	17,40	31,18
		-	-	31,24
		-	-	31,42
	Média (MPa)	6,16	17,27	31,10
	Desvio Padrão (MPa)	0,04	0,12	0,27
Traço D	Valores	5,34	14,98	26,85
		5,41	15,16	27,17
		5,33	14,95	26,79
		-	-	27,05
		-	-	27,29
	Média (MPa)	5,36	15,03	27,03
	Desvio Padrão (MPa)	0,04	0,11	0,21

Tabela 4.35 – Resistências à compressão do concreto bombeado de 30 MPa

Concreto Bombeado 30 MPa		Resistência à Compressão (MPa)		
		3 dias	7 dias	28 dias
Traço A	Valores	6,51	18,24	32,70
		6,46	18,11	32,45
		6,26	17,54	31,44
	Média (MPa) Desvio Padrão (MPa)	-	-	32,15
		-	-	31,68
		6,41	17,97	32,08
		0,13	0,37	0,52
Traço B	Valores	7,00	19,63	35,17
		6,88	19,28	34,55
		6,90	19,34	34,66
	Média (MPa) Desvio Padrão (MPa)	-	-	35,26
		-	-	35,05
		6,92	19,42	34,94
		0,07	0,19	0,32
Traço C	Valores	7,47	20,95	37,54
		7,50	21,02	37,67
		7,57	21,23	38,04
	Média (MPa) Desvio Padrão (MPa)	-	-	38,11
		-	-	38,33
		7,51	21,06	37,94
		0,05	0,14	0,33
Traço D	Média (MPa)	6,52	18,28	32,76
		6,60	18,50	33,15
		6,50	18,24	32,68
	Média (MPa) Desvio Padrão (MPa)	-	-	33,00
		-	-	33,29
		6,54	18,34	32,98
		0,05	0,14	0,26

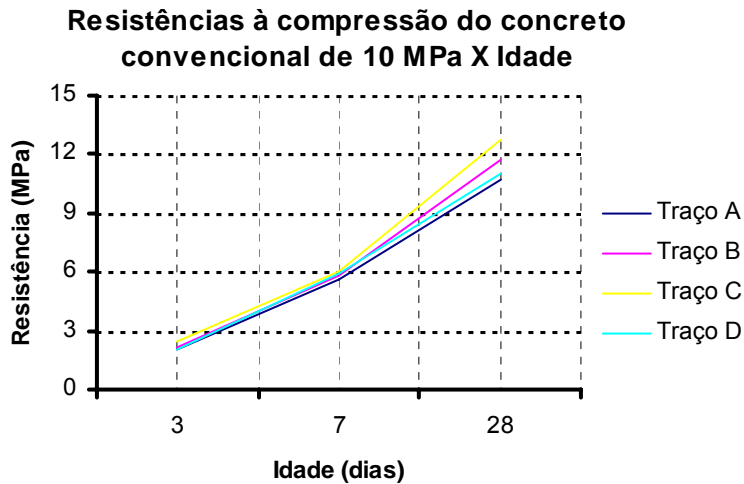


Gráfico 4.1 – Curvas das resistências médias à compressão do concreto convencional de 10 MPa x Idade

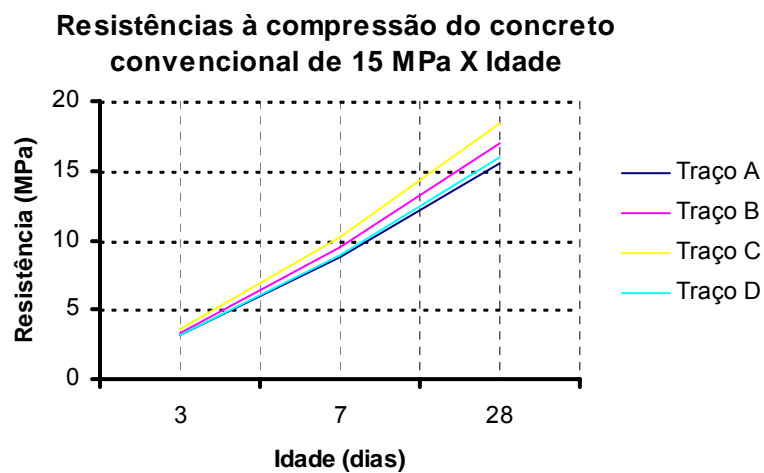


Gráfico 4.2 – Curvas das resistências médias à compressão do concreto convencional de 15 MPa x Idade

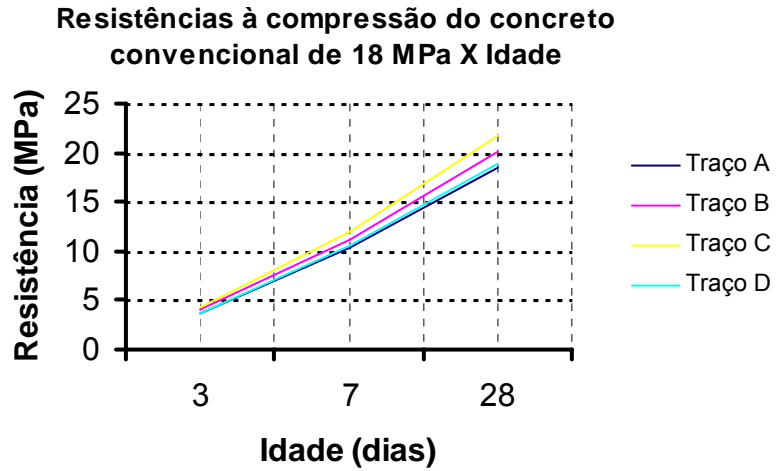


Gráfico 4.3 – Curvas das resistências médias à compressão do concreto convencional de 18 MPa x Idade

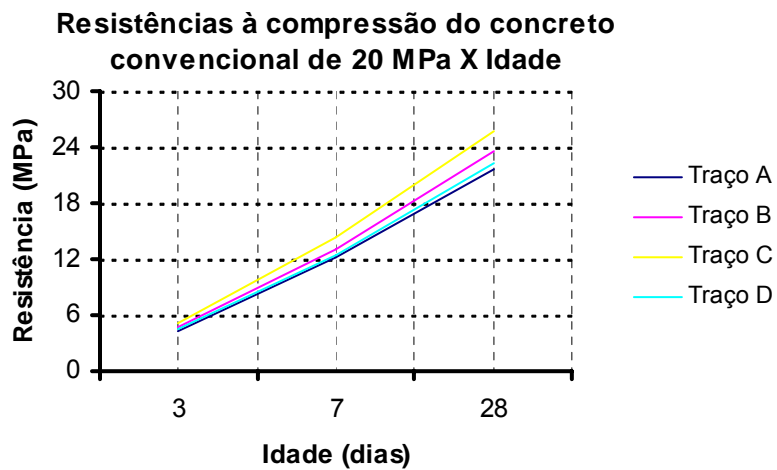


Gráfico 4.4 – Curvas das resistências médias à compressão do concreto convencional de 20 MPa x Idade

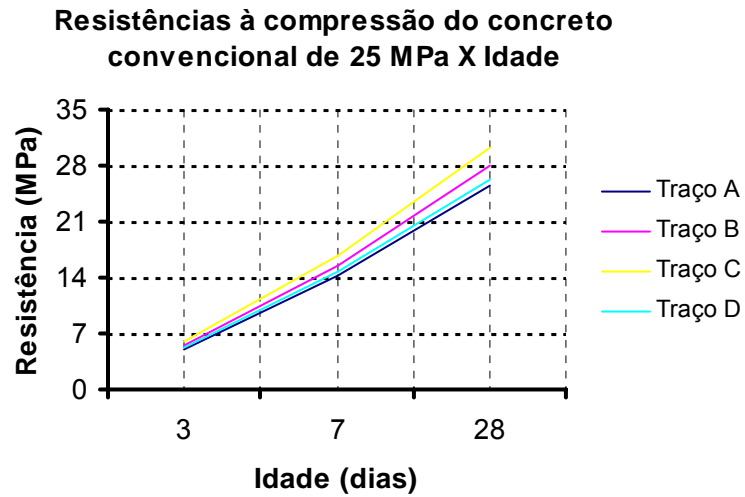


Gráfico 4.5 – Curvas das resistências médias à compressão do concreto convencional de 25 MPa x Idade

