

INSTITUTOS SUPERIORES DE ENSINO DO CENSA
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CIÊNCIAS SOCIAIS APLICADAS E DA SAÚDE
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

AVALIAÇÃO COMPARATIVA DAS PROPRIEDADES DO CONCRETO
CONVENCIONAL E DO CONCRETO COM ADIÇÃO DE SUPERPLASTIFICANTE
E SÍLICA ATIVA

Por

Leôncio de Almeida Souza

Campos dos Goytacazes – RJ

Junho/2021

INSTITUTOS SUPERIORES DE ENSINO DO CENSA
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CIÊNCIAS SOCIAIS APLICADAS E DA SAÚDE
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

AVALIAÇÃO COMPARATIVA DAS PROPRIEDADES DO CONCRETO
CONVENCIONAL E DO CONCRETO COM ADIÇÃO DE SUPERPLASTIFICANTE
E SÍLICA ATIVA

Por

Leôncio de Almeida Souza

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado em cumprimento às exigências
para a obtenção do grau no Curso de
Graduação em Engenharia Civil nos
Institutos Superiores de Ensino do CENSA.

Orientador: Diogo Pereira dos Santos Kropf, MSc.

Campos dos Goytacazes – RJ

Junho/2021

Souza, Leônicio de Almeida

Avaliação comparativa das propriedades do concreto convencional e do concreto com adição de superplastificante e sílica ativa / Leônicio de Almeida Souza. - Campos dos Goytacazes (RJ), 2021.

78 f.: il.

Orientador: Prof. Diogo Pereira dos Santos Kropf

Graduação em (Engenharia Civil) - Institutos Superiores de Ensino do CENSA, 2021.

1. Engenharia Civil. 2. Concreto. 3. Aditivos Químicos.
4. Adições Minerais. I. Título.

CDD 624.183.4

Bibliotecária responsável Glauce Virgínia M. Régis CRB7 - 5799.
Biblioteca Dom Bosco.

AVALIAÇÃO COMPARATIVA DAS PROPRIEDADES DO CONCRETO
CONVENCIONAL E DO CONCRETO COM ADIÇÃO DE SUPERPLASTIFICANTE
E SÍLICA ATIVA

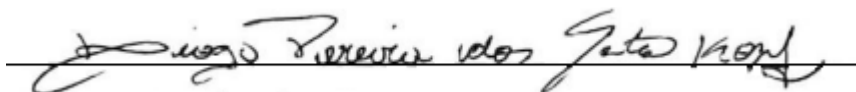
Por

Leôncio de Almeida Souza

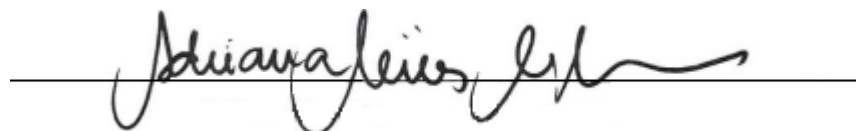
Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado em cumprimento às exigências
para a obtenção do grau no Curso de
Graduação em Engenharia Civil nos
Institutos Superiores de Ensino do CENSA.

Aprovado em 02 de julho de 2021

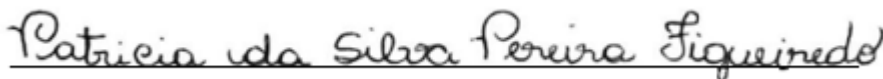
BANCA EXAMINADORA



Diogo Pereira dos Santos Kropf, MSc. – ISECENSA



Adriana Meireles Macedo Abreu, MSc. – ISECENSA



Patricia da Silva Pereira Figueiredo, Dra. – IFF

DEDICATÓRIA

A meu pai Thiers (*in memorian*), à minha mãe Célia, a meu filho Vinícius e à Maria Ângela, meu grande amor, dedico este trabalho.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, pela saúde, sabedoria e força a mim concedidas nesta jornada acadêmica. À Maria Santíssima, rainha e mãe de misericórdia, a quem recorreremos sempre.

À minha esposa Maria Ângela e a meu filho Vinícius, pelo incentivo, apoio e carinho, fundamentais para a realização deste trabalho.

A meu orientador Prof. Diogo Kropf, pelo apoio indispensável, pela paciência e compreensão ao longo deste período e, sobretudo, pela ajuda e ensinamentos durante a fase experimental da pesquisa.

Aos professores do Curso de Graduação em Engenharia Civil, pelos ensinamentos e apoio recebido.

A todos aqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram para a elaboração desta pesquisa.