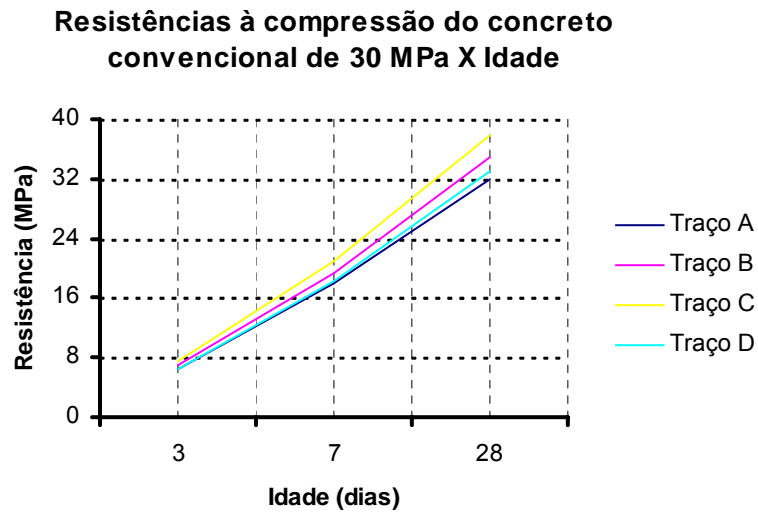


Gráfico 4.6 – Curvas das resistências médias à compressão do concreto convencional de 30 MPa x Idade

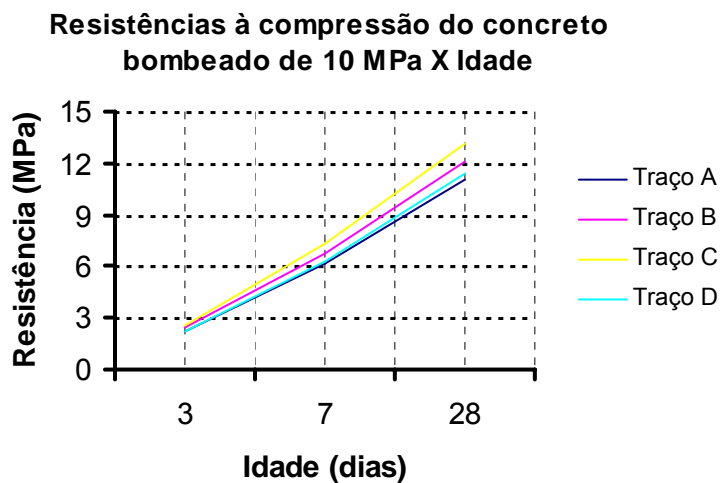


Gráfico 4.7 – Curvas das resistências médias à compressão do concreto bombeado de 10 MPa x Idade

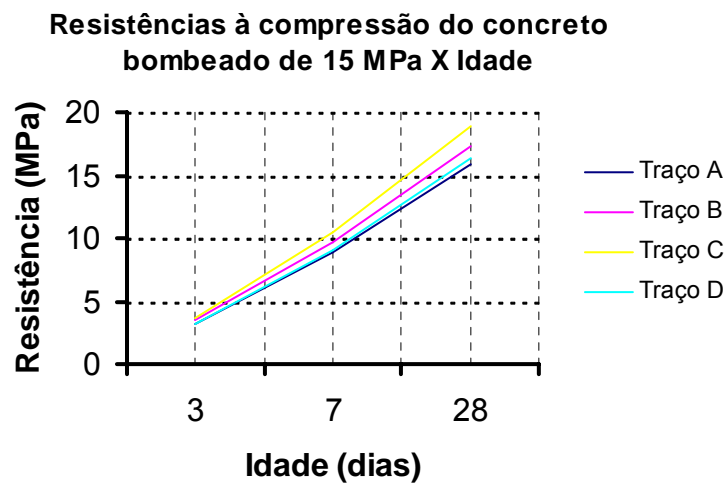


Gráfico 4.8 – Curvas das resistências médias à compressão do concreto bombeado de 15 MPa x Idade

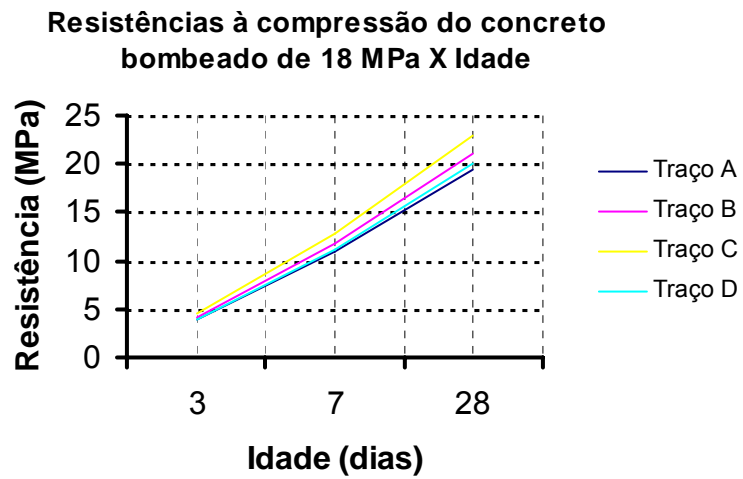


Gráfico 4.9 – Curvas das resistências médias à compressão do concreto bombeado de 18 MPa x Idade

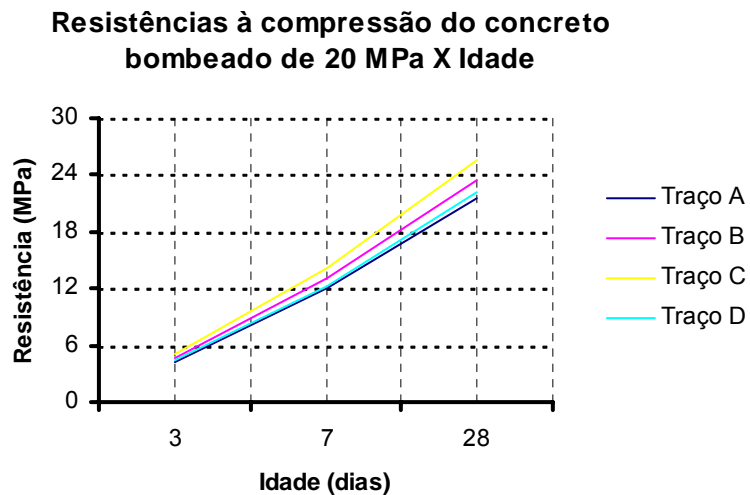


Gráfico 4.10 – Curvas das resistências médias à compressão do concreto bombeado de 20 MPa x Idade

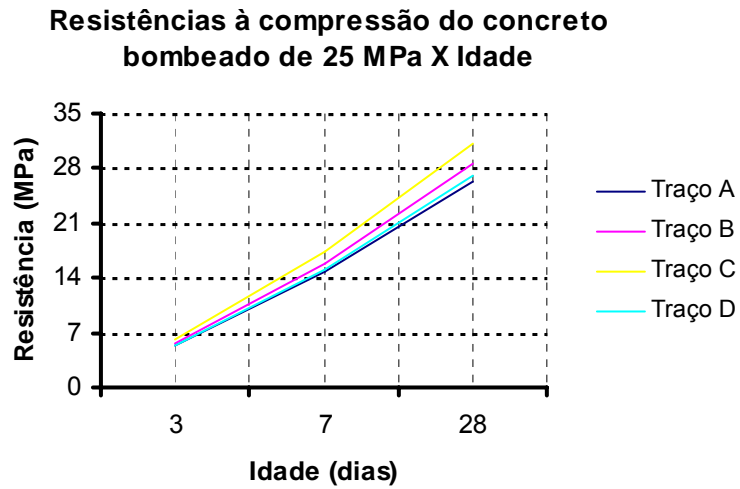


Gráfico 4.11 – Curvas das resistências médias à compressão do concreto bombeado de 25 MPa x Idade

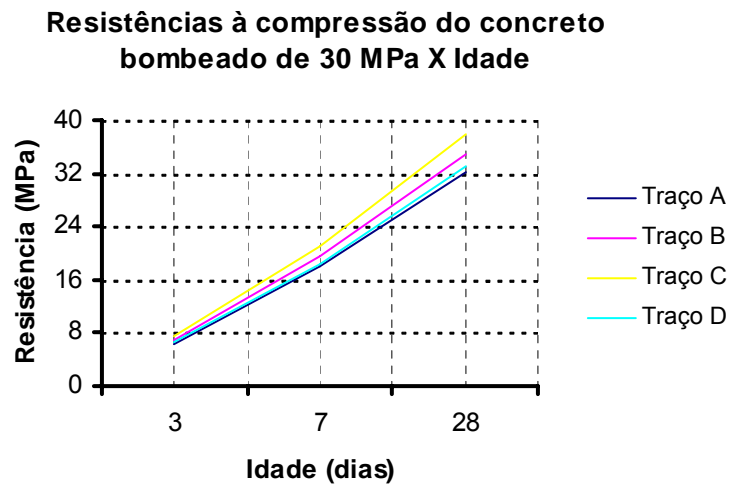


Gráfico 4.12 – Curvas das resistências médias à compressão do concreto bombeado de 30 MPa x Idade

A partir dos gráficos 4.1 até 4.12, invariavelmente pode-se observar que os traços referenciados como “C” apresentaram resistências à compressão superior aos demais (A, B e D), motivado pela redução de água de amassamento da mistura. Vale a pena ressaltar que para efeito de análise foi adotado no presente estudo como *valor padrão de referência* os resultados obtidos para o traço referenciado como “A”. Outro fato importante a ser destacado foi o baixo e reduzido valor do desvio padrão obtido em todas as análises realizadas, fato que indicia que a técnica operatória adotada para produção, moldagem, cura e rompimento dos corpos de prova foi muito bem executada e controlada.

Pode-se observar que o uso da água magnetizada nas condições de controle expostas nesta pesquisa proporciona uma acentuada melhoria na resistência à compressão dos concretos produzidos, com incrementos médios da ordem de 9 a 18 %, bem como um maior grau de hidratação em relação ao mesmo concreto confeccionado com água de torneira. Por outro lado, segundo LAZARENKO (1985), o concreto confeccionado com água magnética proporciona maior trabalhabilidade e um incremento de resistência da ordem de 20 a 22% quando comparado ao concreto confeccionado com água de torneira. Portanto, os resultados apresentados por estes autores são similares aos resultados obtidos neste trabalho.

As resistências à tração, avaliadas por compressão diametral, dos concretos confeccionados nesta pesquisa foram determinadas de acordo com as recomendações contidas na NBR 7222 - *Argamassa e concreto – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos* (ABNT, 1994), na idade de 28 dias. Para isto, foram rompidos 3 corpos de prova cilíndricos de dimensões 15 cm de diâmetro por 30 cm de altura para cada tipo de concreto específico. A realização destes ensaios também foi realizada na prensa de compressão universal de 200 tf e sensibilidade de 100 kg, fabricação EMIC.

Logo, os resultados dos ensaios de tração por compressão são apresentados nas Tabelas 4.36 a 4.47 que se seguem:

Tabela 4.36 – Resistências à tração por compressão diametral do concreto convencional de 10 MPa

Concreto Convencional 10 MPa		Resistência à Tração (MPa)		
		28 dias	Média	Desvio Padrão
Traço A	Valores	1,12	1,08	0,04
		1,09		
		1,04		
Traço B	Valores	1,23	1,19	0,04
		1,19		
		1,15		
Traço C	Valores	1,35	1,30	0,05
		1,29		
		1,26		
Traço D	Valores	1,16	1,12	0,03
		1,12		
		1,09		

Tabela 4.37 – Resistências à tração por compressão diametral do concreto convencional de 15 MPa

Concreto Convencional		Resistência à Tração (MPa)		
15 MPa		28 dias	Média	Desvio Padrão
Traço A	Valores	1,62	1,57	0,06
		1,58		
		1,51		
Traço B	Valores	1,79	1,73	0,06
		1,73		
		1,67		
Traço C	Valores	1,96	1,89	0,07
		1,87		
		1,83		
Traço D	Valores	1,68	1,63	0,05
		1,62		
		1,59		

Tabela 4.38 – Resistências à tração por compressão diametral do concreto convencional de 18 MPa

Concreto Convencional		Resistência à Tração (MPa)		
18 MPa		28 dias	Média	Desvio Padrão
Traço A	Valores	1,91	1,85	0,07
		1,86		
		1,78		
Traço B	Valores	2,11	2,04	0,07
		2,04		
		1,97		
Traço C	Valores	2,31	2,23	0,08
		2,21		
		2,15		
Traço D	Valores	1,99	1,92	0,06
		1,91		
		1,87		

Tabela 4.39 – Resistências à tração por compressão diametral do concreto convencional de 20 MPa

Concreto Convencional		Resistência à Tração (MPa)		
20 MPa		28 dias	Média	Desvio Padrão
Traço A	Valores	2,26	2,18	0,08
		2,20		
		2,10		
Traço B	Valores	2,49	2,41	0,08
		2,41		
		2,33		
Traço C	Valores	2,73	2,63	0,10
		2,61		
		2,54		
Traço D	Valores	2,34	2,27	0,07
		2,26		
		2,21		

Tabela 4.40 – Resistências à tração por compressão diametral do concreto convencional de 25 MPa

Concreto Convencional		Resistência à Tração (MPa)		
25 MPa		28 dias	Média	Desvio Padrão
Traço A	Valores	2,66	2,58	0,09
		2,59		
		2,48		
Traço B	Valores	2,93	2,84	0,10
		2,85		
		2,74		
Traço C	Valores	3,22	3,10	0,11
		3,08		
		3,00		
Traço D	Valores	2,77	2,68	0,08
		2,66		
		2,61		

Tabela 4.41 – Resistências à tração por compressão diametral do concreto convencional de 30 MPa

Concreto Convencional 30 MPa		Resistência à Tração (MPa)		
		28 dias	Média	Desvio Padrão
Traço A	Valores	3,33	3,22	0,11
		3,24		
		3,10		
Traço B	Valores	3,67	3,55	0,12
		3,56		
		3,43		
Traço C	Valores	4,03	3,87	0,14
		3,85		
		3,75		
Traço D	Valores	3,46	3,35	0,10
		3,33		
		3,26		

Tabela 4.42 – Resistências à tração por compressão diametral do concreto bombeado de 10 MPa

Concreto Bombeado 10 MPa		Resistência à Tração (MPa)		
		28 dias	Média	Desvio Padrão
Traço A	Valores	1,15	1,11	0,04
		1,12		
		1,07		
Traço B	Valores	1,27	1,23	0,04
		1,23		
		1,19		
Traço C	Valores	1,39	1,34	0,05
		1,33		
		1,30		
Traço D	Valores	1,20	1,16	0,04
		1,15		
		1,13		

Tabela 4.43 – Resistências à tração por compressão diametral do concreto bombeado de 15 MPa

Concreto Bombeado 15 MPa		Resistência à Tração (MPa)		
		28 dias	Média	Desvio Padrão
Traço A	Valores	1,65	1,60	0,06
		1,61		
		1,54		
Traço B	Valores	1,82	1,76	0,06
		1,77		
		1,70		
Traço C	Valores	2,00	1,93	0,07
		1,91		
		1,86		
Traço D	Valores	1,72	1,66	0,05
		1,65		
		1,62		

Tabela 4.44 – Resistências à tração por compressão diametral do concreto bombeado de 18 MPa

Concreto Bombeado 18 MPa		Resistência à Tração (MPa)		
		28 dias	Média	Desvio Padrão
Traço A	Valores	2,02	1,95	0,07
		1,97		
		1,88		
Traço B	Valores	2,22	2,15	0,07
		2,16		
		2,08		
Traço C	Valores	2,44	2,35	0,09
		2,33		
		2,27		
Traço D	Valores	2,10	2,03	0,06
		2,02		
		1,97		

Tabela 4.45 – Resistências à tração por compressão diametral do concreto bombeado de 20 MPa

	Concreto Bombeado 20 MPa	Resistência à Tração (MPa)		
		28 dias	Média	Desvio Padrão
Traço A	Valores	2,24	2,17	0,08
		2,18		
		2,09		
Traço B	Valores	2,47	2,39	0,08
		2,39		
		2,31		
Traço C	Valores	2,71	2,61	0,09
		2,59		
		2,52		
Traço D	Valores	2,33	2,25	0,07
		2,24		
		2,19		