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

A/C – Água/Cimento

CAD – Concreto de Alto Desempenho

CAR – Concreto de Alta Resistência

CP – Cimento Portland

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Pirâmide Escalonada de Saqqara, Saqqara, Egito	16
Figura 2: Pirâmide de Queóps em primeiro plano, Cairo, Egito	17
Figura 3: Coliseu de Roma, Itália	18
Figura 4: Coliseu de Roma, Itália (ilustração das fundações e superestrutura)	18
Figura 5: Pantheon de Roma, Itália	19
Figura 6: Pantheon de Roma, Itália (ilustração da estrutura)	19
Figura 7: Farol atual de Eddystone, Inglaterra	20
Figura 8: Ponte Louis Vicat sobre o Rio Dordogne, em Souillac, França	22
Figura 9: Concreto armado (armadura de aço)	24
Figura 10: Burj Khalifa, Dubai, Emirados Árabes (em construção em 2007)	26
Figura 11: Cimento Portland utilizado em concretos	29
Figura 12: Agregados utilizados em concretos	32
Figura 13: Aditivos químicos utilizados em concretos	33
Figura 14: Sílica ativa utilizada em concretos	36
Figura 15: Curva granulométrica da areia	54
Figura 16: Relação água/cimento obtida na Curva de Abrams	61
Figura 17: Cimento, areia e brita utilizados	66
Figura 18: Superplastificante e sílica ativa utilizados	67
Figura 19: Pesagem para medição da umidade da areia	67
Figura 20: Pesagem para medição da umidade da brita	67
Figura 21: Determinação da massa específica da areia pelo Método de Chapman	68
Figura 22: Determinação da massa unitária da areia e da brita	68
Figura 23: Peneiras de análise granulométrica e moldes para corpos de prova ...	68
Figura 24: Moldagem e desforma dos corpos de prova	69
Figura 25: Operações de produção do concreto, adensamento e ensaio de resistência à compressão	69
Figura 26: Ensaio de resistência à compressão	69

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Constituintes do concreto	29
Quadro 2: Tipos de cimentos Portlands especificados pela ABNT	30
Quadro 3: Propriedades físicas e químicas do cimento Portland CP II F-32	53
Quadro 4: Composição química do cimento Portland CP II F-32 (%)	53
Quadro 5: Análise granulométrica da areia	54
Quadro 6: Massa específica da areia	55
Quadro 7: Massa unitária da areia	55
Quadro 8: Caracterização da areia	55
Quadro 9: Massa unitária da brita	56
Quadro 10: Caracterização da brita	56
Quadro 11: Dados técnicos do MasterGlenium 51	57
Quadro 12: Dados técnicos da sílica ativa	57
Quadro 13: Classes de agressividade ambiental	58
Quadro 14: Correspondência entre classe de agressividade e qualidade do concreto	59
Quadro 15: Valores de abatimentos recomendados em função do tipo de obra ...	59
Quadro 16: Características estabelecidas para o concreto	60
Quadro 17: Consumo de água aproximado (l/m^3)	61
Quadro 18: Volume compactado seco do agregado graúdo	62
Quadro 19: Quantidade em massa dos materiais utilizados em cada traço	65
Quadro 20: Ensaio de resistência à compressão axial simples	70
Quadro 21: Medição da absorção de água	71

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1: Cálculo da resistência de dosagem (f_{cj})	60
Equação 2: Cálculo de consumo de cimento (C_c)	62
Equação 3: Cálculo do consumo de agregado graúdo (C_G)	63
Equação 4: Cálculo do volume de agregado miúdo (V_m)	63
Equação 5: Cálculo do consumo de agregado miúdo (C_m)	63
Equação 6: Cálculo da proporção dos constituintes do concreto	64

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	13
CAPÍTULO I: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
1. O CONCRETO	15
2. HISTÓRIA DO CONCRETO	15
2.1 O gesso calcinado egípcio	16
2.2 A cal pozolânica romana	17
2.3 O cimento hidráulico natural de Smeaton	20
2.4 O cimento hidráulico natural de Parker	21
2.5 O cimento hidráulico artificial de Vicat	21
2.6 O cimento Portland de Aspdin	22
2.7 O cimento Portland de Johnson	23
2.8 O concreto armado	23
2.9 O concreto de alto desempenho	25
2.10 Os aditivos químicos e as adições minerais	27
2.11 O concreto e a indústria da construção civil no Brasil	27
3. CONSTITUINTES DO CONCRETO	28
3.1 Cimento	29
3.2 Água	31
3.3 Agregados	31
3.4 Aditivos químicos	33
3.5 Adições minerais	35
4. PROPRIEDADES DO CONCRETO	37
4.1 Propriedades do concreto no estado fresco	37
4.1.1 Consistência	37
4.1.2 Trabalhabilidade	37
4.1.3 Homogeneidade	38
4.2 Propriedades do concreto no estado endurecido	39
4.2.1 Resistência à compressão	39
4.2.2 Resistência à tração	39
4.2.3 Módulo de elasticidade	40
4.2.4 Porosidade e permeabilidade	41

5. SUPERPLASTIFICANTES	42
6. SÍLICA ATIVA	43
CAPÍTULO II: ARTIGO CIENTÍFICO	44
RESUMO	45
ABSTRACT	46
1. INTRODUÇÃO	47
1.1 Justificativa e relevância	47
1.2 Objetivos	49
1.2.1 Objetivo geral	49
1.2.2 Objetivos específicos	49
2. REVISÃO BIBLIOMÉTRICA	50
3. METODOLOGIA	51
3.1 Equipamentos	52
3.2 Materiais e métodos	52
3.2.1 Caracterização dos materiais	52
3.2.2 Dosagem dos materiais	57
3.2.3 Produção dos concretos	64
3.2.4 Adensamento, moldagem e cura dos corpos de prova	65
3.2.5 Ensaio de resistência à compressão axial simples	66
3.2.6 Medição da absorção de água	66
4. RESULTADOS	70
5. DISCUSSÃO	71
6. CONCLUSÕES	74
7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	74
8. REFERÊNCIAS	74
CAPÍTULO III: REFERÊNCIAS	76

INTRODUÇÃO

Essa pesquisa se justifica pelas tendências atuais do setor da construção civil em obter e utilizar um concreto de alto desempenho nas edificações. O concreto de alto desempenho (CAD) surgiu nas últimas décadas do século XX, aprimorando o então chamado concreto de alta resistência (CAR). Como não somente a resistência mecânica, mas também a durabilidade passou a ser uma característica desejada para o concreto, surgiu assim o termo concreto de alto desempenho. A necessidade de aprimorar essas propriedades levou então ao desenvolvimento, em muitos países, de aditivos químicos e adições minerais que pudessem aumentar a resistência mecânica e a durabilidade do concreto.

Esse trabalho se propõe, desta maneira, avaliar o comportamento da resistência à compressão e da absorção de água de um concreto, ao se adicionar à mistura um aditivo químico superplastificante e uma adição mineral, a sílica ativa.

O primeiro produto, um aditivo químico redutor de água, tem a função de possibilitar a redução da quantidade de água adicionada à mistura, permitindo um aumento da resistência à compressão do concreto, e o segundo, uma adição mineral em forma de pó muito fino, atua na redução da porosidade do concreto, inibindo a penetração de umidade e agentes agressivos, contribuindo para a produção de concretos mais duráveis.

O presente trabalho se divide em Revisão Bibliográfica e Artigo Científico. Na Revisão Bibliográfica, é feito um estudo da bibliografia, tratando da evolução histórica do concreto, de seus constituintes e propriedades e das características dos superplastificantes e sílica ativa. O Artigo Científico trata dos ensaios laboratoriais, nos quais se avalia o desempenho do concreto com a adição desses dois produtos.

CAPÍTULO I: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

1. O CONCRETO

O concreto é um material heterogêneo, constituído de cimento, água, agregado miúdo (areia) e agregado graúdo (pedra ou brita). Com a finalidade de melhorar ou modificar suas propriedades básicas, ele pode conter aditivos químicos e adições minerais (COUTO et al., 2013). Alves (2002) explica que esses constituintes são proporcionados de modo a conferir ao concreto as propriedades fixadas no projeto e que as propriedades são definidas de acordo com o dimensionamento da estrutura.

O concreto é o principal elemento utilizado na construção civil e o material estrutural mais usado na atualidade. As razões para o seu uso tão disseminado são a facilidade em ser moldado, em uma variedade de formas e tamanhos, sua resistência à água, que o difere dos compostos como o aço e a madeira, e a grande disponibilidade de seus elementos constituintes, por um preço mais acessível do que o dos outros materiais estruturais (LIMA et al., 2014).

Bunder (2016) afirma que o concreto é o mais importante material estrutural da construção civil do planeta, que o concreto revolucionou a arte de projetar e construir estruturas e que transformou a história da humanidade em qualidade de vida e desenvolvimento.

2. HISTÓRIA DO CONCRETO

A história do concreto remete à história da utilização do cimento como aglomerante em argamassa de alvenaria. Materiais cimentícios de diversas origens foram usados pelos egípcios, gregos e romanos em suas construções (PEDROSO, 2009).

Segundo Pedroso (2009), há dois tipos básicos de cimento: os que não endurecem debaixo da água e, quando endurecidos, dissolvem-se lentamente em presença de água (sua origem remonta ao Egito Antigo e à Mesopotâmia), e os que permanecem estáveis em ambiente aquoso, solidificando-se e mantendo suas propriedades quando depositados debaixo da água, chamados, por isso, de cimento hidráulico (sua origem remonta à Roma Antiga).

2.1 O gesso calcinado egípcio

Os egípcios foram os primeiros povos a usarem cimento do tipo não-hidráulico, utilizando a cal e o gesso como material aglomerante para assentamento de pedras e tijolos de barro cozido. A cal, resultante da calcinação de rochas calcárias, e o gesso, resultante da calcinação da gipsita, foram utilizados na construção das pirâmides e das mastabas, complexos mortuários que precederam às pirâmides (KAEFER, 2008).