Tabela 4.46 – Resistências à tração por compressão diametral do concreto bombeado de 25 MPa

	Concreto Bombeado 25 MPa	Resistência à Tração (MPa)		
		28 dias	Média	Desvio Padrão
Traço A	Valores	2,73	2,65	0,09
		2,66		
		2,55		
Traço B	Valores	3,01	2,92	0,10
		2,92		
		2,82		
Traço C	Valores	3,31	3,18	0,12
		3,16		
		3,08		
Traço D	Valores	2,85	2,74	0,11
		2,74		
		2,63		

Tabela 4.47 – Resistências à tração por compressão diametral do concreto bombeado de 30 MPa

Concreto Bombeado 30 MPa		Resistência à Tração (MPa)		
		28 dias	Média	Desvio Padrão
Traço A	Valores	3,33	3,23	0,11
		3,25		
		3,10		
Traço B	Valores	3,67	3,56	0,12
		3,56		
		3,43		
Traço C	Valores	4,03	3,88	0,14
		3,85		
		3,76		
Traço D	Valores	3,46	3,35	0,10
		3,33		
		3,26		

No que tange aos ensaios de tração, foi observado o mesmo comportamento em relação aos testes de compressão, ou seja, as composições referenciadas como Traços “C” conduziram a maiores valores se comparadas com as demais (A, B e D), fato motivado pela redução da quantidade de água de amassamento nesta mistura.

O uso da água magnetizada induziu a um aumento da resistência à tração em torno de 20% se comparado com os concretos produzidos com a tradicional água de torneira.

O módulo de elasticidade dinâmico dos concretos ensaiados neste trabalho foi obtido através do ensaio de ultra-sonografia com o uso do aparelho *V-Meter MK II* fabricado pela *JAMES INSTRUMENTS INC.*. Esse ensaio foi realizado nos 740 corpos de prova de concreto confeccionados e o módulo de elasticidade dinâmico foi determinado na idade de 28 dias. O teste de ultra-som realizado adotou o

sistema de transmissão direta (transdutores acoplados nas faces planas dos corpos de prova), e foram distanciados de 200 mm para os corpos de prova (10 cm x 20 cm) e de 300 mm para os corpos de prova (15 cm x 30 cm). A norma ASTM C 597 recomenda a utilização da Equação 4.2 para a avaliação do módulo de elasticidade dinâmico dos concretos, em função da velocidade de propagação da onda registrada:

$$V^2 = K \cdot \frac{E_d}{\rho} \quad (4.2)$$

sendo:

E_d = módulo de elasticidade dinâmico (MPa);

ρ = densidade do concreto (kg/m³);

V = velocidade do pulso ultra-sônico (km/s);

K = constante (tal valor não é explicitamente definido na norma, recomenda-se, no entanto, que ela deve ser obtida, em laboratório, utilizando-se corpos-de-prova de materiais, composições e propriedades mecânicas conhecidas).

Por outro lado, a norma BS 1881:Part 203 determina a relação entre o módulo de elasticidade dinâmico e a velocidade do pulso ultra-sônico, em um meio isotrópico e elástico de infinitas dimensões através da Equação 4.3:

$$E_d = \rho \cdot v^2 \frac{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}{(1 - \nu)} \quad (4.3)$$

Onde:

E_d = módulo de elasticidade dinâmico (MPa);

ρ = densidade do concreto (kg/m³);

v = velocidade do pulso ultra-sônico (km/s);

ν = coeficiente de Poisson (aproximadamente 0,21).

Diante das equações anteriores, das velocidades do pulso ultra-sônico, determinadas através do equipamento de ultra-sonografia mencionado anteriormente, dos valores das densidades dos corpos de prova de concretos fabricados nesta pesquisa, obtidos pela divisão de sua massa pelo seu volume, que variaram de 2320 kg/m^3 a 2440 kg/m^3 , foi possível determinar os módulos de elasticidade dinâmico dos concretos confeccionados através da Equação 4.3. Os resultados para os módulos de elasticidade dinâmico podem ser observados nas Tabelas 4.48 a 4.59.

De uma forma geral, os resultados dos módulos de elasticidade dinâmicos (tabelas 4.48 a 4.59) não apresentaram variações muito acentuadas, sempre conduziram a resultados compatíveis com a tipologia do concreto estudado e pesquisado. Em resumo, o uso da água magnetizada não induz a ganhos ou perdas consideráveis no módulo de elasticidade quando comparado com o resultado obtido para a mistura padrão de referência (no caso o traço A), bem como estão dentro dos valores especificados, referenciados e/ou estimados pela literatura técnica especializada (MEHTA, 1994; COUTINHO, 1988).

Entretanto, no presente trabalho não foi determinado o módulo de elasticidade estático, mas sim o dinâmico. Fatores de correlação entre módulos estáticos e dinâmicos são referenciados na literatura técnica específica (PUNDIT, 1998), e dão conta que para um módulo de elasticidade estático de 22 GPa o módulo dinâmico correspondente está próximo de 32 GPa. A partir desta situação é possível verificar que todos os valores de módulos de elasticidade dinâmico, obtidos na idade de 28 dias e apresentados nas Tabelas 4.48 a 4.59, condizem com as expectativas de módulo de elasticidade para as devidas resistências características dos concretos (f_{ck}), referenciado pela NBR 6118:2003, tornando-os desta forma aptos a serem utilizados na indústria da construção civil.

Tabela 4.48 – Módulo de Elasticidade Dinâmico do concreto convencional de 10 MPa

Concreto Convencional 10 MPa		Módulo de Elasticidade Dinâmico (GPa)			Média	Desvio Padrão
		Valores Obtidos				
Traço A	28 dias	9,96	10,12	9,88	9,99	0,11
		9,85	9,96	10,15		
		9,87	10,02	10,08		
Traço B	28 dias	10,85	11,02	10,76	10,88	0,12
		10,73	10,85	11,05		
		10,75	10,91	10,98		
Traço C	28 dias	11,78	11,97	11,69	11,82	0,13
		11,65	11,78	12,01		
		11,68	11,85	11,92		
Traço D	28 dias	10,24	10,40	10,15	10,26	0,11
		10,12	10,24	10,43		
		10,14	10,30	10,36		

Tabela 4.49 – Módulo de Elasticidade Dinâmico do concreto convencional de 15 MPa

Concreto Convencional 15 MPa		Módulo de Elasticidade Dinâmico (GPa)			Média	Desvio Padrão
		Valores Obtidos				
Traço A	28 dias	13,58	14,04	13,81	13,78	0,33
		13,88	13,95	14,02		
		12,98	13,79	13,94		
Traço B	28 dias	14,79	15,29	15,04	15,00	0,36
		15,12	15,19	15,27		
		14,14	15,02	15,18		
Traço C	28 dias	16,07	16,61	16,34	16,30	0,39
		16,42	16,50	16,59		
		15,36	16,31	16,49		
Traço D	28 dias	13,96	14,43	14,19	14,16	0,34
		14,26	14,34	14,41		
		13,34	14,17	14,33		

Tabela 4.50 – Módulo de elasticidade dinâmico do concreto convencional de 18 MPa

Concreto Convencional 18 MPa		Módulo de Elasticidade Dinâmico (GPa)			Desvio Padrão
		Valores Obtidos		Média	
Traço A	28 dias	18,24	17,96	18,06	0,24
		17,92	18,55	18,62	
		18,12	18,29	18,33	
Traço B	28 dias	19,86	19,56	19,67	0,27
		19,51	20,20	20,28	
		19,73	19,92	19,96	
Traço C	28 dias	21,58	21,25	21,36	0,29
		21,20	21,94	22,03	
		21,44	21,64	21,68	
Traço D	28 dias	18,75	18,46	18,56	0,25
		18,42	19,06	19,14	
		18,62	18,80	18,84	

Tabela 4.51 – Módulo de elasticidade dinâmico do concreto convencional de 20 MPa

Concreto Convencional 20 MPa		Módulo de Elasticidade Dinâmico (GPa)			Desvio Padrão
		Valores Obtidos		Média	
Traço A	28 dias	22,31	22,11	22,24	0,11
		22,12	22,09	22,42	
		22,22	22,13	22,31	
Traço B	28 dias	24,30	24,08	24,22	0,12
		24,09	24,06	24,42	
		24,20	24,10	24,30	
Traço C	28 dias	26,39	26,16	26,31	0,13
		26,17	26,13	26,52	
		26,29	26,18	26,39	
Traço D	28 dias	22,93	22,72	22,86	0,12
		22,73	22,70	23,04	
		22,84	22,74	22,93	

Tabela 4.52 – Módulo de elasticidade dinâmico do concreto convencional de 25 MPa

Concreto Convencional 25 MPa		Módulo de Elasticidade Dinâmico (GPa)			Média	Desvio Padrão
		Valores Obtidos				
Traço A	28 dias	26,88	27,34	26,93	27,16	0,20
		27,37	27,26	27,20		
		27,19	26,92	27,33		
Traço B	28 dias	29,27	29,77	29,33	29,57	0,21
		29,81	29,69	29,62		
		29,61	29,32	29,76		
Traço C	28 dias	31,80	32,34	31,86	32,13	0,23
		32,38	32,25	32,18		
		32,17	31,85	32,33		
Traço D	28 dias	27,62	28,10	27,68	27,91	0,20
		28,13	28,02	27,95		
		27,94	27,67	28,09		

Tabela 4.53 – Módulo de elasticidade dinâmico do concreto convencional de 30 MPa

Concreto Convencional 30 MPa		Módulo de Elasticidade Dinâmico (GPa)			Média	Desvio Padrão
		Valores Obtidos				
Traço A	28 dias	32,99	33,42	32,75	33,31	0,31
		33,51	33,28	33,65		
		33,33	33,71	33,11		
Traço B	28 dias	35,93	36,39	35,66	36,27	0,34
		36,49	36,24	36,64		
		36,30	36,71	36,06		
Traço C	28 dias	39,03	39,54	38,74	39,40	0,37
		39,64	39,37	39,81		
		39,43	39,88	39,17		
Traço D	28 dias	33,90	34,35	33,66	34,23	0,32
		34,44	34,20	34,58		
		34,25	34,64	34,03		

Tabela 4.54 – Módulo de elasticidade dinâmico do concreto bombeado de 10 MPa

	Concreto Bombeado 10 MPa	Módulo de Elasticidade Dinâmico (GPa)			Média	Desvio Padrão
		Valores Obtidos				
Traço A	28 dias	10,26	10,42	10,18	10,29	0,11
		10,15	10,26	10,45		
		10,17	10,32	10,38		
Traço B	28 dias	11,18	11,35	11,08	11,20	0,12
		11,05	11,18	11,38		
		11,07	11,24	11,31		
Traço C	28 dias	12,13	12,33	12,04	12,17	0,14
		12,00	12,13	12,37		
		12,03	12,21	12,28		
Traço D	28 dias	10,55	10,71	10,45	10,57	0,12
		10,42	10,55	10,74		
		10,44	10,61	10,67		

Tabela 4.55 – Módulo de elasticidade dinâmico do concreto bombeado de 15 MPa

	Concreto Bombeado 15 MPa	Módulo de Elasticidade Dinâmico (GPa)			Média	Desvio Padrão
		Valores Obtidos				
Traço A	28 dias	13,99	14,46	14,22	14,19	0,34
		14,30	14,37	14,44		
		13,37	14,20	14,36		
Traço B	28 dias	15,23	15,75	15,49	15,45	0,37
		15,57	15,65	15,73		
		14,56	15,47	15,64		
Traço C	28 dias	16,55	17,11	16,83	16,79	0,40
		16,91	17,00	17,09		
		15,82	16,80	16,98		
Traço D	28 dias	14,38	14,86	14,62	14,58	0,35
		14,69	14,77	14,84		
		13,74	14,60	14,76		

Tabela 4.56 – Módulo de elasticidade dinâmico do concreto bombeado de 18 MPa

	Concreto Bombeado 18 MPa	Módulo de Elasticidade Dinâmico (GPa)			Média	Desvio Padrão
		Valores Obtidos				
Traço A	28 dias	18,79	18,50	18,60	18,78	0,25
		18,46	19,11	19,18		
		18,66	18,84	18,88		
Traço B	28 dias	20,46	20,15	20,26	20,45	0,28
		20,10	20,81	20,89		
		20,32	20,52	20,56		
Traço C	28 dias	22,23	21,89	22,00	22,22	0,30
		21,84	22,60	22,69		
		22,08	22,29	22,33		
Traço D	28 dias	19,31	19,01	19,12	19,30	0,26
		18,97	19,63	19,71		
		19,18	19,36	19,41		

Tabela 4.57 – Módulo de elasticidade dinâmico do concreto bombeado de 20 MPa

	Concreto Bombeado 20 MPa	Módulo de Elasticidade Dinâmico (GPa)			Média	Desvio Padrão
		Valores Obtidos				
Traço A	28 dias	22,98	22,77	22,91	22,88	0,12
		22,78	22,75	23,09		
		22,89	22,79	22,98		
Traço B	28 dias	25,03	24,80	24,95	24,92	0,13
		24,81	24,78	25,15		
		24,93	24,82	25,03		
Traço C	28 dias	27,18	26,94	27,10	27,07	0,14
		26,96	26,91	27,32		
		27,08	26,97	27,18		
Traço D	28 dias	23,62	23,40	23,55	23,52	0,12
		23,41	23,38	23,73		
		23,53	23,42	23,62		

Tabela 4.58 – Módulo de elasticidade dinâmico do concreto bombeado de 25 MPa

	Concreto Bombeado 25 MPa	Módulo de Elasticidade Dinâmico (GPa)			Desvio Padrão
		Valores Obtidos		Média	
Traço A	28 dias	27,69	28,16	27,74	0,20
		28,19	28,08	28,02	
		28,01	27,73	28,15	
Traço B	28 dias	30,15	30,66	30,21	0,22
		30,70	30,58	30,51	
		30,50	30,20	30,65	
Traço C	28 dias	32,75	33,31	32,82	0,24
		33,35	33,22	33,15	
		33,14	32,81	33,30	
Traço D	28 dias	28,45	28,94	28,51	0,21
		28,97	28,86	28,79	
		28,78	28,50	28,93	

Tabela 4.59 – Módulo de elasticidade dinâmico do concreto bombeado de 30 MPa

	Concreto Bombeado 30 MPa	Módulo de Elasticidade Dinâmico (GPa)			Desvio Padrão
		Valores Obtidos		Média	
Traço A	28 dias	33,98	34,42	33,73	0,32
		34,52	34,28	34,66	
		34,33	34,72	34,10	
Traço B	28 dias	37,01	37,48	36,73	0,35
		37,58	37,33	37,74	
		37,39	37,81	37,14	
Traço C	28 dias	40,20	40,73	39,90	0,38
		40,83	40,55	41,00	
		40,61	41,08	40,35	
Traço D	28 dias	34,92	35,38	34,67	0,33
		35,47	35,23	35,62	
		35,28	35,68	35,05	

A determinação dos valores de absorção de água, por imersão, foi realizada em conformidade com a NBR 9778 - *Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por imersão – Índice de vazios e massa específica* (ABNT, 1987) para os concretos específicos de cada resistência característica na idade de 27 dias. Para isto utilizaram-se 8 corpos de prova cilíndricos, para cada tipo de concreto, sendo 3 corpos de prova de dimensões 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura e 5 corpos de prova de dimensões 15 cm de diâmetro e 30 cm de altura. Deste modo, os valores de absorção de água por imersão são apresentados nas Tabelas 4.60 a 4.71.