A Pirâmide de Saqqara (ou Pirâmide de Djoser), em Saqqara, construída em torno de 2.630 a.C., toda em blocos de rocha e argamassa calcinada, é considerada a primeira pirâmide a ser erguida no Egito (Figura 1). Composta por seis mastabas sobrepostas em seus 62 metros de altura, uma novidade em termos de construção de mastabas na época, essa pirâmide escalonada deu origem às demais pirâmides com sua forma tradicionalmente conhecida (BUNDER, 2016).



Figura 1: Pirâmide Escalonada de Saqqara, Saqqara, Egito

Fonte: Próprio autor, 2007

A Pirâmide de Queóps, uma das três pirâmides da Necrópole de Gizé, no Cairo, foi construída em torno de 2.560 a.C., utilizando-se blocos de calcário, pedras de granito e argamassa (Figura 2). Com seus 147 metros de altura, essa pirâmide permaneceu como a estrutura mais alta do mundo por mais de 3.800 anos, até a construção da Catedral de Lincoln, de 160 metros de altura, na Inglaterra, em 1311 (BUNDER, 2016).



Figura 2: Pirâmide de Queóps em primeiro plano, Cairo, Egito

Fonte: Próprio autor, 2007

Na Grécia Antiga, a argamassa de cal passou a ser utilizada mais tarde. Segundo Kaefer (2008), os gregos assentavam pedras e tijolos de barro com argila, reforçados com madeira, e passaram a utilizar argamassa de cal a partir de 800 a.C. Entretanto, nas construções monumentais, como o templo Parthenon, construído entre 447 e 433 a.C., as pedras eram assentadas sem argamassa. Grampos ou pinos de ferro eram usados para manter juntos os blocos de pedra.

2.2 A cal pozolânica romana

É no Império Romano que nasce a primeira concepção do concreto. Os romanos descobriram (em torno de 300 a.C.) que, misturando-se a cinza vulcânica de Pozzouli, nas proximidades do Monte Vesúvio (chamada pozolana), com a cal hidratada, em uma proporção que variava de 25 a 45 %, obtinham uma cal que endurecia sob a água (cal pozolânica). A reação da pozolana com a cal dava origem a uma argamassa bem dura que poderia ser depositada e curada debaixo da água, sendo por isso classificada posteriormente como cimento hidráulico. Essa descoberta permitiu aos romanos a construção de paredes de concreto em grandiosos portos que resistiram ao ambiente marinho e ao ataque das ondas por mais de 2 mil anos. A cal pozolânica romana foi usada também na construção da Via Ápia, do Coliseu, do Pantheon, dos aquedutos e dos banhos romanos (PEDROSO, 2009).

O Coliseu de Roma, anfiteatro construído entre 70 e 90 d.C. (Figuras 3 e 4), além de apresentar paredes internas de concreto, foi assentado sobre uma

fundação em forma de anel com 12 m de profundidade, construído com concreto ciclópico (incorporação de matacão e pedras de mão ao concreto pronto), de modo a evitar recalque diferencial (KAEFER, 2008).

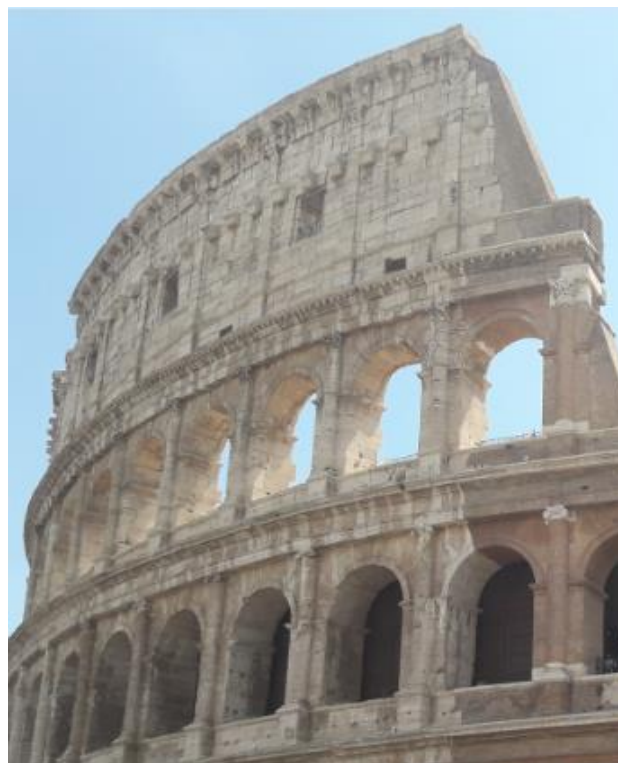


Figura 3: Coliseu de Roma, Itália

Fonte: Próprio autor, 2017

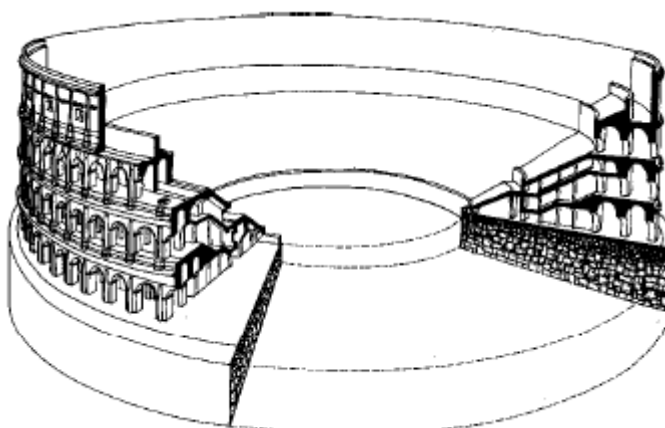


Figura 4: Coliseu de Roma, Itália (ilustração das fundações e superestrutura)

Fonte: Kaefer, 2008

O Pantheon de Roma, construído entre 118 e 128 d.C. (Figuras 5 e 6), foi assentado sobre um anel de concreto com 4,5 m de profundidade e 7 m de largura.



Figura 5: Pantheon de Roma, Itália

Fonte: Próprio autor, 2017

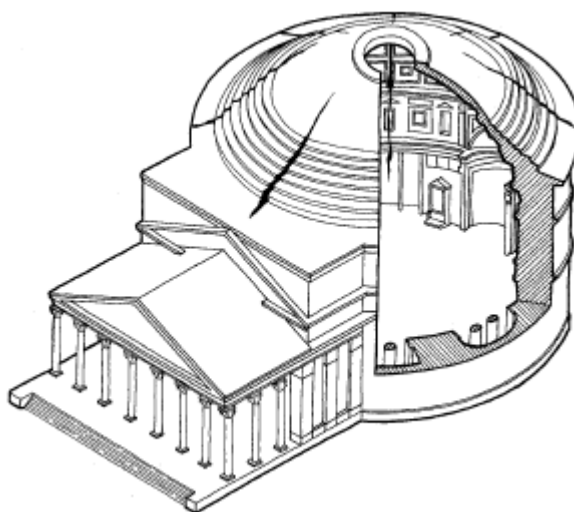


Figura 6: Pantheon de Roma, Itália (ilustração da estrutura)

Fonte: Kaefer, 2008

Sua cúpula de 43 m de diâmetro interno (e altura de também 43 m até o óculo) é a expressão máxima de desenvolvimento de cúpulas durante o Império Romano. Quase dois mil anos depois do Pantheon ter sido construído, sua cúpula é ainda hoje a maior cúpula de concreto não reforçado do mundo (KAEFER, 2008).

A técnica de construir com concreto foi a base da ordem espacial encontrada na arquitetura romana. As abóbadas são a expressão

genuína de um material plástico, maleável até desenvolver resistência suficiente para se manter por si mesmo. O Panteão, construído de 118 a 128, é estrutura formada de uma cúpula de 43m de diâmetro apoiada num cilindro de concreto pozolânico revestido com tijolos e mármore com 6m de espessura nas nervuras. Sua fundação, um anel de concreto com 4,5m de profundidade e 7m de largura, foi a solução encontrada para evitar recalques diferenciais e para melhor distribuir a pressão aplicada no solo de pouca capacidade de suporte (PEDROSO, 2009, p. 17).

O concreto romano consistia de uma composição de agregados (cacos de pedras calcárias), areia, cal, pozolana e água. O ingrediente ativo que reagia com a cal para formar a variante hidráulica foi a pozolana, ou cinza vulcânica, que fez com que se denomine hoje concreto pozolânico (BUNDER, 2016).

Durante a Idade Média, não houve uma evolução expressiva da tecnologia das argamassas e do concreto, havendo inclusive um declínio do uso da cal pozolânica (KAEFER, 2008).

2.3 O cimento hidráulico natural de Smeaton

Em 1756, o inglês John Smeaton (um dos primeiros engenheiros civis do mundo) iniciou a reconstrução do Farol de Eddystone, na Inglaterra (Figura 7).



Figura 7: Farol atual de Eddystone, Inglaterra

Fonte: Pedroso, 2009, p. 16

Esta obra foi considerada a primeira estrutura em concreto desde a época dos antigos romanos e um marco na evolução histórica do concreto. Como a rocha onde o farol seria construído ficava submersa na maré alta, as propriedades hidráulicas do cimento seria fator decisivo para a durabilidade da construção. Em seus estudos, Smeaton descobriu que o cimento hidráulico dependia de uma considerável quantidade de argila existente na rocha calcária (e que, portanto, era queimada junto com a cal). Ele conseguiu obter um produto de alta resistência por meio da calcinação de calcários moles e argilosos. Das várias substâncias adicionadas às argamassas, as que se mostraram mais eficientes para conferir as propriedades hidráulicas foram a pozolana e uma outra rocha vulcânica denominada tarras. Foi um dos primeiros estudos sistemáticos de um material de construção, resultando na determinação das características fundamentais do cimento hidráulico natural (KAEFER, 2008).