Tabela 4.60 – Absorção de água por imersão do concreto convencional de 10 MPa

Concreto Convencional 10 MPa	Absorção de Água (%)*
Traço A	9,9
Traço B	9,3
Traço C	8,6
Traço D	8,9

* Valor médio a partir de 8 CPs ensaiados

Tabela 4.61 – Absorção de água por imersão do concreto convencional de 15 MPa

Concreto Convencional 15 MPa	Absorção de Água (%)
Traço A	8,4
Traço B	7,9
Traço C	6,3
Traço D	7,7

* Valor médio a partir de 8 CPs ensaiados

Tabela 4.62 – Absorção de água por imersão do concreto convencional de 18 MPa

Concreto Convencional 18 MPa	Absorção de Água (%)
Traço A	6,7
Traço B	6,3
Traço C	5,3
Traço D	6,1

* Valor médio a partir de 8 CPs ensaiados

Tabela 4.63 – Absorção de água por imersão do concreto convencional de 20 MPa

Concreto Convencional 20 Mpa	Absorção de Água (%)
Traço A	5,7
Traço B	5,4
Traço C	5,3
Traço D	5,2

* Valor médio a partir de 8 CPs ensaiados

Tabela 4.64 – Absorção de água por imersão do concreto convencional de 25 MPa

Concreto Convencional 25 MPa	Absorção de Água (%)
Traço A	5,2
Traço B	4,8
Traço C	3,9
Traço D	4,6

* Valor médio a partir de 8 CPs ensaiados

Tabela 4.65 – Absorção de água por imersão do concreto convencional de 30 MPa

Concreto Convencional 30 MPa	Absorção de Água (%)
Traço A	4,1
Traço B	3,9
Traço C	3,2
Traço D	3,7

* Valor médio a partir de 8 CPs ensaiados

Tabela 4.66 – Absorção de água por imersão do concreto bombeado de 10 MPa

Concreto Bombeado 10 MPa	Absorção de Água (%)
Traço A	9,5
Traço B	8,9
Traço C	8,2
Traço D	8,6

* Valor médio a partir de 8 CPs ensaiados

Tabela 4.67 – Absorção de água por imersão do concreto bombeado de 15 MPa

Concreto Bombeado 15 MPa	Absorção de Água (%)
Traço A	8,0
Traço B	7,6
Traço C	6,0
Traço D	7,3

* Valor médio a partir de 8 CPs ensaiados

Tabela 4.68 – Absorção de água por imersão do concreto bombeado de 18 MPa

Concreto Bombeado 18 MPa	Absorção de Água (%)
Traço A	6,4
Traço B	6,0
Traço C	5,1
Traço D	5,8

* Valor médio a partir de 8 CPs ensaiados

Tabela 4.69 – Absorção de água por imersão do concreto bombeado de 20 MPa

Concreto Bombeado 20 MPa	Absorção de Água (%)
Traço A	5,4
Traço B	5,1
Traço C	5,0
Traço D	4,9

* Valor médio a partir de 8 CPs ensaiados

Tabela 4.70 – Absorção de água por imersão do concreto bombeado de 25 MPa

Concreto Bombeado 25 MPa	Absorção de Água (%)
Traço A	4,9
Traço B	4,4
Traço C	3,7
Traço D	4,5

* Valor médio a partir de 8 CPs ensaiados

Tabela 4.71 – Absorção de água por imersão do concreto bombeado de 30 MPa

Concreto Bombeado 30 MPa	Absorção de Água (%)
Traço A	3,9
Traço B	3,7
Traço C	3,0
Traço D	3,5

- Valor médio a partir de 8 CPs ensaiados

Em relação aos resultados obtidos no ensaio de absorção de água por imersão não foram observadas diferenças ou discrepâncias significativas quando da utilização da água magnetizada e comparada com os resultados apresentados pelo concreto padrão de referência (traço A) e pelas experiências dos autores, fatos que sugestionam que o uso da água imantada não influencia a capacidade de absorção dos concretos.

4.3.4 – Análise e Discussão Geral

A seguir são apresentadas tabelas onde se podem visualizar, de uma maneira única, as variações percentuais das resistências auferidas nos diversos traços e composições, adotando-se como padrão comparativo e de referência o Traço A.

A Tabela 4.72 evidencia o aumento do percentual da resistência em relação ao Traço A (traço de referência) nas Idades de 3, 7 e 28 dias para os concretos convencionais. Já a Tabela 4.73 mostra o aumento do percentual da resistência em relação ao Traço A (traço de referência) nas Idades de 3, 7 e 28 dias para os concretos bombeados e por fim a Tabela 4.74 apresenta a economia média (%) da quantidade de cimento utilizada no Traço D em relação ao Traço A (traço de referência) nas Idades de 3, 7 e 28 dias para os concretos convencionais.

Tabela 4.72 – Aumento do percentual da resistência em relação ao Traço A (traço de referência) nas Idades de 3, 7 e 28 dias para os concretos convencionais

Aumento da Resistência à Compressão em Relação ao Traço A (%)				
Concreto Convencional		3 dias	7 dias	28 dias
10 MPa	Traço B	8,04	4,48	8,93
	Traço C	21,11	8,42	18,33
	Traço D	3,02	5,56	2,79
15 MPa	Traço B	8,36	8,13	8,85
	Traço C	17,36	17,30	18,21
	Traço D	2,25	2,06	2,76
18 MPa	Traço B	8,17	8,16	8,91
	Traço C	17,44	17,28	18,26
	Traço D	2,18	2,14	2,77
20 MPa	Traço B	8,06	8,06	8,94
	Traço C	17,05	17,27	18,29
	Traço D	2,07	2,06	2,81
25 MPa	Traço B	8,01	8,08	8,94
	Traço C	17,19	17,21	18,27
	Traço D	1,95	2,02	2,77
30 MPa	Traço B	7,97	8,03	8,93
	Traço C	17,19	17,22	18,26
	Traço D	2,03	2,01	2,78

Tabela 4.73 – Aumento do percentual da resistência em relação ao Traço A (traço de referência) nas Idades de 3, 7 e 28 dias para os concretos bombeados

Aumento da Resistência à Compressão em Relação ao Traço A (%)				
Concreto Bombeado		3 dias	7 dias	28 dias
10 MPa	Traço B	8,14	8,06	8,84
	Traço C	17,19	17,26	18,23
	Traço D	2,26	2,10	2,71
15 MPa	Traço B	8,18	8,08	8,86
	Traço C	17,30	17,28	18,28
	Traço D	1,89	2,13	2,76
18 MPa	Traço B	7,99	8,10	8,91
	Traço C	17,27	17,30	18,28
	Traço D	2,06	2,12	2,78
20 MPa	Traço B	8,14	8,04	8,86
	Traço C	17,44	17,23	18,23
	Traço D	2,09	2,07	2,74
25 MPa	Traço B	8,19	8,08	8,90
	Traço C	17,33	17,32	18,25
	Traço D	2,10	2,11	2,78
30 MPa	Traço B	7,96	8,07	8,92
	Traço C	17,16	17,20	18,27
	Traço D	2,03	2,06	2,81

No caso de concretos convencionais, o uso da água magnetizada proporcionou, em média, um aumento de 18,27% nas resistências à compressão se comparadas com as mesmas misturas obtidas com a água dita normal (de torneira fornecimento COPASA/MG), fato que sinaliza a eficiência da tecnologia de indução magnética descrita no presente trabalho. Já no caso de concretos a serem submetidos à elevação mecânica por bombeamento, o aumento de resistência observado foi, em média, de 18,25%.

Tabela 4.74 – Economia média (%) da quantidade de cimento utilizada no Traço D em relação ao Traço A (traço de referência) nas Idades de 3, 7 e 28 dias para os concretos convencionais

Economia percentual da quantidade de cimento utilizada no Traço D em Relação ao Traço A (%)		
Resistência		
Característica	Concreto Convencional	Concreto Bombeado
10 MPa	- 4,0	- 4,2
15 MPa	- 14,0	- 11,5
18 MPa	- 3,8	- 4,7
20 MPa	- 10,7	- 3,9
25 MPa	- 5,1	- 3,6
30 MPa	- 4,7	- 3,2

A partir da Tabela 4.74 pode-se observar que:

- o uso da água magnetizada induz invariavelmente a uma redução no consumo de cimento necessário a produzir um concreto de resistência característica desejada (f_{ck}). Tal situação conduz, por analogia, a uma redução no custo de produção de concretos, fato que, segundo literatura especializada, pode reduzir a

incidência de retrações e, por conseqüência, a existência de fissuras e trincas nas construções;

- objetivando obter concretos de resistência características (f_{ck}) a preços mais baratos, uma solução é de se utilizar a água submetida a um campo magnético, fato que permite reduzir em até 14% (dependendo do caso) o consumo de cimento, que é o insumo que mais impacta a matriz de custo de um concreto, tanto convencional quanto bombeado.