2.4 O cimento hidráulico natural de Parker

Apesar das investigações de Smeaton, a patente de um cimento hidráulico natural foi obtida somente por James Parker, em 1796, também na Inglaterra. Parker criou um tipo de cimento, a partir da mistura de rochas vulcânicas e cal, “que ficaria conhecido mais tarde por cimento romano, pois se acreditava erroneamente que aquele era o mesmo tipo usado 1800 anos antes pelos romanos” (HELENE e LEVY, 2003, p. 113). Parker fundou uma fábrica de cimento, na qual despedaçava e queimava em forno um calcário impuro contendo argila (uma pedra de nome septaria com núcleo argiloso), que, após calcinado, era moído e peneirado. A fábrica prosperou até 1810, quando a patente expirou (PEDROSO, 2009).

2.5 O cimento hidráulico artificial de Vicat

Em 1812, o químico e construtor francês Louis Vicat desenvolveu pela primeira vez o cimento hidráulico com bases científicas, calcinando uma mistura de cal, gesso e argila, sendo considerado o primeiro a desenvolver um cimento hidráulico artificial, por experimentar diferentes proporções nas misturas, o que podia resultar em diferentes tipos de cimentos. Em 1818, ele apresentou os resultados de seus estudos para a criação do cimento artificial e construiu com esse cimento a Ponte de Souillac, sobre o Rio Dordogne, em Souillac, França, hoje Ponte

Louis Vicat (Figura 8). Essa ponte é a primeira ponte de cimento artificial do mundo, com extensão de 180 metros e vãos de 22 metros, sem pozolana em suas fundações e sem armação, apenas concreto (BUNDER, 2016).

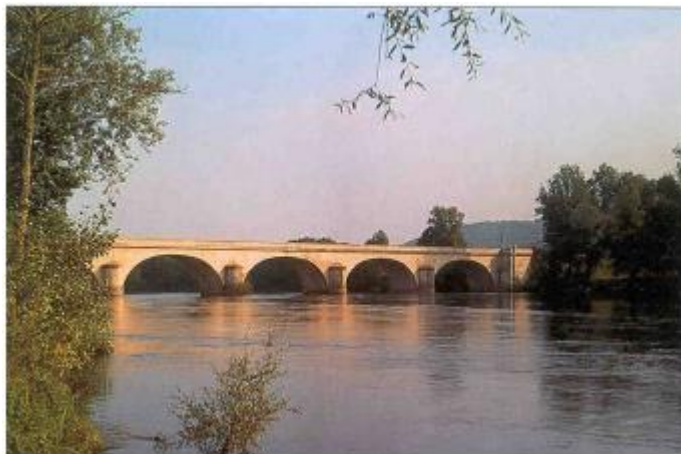


Figura 8: Ponte Louis Vicat sobre o Rio Dordogne, em Souillac, França

Fonte: Helene e Levy, 2003, p. 113

Kaefer (2008) cita que Vicat investigou os fatores que poderiam resultar em uma argamassa capaz de endurecer abaixo da água, misturando cal, gesso e argilas de diferentes tipos e em diferentes proporções, e que Vicat admitiu que não há argamassa hidráulica perfeita sem sílica e que toda cal que pode ser denominada hidráulica contém certa quantidade de argila.

Pedroso (2009), ao citar os experimentos de Smeaton e os de Vicat, conclui:

Cabe, porém, a Louis Vicat, construtor francês, a teoria explicativa para o comportamento e as propriedades físicas do cimento. Sua principal descoberta foi de que as propriedades cimentícias dependiam da proporção das misturas, que poderiam resultar em tipos diferentes de cimentos, inclusive mais resistentes do que os naturalmente encontrados (PEDROSO, 2009, p. 17).

2.6 O cimento Portland de Aspdin

Em 1824, o construtor inglês Joseph Aspdin experimentou a queima conjunta de pedras calcárias e argila, finamente moídas e misturadas a altas temperaturas. O material obtido era também moído, transformando-se em um pó

fino, com o qual era possível obter uma mistura que, após secar, tornava-se tão dura quanto as pedras utilizadas nas construções. A mistura não se dissolvia em água e foi patenteada por Aspdin com o nome de “Cimento Portland”, por apresentar cor e solidez semelhantes às rochas da ilha britânica de Portland (KAEFER, 2008).