5 CONCLUSÕES

A partir da análise geral dos resultados é possível concluir que:

- A utilização da água submetida a indução magnética proporcionou um aumento na resistência à compressão dos concretos, em todas as idades, bem como ligeiro aumento na consistência e trabalhabilidade do mesmo em seu estado fresco. Uma causa desse aumento de resistência e de trabalhabilidade deve-se, sobretudo à redução da tensão superficial proporcionada às moléculas de água, fato que aumenta a sua capacidade e eficiência de hidratação dos compostos cimentícios;
- É notória a influência sofrida pelas propriedades físicas e mecânicas dos concretos, tanto do estado endurecido quanto em seu estado fresco, quando alteradas algumas variáveis do sistema de imantação, tais como: vazão da água passante pelas células; intensidade do campo magnético submetido às moléculas de água; temperatura da água após passagens sucessivas pelas células; dureza da água, ou seja, composição química da água (teor de sólidos, sais, etc); presença ou não de aditivos superplastificantes ou redutores de água; etc;
- O uso da água magnetizada proporciona significativa redução no consumo de cimento necessário à produção de concretos, bem como reduz o custo final do produto, sem prejuízo da necessária resistência e segurança exigida pelo projeto e pela normalização específica.

Face ao exposto, é mister que o trabalho tenha seqüência para que, oportunamente, possa ser dada à comunidade científica mundial uma idéia clara do potencial benefício da utilização da água magnetizada na produção de concretos convencionais e de alto desempenho.

Este trabalho continuará a ser desenvolvido buscando introduzi-lo efetivamente em uma linha de produção de concreto de uma central concreteira, mediante a inserção do dispositivo de imantação em sua infra-estrutura.

Para um melhor entendimento do concreto utilizado com água magnetizada, a seguir mencionamos alguns tópicos que merecem uma maior investigação e estudo para novos trabalhos. (1) Performance do concreto utilizado com água magnetizada em função de diferentes vazões da água ao passar pelas células. (2) Comparação da porosidade entre concretos confeccionados com água magnetizada e com água comum não magnetizada. (3) Efeito do concreto preparado com a água magnetizada juntamente com diversos tipos de aditivos. (4) Estudo de concretos preparados com água magnetizada em conjunto com adições de cinzas volantes e microsílica.

Fica evidente que o uso da água magnetizada nas condições de controle expostas nesta dissertação, proporciona uma acentuada melhoria na resistência à compressão dos concretos produzidos.

6 PROPOSTAS DE NOVOS TRABALHOS

A partir do trabalho realizado, é mister que o mesmo tenha seqüência para que, oportunamente possa ser dada à comunidade científica mundial uma idéia clara do real benefício da utilização da água magnetizada na produção de concretos convencionais e daqueles referenciados como de alto desempenho (CAD).

Nesta direção sugere-se:

- Inserção real de um sistema de magnetização na linha de uma central concreteira, proporcionando desta forma uma análise geral do custo x benefício;
- Análise da performance do concreto produzido a partir da água magnetizada em função de diferentes valores de vazão da água passante pelas células de imantação;
- Avaliação da porosidade, retração e durabilidade dos concretos confeccionados com água magnetizada se comparados com aqueles obtidos a partir da água comum de torneira;
- Avaliação do comportamento do concreto preparado com a água imantada na presença dos tradicionais aditivos tensoativos (plastificantes e superplastificantes);
- Avaliação do comportamento de concretos preparados com água magnética em função da presença de adições minerais, ativas ou inertes, tais como cinzas volantes, sílica ativa, escória de alto forno, metacaulim e pozolanas artificiais.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADAM, N. K. **The physics and chemistry of surfaces**. New York, Dover Publications Inc, 1968.

ADAMSON, A. W. **Physical chemistry of surfaces**. Los Angeles: John Wiley & Sons Inc, 1990.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 212.1R-81: Admixtures for concrete**. Reported by ACI (Committee 212). Detroit; ACI Manual of Concrete Practise 1982.

_____. **ACI 116R-90: Cement and concrete terminology**. In: ACI Manual of Concrete Practise – Part 1. Detroit, 1994

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **ASTM C 125: Definitions of terms relating to concrete and concrete aggregates**. In: Annual Book of ASTM Standard. In: __. Annual Book of ASTM Standards. Philadelphia, 1993.

_____. **ASTM C 494: Standard specification for chemical admixtures for concrete**. USA, 2005.

_____. **ASTM C 597: Test method for pulse velocity through concrete**. In: Annual Book of ASTM Standards. Philadelphia, 1993.

_____. **ASTM C 803: Test method for penetration resistance of hardened concrete**. In: Annual Book of ASTM Standards. Philadelphia, 1993.

_____. **ASTM C 900: Test method for pullout strength of hardened concrete**. In: Annual Book of ASTM Standards. Philadelphia, 1993.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS EMPRESAS DE SERVIÇOS DE CONCRETAGEM (ABESC). **Manual do concreto dosado em central**. Centrográfica Editora & Gráfica. São Paulo, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5732: Cimento Portland comum.** Rio de Janeiro, 1991.

_____.**NBR 5733: Cimento Portland de alta resistência inicial.** Rio de Janeiro, 1991.

_____.**NBR 5735: Cimento Portland de alto-forno.** Rio de Janeiro, 1991.

_____.**NBR 5736: Cimento Portland pozolânico.** Rio de Janeiro, 1991.

_____.**NBR 5737: Cimento Portland resistentes a sulfatos.** Rio de Janeiro, 1992.

_____.**NBR 5738: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova.** Rio de Janeiro, 2003.

_____.**NBR 5739: Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos.** Rio de Janeiro, 1994.

_____.**NBR 6021: Apresentação de periódicos.** Rio de Janeiro, 1994.

_____.**NBR 6022: Apresentação de artigos em publicações periódicas.** Rio de Janeiro, 1994.

_____.**NBR 6023: Informação e documentação.** Rio de Janeiro, 2000.

_____.**NBR 6024: Numeração progressiva das seções de um documento - Procedimento.** Rio de Janeiro, 1989.

_____.**NBR 6027: Sumário - Procedimento.** Rio de Janeiro, 1989.

_____.**NBR 6028: Resumos - Procedimento.** Rio de Janeiro, 1990.

_____.**NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento.** Rio de Janeiro, 2003.

_____.NBR 7211: Agregados para concreto. Rio de Janeiro, 1983.

_____.NBR 7212: Execução de concreto dosado em central. Rio de Janeiro, 1984.

_____.NBR 7218: Agregados - Determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1987.

_____.NBR 7221: Agregados – Ensaio de qualidade de agregado miúdo. Rio de Janeiro, 1987.

_____.NBR 7222: Argamassa e concreto – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 1994.

_____.NBR 7251: Agregado em estado solto - Determinação da massa unitária – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1982.

_____.NBR 7584: Concreto endurecido – Avaliação da dureza superficial pelo esclerômetro de reflexão. Rio de Janeiro, 1995.

_____.NBR 7680: Extração, preparo, ensaio e análise de testemunhos de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 1983.

_____.NBR 8045: Concreto - Determinação da resistência acelerada à compressão - Método da água em ebulição. Rio de Janeiro, 1993.

_____.NBR 8802: Concreto endurecido – Determinação da velocidade de propagação de onda ultra-sônica. Rio de Janeiro, 1994.

_____.NBR 8522: Concreto – Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação e da curva tensão deformação. Rio de Janeiro, 1994.

_____.NBR 8953: Concreto para fins estruturais – Classificação por grupo de resistência. Rio de Janeiro, 1992.

_____.**NBR 9778: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por imersão – Índice de vazios e massa específica.** Rio de Janeiro, 1987.

_____.**NBR 9832: Concreto e argamassa - Determinação dos tempos de pega por meio da resistência à penetração - Método de ensaio.** Rio de Janeiro, 1992.

_____.**NBR 10342: Concreto – Perda de abatimento.** Rio de Janeiro, 1992.

_____.**NBR 11578: Cimento Portland composto.** Rio de Janeiro, 1991.

_____.**NBR 12654: Controle tecnológico de materiais componentes do concreto.** Rio de Janeiro, 1992.

_____.**NBR 12655: Concreto - Preparo, controle e recebimento.** Rio de Janeiro, 1996.

_____.**NBR 12821: Preparação de concreto em laboratório.** Rio de Janeiro, 1993.

_____.**NBR 12989: Cimento Portland branco.** Rio de Janeiro, 1993.

_____.**NBR EB 1763: Aditivos para concreto de cimento Portland.** Rio de Janeiro, 1992.

_____.**NBR NM 30: Agregado miúdo - Determinação da absorção de água.** Rio de Janeiro, 2000.

_____.**NBR NM 33: Concreto – Amostragem de concreto fresco.** Rio de Janeiro, 1998.

_____.**NBR NM 46: Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 µm, por lavagem.** Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR NM 52: Agregado miúdo - Determinação de massa específica e de massa específica aparente.** Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR NM 53: Agregado graúdo - Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água.** Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR NM 67: Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone.** Rio de Janeiro, 1998.

_____. **NBR NM 137: Argamassa e concreto – Água para amassamento e cura de argamassa e concreto de cimento Portland.** Rio de Janeiro, 1997.

_____. **NBR NM 248: Agregados - Determinação da composição granulométrica.** Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR NM-ISO 3310-1: Peneiras de ensaio – Requisitos técnicos e verificação – Parte 1: Peneiras de ensaio com telas de tecido metálico.** Rio de Janeiro, 1997

BRITISH STANDARD INSTITUTION. **BS 1881. Testing concrete. Part 203. Recommendations for measurement of velocity of ultrasonic pulses in concrete.** London, 1986.

COHEN, M. **Ciência e engenharia de materiais: sua evolução, prática e perspectivas.** Parte 1: materiais na história e na sociedade. São Carlos: UFSCar, 1988.

DONALDSON, J. D. Magnetic treatment of fluids – Preventing scale. *Finishing*, Jan. 1988. p. 22-32.

BAUER, L. A. F. **Materiais de construção.** 5.ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Ed., 1987.

BOGUSZYNSKA, J. Other actors. Magnetic resonance studies of cement based materials in inhomogeneous magnetic fields. **Cement and Concrete Research**, n. 35, p. 2033-2040, Jun. 2005.

COMITÉ MERCOSUR DE NORMALIZACIÓN. **NM 137:97 - Mortero y hormigón - Água para el mezclado y curado de mortero y hormigón de cemento pórtland.**

CONCRETO: **Ensino, pesquisa e realizações.** ed. G. C. Isaia. São Paulo: IBRACON, 2005. 2 v. 1600p. 16 x 23 cm.

COSTA, R. M. **Estudo da durabilidade das estruturas de concreto armado.** 1999. 224p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais. Departamento de Engenharia de Estruturas.

COUTINHO, A. S. **Fabrico e propriedades do betão.** 2.ed. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil – LNEC, 1988. 401p., v.1.

COUTINHO, A. S.; GONÇALVES, A. **Fabrico e propriedades do betão.** 2.ed. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil – LNEC, 1988. 219p., v.2.

COUTINHO, A. S.; GONÇALVES, A. **Fabrico e propriedades do betão.** 2.ed. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil – LNEC, 1988. 368p., v.3.

DESAI, R.; UPADHYAY, R. V.; MEHTA, R. V. Rheological properties of water-based magnetic fluid and its emulsion. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, n. 295, p. 186-189, Jun. 2005.

DURACRETE. Models for environmental actions on concrete structures. The European Union – Brite EuRam III, Mar. 1999. 273p.

EQUIPE DE FURNAS. **Concretos: massa, estrutural, projetado e compactado com rolo: ensaios e propriedades.** São Paulo: Pini, 1997.

GIAMMUSSO, S. E. **Manual do concreto**. São Paulo: Pini, 1992.

GIBBS, G. V.; PREWITT, C. T.; HEANEY, P. J. SILICA: physical behavior, geochemistry and applications. In: Reviews in mineralogy. Mineralogy Society of America. Washington, D. C., 1994. v.29. pp. 259-301.

GOMES, A. M.; SANT'ANA, R.; TRIFILO, B. The use of water induced magnetically in the physical and mechanical properties of ready mixed concrete. **Ermco**, Lisboa, 1999.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. Fundamentos de física - Eletromagnetismo. 6.ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Ed., 2003. v.3.

HANSEN, W. D. **Chemistry and physics of interfaces II**. R. Sidney - Ed. American Chemical Society Publication. Washington, D. C., 1971.

HELENE, P. R. L.; TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle do concreto**. São Paulo: PINI/SENAI, 1995. 189p.

HELENE, P. R. L. Vida útil de estruturas de concreto armado sob o ponto de vista da corrosão da armadura. In: **Seminário de dosagem e controle dos concretos estruturais**, várias cidades, jul. a set. 93. Anais: ENCOL/SENAI, Brasília, 1993.

IDORN, G. **Concrete progress**. London: Thomas Telford, 1997.

INTERNATIONAL CONFERENCE ON READY MIXED CONCRETE, 1.ed, Dundee, Scotland: R.K. Dhir, Pergamon Press, 1976.

LAZARENKO, L. N., ZHURAVLEV, P. D. Influence of magnetic water treatment conditions on the quality of concrete based thereon. Elektronnaya Obrabotka Materialov, n.1, Moscow, 1985. p. 87-89.

MALDONADO, N. G. Hacia una metodología comprensiva de dosificación de hormigones de alta performance. Mendoza: 2005. Tesis Doctoral. Universidad Tecnológica Nacional. Facultad Regional Mendoza, 2005.

MALHOTRA, V. M. Proc. CANMET/ACI Conf. on in situ/nondestructive testing of concrete, ACI SP-82, pp 1-16, 1984.

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

MEHTA, P. K. Point of view durability – critical issues for the future. **Concrete international** . American Concrete Institute. Detroit, 1997. v. 19.

MIKHANLVSKII, D.S.; SONIN, A. A. Intensification of concrete hardening process by magnetic water treatment before mixing. Beton i Zhelezobeton, n.3. Moscow, 1976.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. São Paulo: Pini, 1982.

NEVILLE, A. M. **Neville on concrete. An examination of issues in concrete practice** Michigan:Bonnie L. Schmick, aci international, 2003.

PETRUCCI, E. G. R. **Concreto de cimento Portland**. 13. ed. São Paulo, Globo, 1995.

PYE, G. Conductive concrete composition. US Patent 20010052307 A1, 2001.

PORTENEUVE, C. et al. Nuclear magnetic resonance characterization of high- and ultrahigh-performance concrete. **Cement and Concrete Research**, n. 31, p. 1887-1893, Aug. 2001.

PORTLAND CEMENT ASSOCIATION. Color and texture in architectural concrete. 2.ed. www.portlandcement.org, Illinois USA, 1995.

PUNDIT: Manual Técnico de Operação aparelho de ultra-sonografia, CNS Eletronic, Chicago, 1998.

REBUT, P. **Centrales hormigoneras**. Barcelona: Editores Técnicos Asociados, S.A., 1975.

SHAW, D. J. **Introdução à química dos colóides e de superfícies**. Tradução: Juergen Heinrich Maar. São Paulo, Ed. da Universidade de São Paulo, 1975.

SU, N., LEE, K. C. Effect of magnetic water on mechanical properties and micro-structures of concrete, **J. Chin Inst Civ Hydraul Eng** 11 (3), 1999. p.175 – 180.

SU, N.; WU, YH.; MAR, CY. Effect of magnetic water on the engineering properties of concrete containing granulated blast-furnace slag. **Cement and Concrete Research**, n. 30, p. 599-605, Jan. 2000.

SU, N.; WU, CF. Effect of magnetic field treated water on mortar and concrete containing fly ash. **Cement & Concrete Composites**, n. 25, p. 681-688, 2003.

TAYLOR, H. F. W. **Cemente chemistry**. London: Thomas Telford, 1997. 459p.

TEZUKA, Y. **Concreto de cimento e polímero**. São Paulo: ABCP, 1988. 26p.

Translucent concrete. Btang Phlog Disponível em: <http://beverlytang.com/archives/materials/translucent_concrete.html>. Acesso em: 21 nov.2005.

VASCONCELOS, A. C. **O concreto no Brasil**. São Paulo: Pini, 1992. 2 v.

VOLKONSKII, N.A.; SKOBEL'TSYN, Y.A. Use of magnetized water. *Girdrotekhnik i Meliorizatsiya*, n.9, Moscow, 1981.

WANG, G., WU, Z. Magneto chemistry and Magneto medicine. The Publishing House of Ordnance Industry, Beijing, 1997, pp. 82 – 90.

YU, Q.; SUGITA, S.; SAWAYAMA, K.; ISOJIMA, Y. Effect of electron water curing and electron charging curing on concrete strength. **Cement and Concrete Research**, vol. 28, n. 9, p. 1201-1208, Jul. 1998.