Segundo Pedroso (2009), o cimento Portland surgiu da queima de calcário e argila, finamente moídos e misturados, sob altas temperaturas. Ao comparar o cimento de Aspdin com o cimento de nossos dias, ele afirma:

Apesar do nome, o cimento hoje conhecido como Portland não é o mesmo material patenteado por Aspdin. Isso porque o cimento moderno é obtido pela queima de uma mistura definida de rocha calcária e argila, finamente moídas, até sua fusão incipiente, resultando numa substância denominada clínquer. Os fornos de Aspdin eram precários demais para conseguirem obter clínquer, além da proporção da mistura não ser definida na patente (PEDROSO, 2009, p. 17).

2.7 O cimento Portland de Johnson

Em 1845, o também inglês Isaac Charles Johnson, da empresa *JB White and Sons*, encarregado por Aspdin para produzir o cimento Portland, aumentou a temperatura de queima da argila e calcário para 1400°C, produzindo o clínquer pela primeira vez na história (BUNDER, 2016).

Depois de Johnson, os avanços nos projetos de fornos, que aumentaram a uniformidade do clínquer, e os estudos sobre a melhor proporção da mistura para a obtenção de um clínquer mais duro, fizeram o desenvolvimento do concreto ganhar um impulso a partir da segunda metade do século XIX. O termo concreto ficou estabelecido para designar uma massa sólida resultante da combinação de cimento, areia, água e pedras (PEDROSO, 2009).

2.8 O concreto armado

Com o desenvolvimento do Cimento Portland, foi possível utilizar o concreto com mais frequência. Sua utilização possibilitou métodos construtivos inovadores

e novas formas arquitetônicas, contribuindo, dessa forma, para modernizar as construções (HELENE e LEVY, 2003).

Os novos desafios estruturais levaram ao desenvolvimento do concreto armado em meados do século XIX. Segundo Helene e Levy (2003), a primeira referência sobre a utilização de concreto armado pode ser encontrada na “*Encyclopedia of cottage, farm and village architecture*”, publicada na Inglaterra, em 1830.

Em 1849, o jardineiro francês Joseph Monier inventou o primeiro concreto armado. Ele criava vasos para flores em concreto armado, na época em que se desenvolvia na França a arte da rocagem (imitação de rocha), que era feita projetando-se cimento sobre telas de ferro. Depois, Monier passou a fazer terraços, reservatórios, lagos e bebedouros em concreto armado. “Em 1870, foi construída a primeira ponte de concreto armado, em Homersfield, Reino Unido, com vão livre de 16,5 metros” (HELENE e LEVY, 2003, p. 114).

O concreto armado é um tipo de estrutura que utiliza armações feitas com barras de aço. Essas ferragens são utilizadas devido à baixa resistência aos esforços de tração do concreto (HELENE e ANDRADE, 2010). A elevada resistência à tração do aço é combinada com a grande resistência à compressão do concreto (Figura 9).



Figura 9: Concreto armado (armadura de aço)

Fonte: [www.portaldoprojetista](http://www.portaldoprojetista.com.br), 2020

2.9 O concreto de alto desempenho

“A utilização criteriosa dos agregados e do cimento, somada ao surgimento dos aditivos redutores de água e a um rigoroso controle de produção, possibilitou, nas últimas décadas do século XX, o surgimento do concreto de alto desempenho” (HELENE e LEVY, 2003, p. 114).

Segundo Sponholz (1998), o concreto de alto desempenho foi precedido pelo chamado concreto de alta resistência. Devido ao fato de não somente a resistência mecânica, mas também o módulo de elasticidade e a durabilidade tornarem-se características desejadas para o concreto, surgiu assim o termo concreto de alto desempenho. O autor afirma que, além da maior durabilidade das construções, o concreto de alto desempenho permite reduzir a dimensão dos elementos estruturais em edifícios altos, principalmente nos pilares, obtendo-se com isso aumento de área útil dos andares e redução de peso estrutural.

Uma das principais aplicações do concreto de alto desempenho está em edifícios altos, pois permite a redução na dimensão dos elementos estruturais, principalmente nos pilares. Isto permite aumentar a área útil dos andares que produz um maior efeito nos pavimentos inferiores, térreo e garagem. Esta vantagem aumenta com o aumento da altura do edifício. Nos edifícios muito altos, os pilares de alto desempenho reduzem a oscilação por ação do vento, eliminando a necessidade de sistemas ativos e substituindo com vantagens as estruturas de aço. Outra vantagem do concreto de alto desempenho está na sua maior durabilidade (SPONHOLZ, 1998, p. 8).

Helene e Levy (2003) citam, como exemplo da utilização do concreto de alto desempenho, a construção do Complexo Olímpico de Barcelona, Espanha, em 1992, a Torre de Comunicações de Barcelona, com 268 m de altura, o Centro Empresarial Nações Unidas, em São Paulo, o Superior Tribunal de Justiça, em Brasília, o Museu de Arte Contemporânea, em Niterói, e o *L’Arc de la Défense*, em Paris.

Em 1998, foi concluída em Kuala Lumpur, Malásia, a construção das torres gêmeas Petronas Towers, em concreto de alto desempenho, com 452 metros de altura (HELENE E ANDRADE, 2010).

Helene e Andrade (2010) citam que, a partir da construção do Petronas Tower, 36 novos edifícios com altura superior a 300 metros, considerado o novo patamar para ser considerado arranha-céu, foram construídos ou estão em construção no mundo. Inclui-se, nesse total, o atualmente mais alto edifício do mundo, o Burj Khalifa, em Dubai, nos Emirados Árabes Unidos, com 828 metros de altura e 160 andares, inaugurado em 2010. Para a sua construção, foram consumidos 330.000 m³ de concreto e 55.000 ton de vergalhão de aço (Figura 12).



Figura 10: Burj Khalifa, Dubai, Emirados Árabes (em construção em 2007)

Fonte: Próprio autor, 2007

2.10 Os aditivos químicos e as adições minerais

A partir do desenvolvimento dos aditivos redutores de água, houve forte avanço no desenvolvimento de outras adições químicas, com o objetivo de melhorar certas propriedades do concreto. Diversos estudos foram realizados nas décadas de 1970 e 1980, obtendo-se produtos de melhor desempenho. Apareceram no mercado vários tipos de aditivos, como os modificadores de pega, modificadores de viscosidade, incorporadores de ar, entre outros, fornecidos, na sua maioria, na forma líquida. Nas duas últimas décadas do século XX, ao mesmo tempo em que se construía grandes estruturas de barragens, estruturas protendidas de pontes e edifícios altos, foram lançados no mercado aditivos redutores de água muito mais eficientes, os chamados superplastificantes. Esses produtos proporcionaram o desenvolvimento de misturas com baixa relação água/cimento e obtenção de concretos mais fluidos no estado fresco e mais resistentes no estado endurecido (ALVES, 2002).

A necessidade de produção de concretos de baixa porosidade e baixa permeabilidade, resistentes à ação da umidade e de outros agentes agressivos, como os cloretos e os sulfatos, proporcionou o desenvolvimento de produtos minerais em forma de pó, que adicionados à mistura, possibilitaram a produção de concretos mais duráveis. Atualmente, grande parte das adições minerais utilizadas em concretos é composta por resíduos provenientes de siderúrgicas e de outros processos industriais – como as escórias de alto forno, a sílica ativa e as cinzas volantes – os quais têm substituído de forma crescente as pozolanas naturais e as argilas calcinadas (FONSECA, 2010).

2.11 O concreto e a indústria da construção civil no Brasil

No Brasil, o concreto armado é o mais importante material estrutural da construção civil desde a primeira metade do século XX. Foi justamente com o aparecimento do concreto armado no início do século XX que se constituiu a indústria da construção civil em nosso país. Um pouco antes, em 1897, o cimento importado foi substituído por uma fábrica de capital nacional, a Cimento Rodovalho, hoje Votorantim. Em 1904, a “Revista da Poli” publicou um relato sobre os primeiros experimentos e ensaios de tração e compressão realizados pela Escola Politécnica

de São Paulo em amostras de cimentos existentes no mercado. No mesmo ano, surgiu a primeira citação ao concreto armado propriamente dito, documentada pela Escola Politécnica do Rio de Janeiro. A partir de 1913, com a construção do Edifício Guinle, em São Paulo, o concreto armado se afirmou definitivamente na construção civil brasileira (VASCONCELLOS, 2004).

Em 1930, foi concluída a construção do chamado Edifício A Noite (antigo edifício do Jornal A Noite), atual sede do Instituto Nacional da Propriedade Industrial (INPI), na Praça Mauá, Rio de Janeiro. Este edifício, com 102 m de altura, foi, na sua época, a maior construção estruturada em concreto armado do mundo. A partir daí, grandes obras em concreto armado se espalharam pelo país. Grandes quantidades de concreto e vergalhões de aço foram empregadas nessas obras. Para a construção da Usina Hidrelétrica de Itaipu, iniciada em 1975, foram utilizados 12.570.000 m³ de concreto até sua finalização, em 1982. Comparando a sua construção com a do Eurotúnel, que liga França e Reino Unido, sob o Canal da Mancha, foram utilizados 15 vezes mais concreto e o volume de escavações foi 8 vezes maior (BUNDER, 2016).

O uso disseminado do concreto protendido e do concreto de alto desempenho no Brasil, a partir das últimas décadas do século XX, possibilitou ao nosso país a construção de edifícios bastante altos. Dos dez edifícios mais altos do Brasil atualmente, oito ficam em Balneário Camboriú (Santa Catarina), um em Goiânia (Goiás) e outro em João Pessoa (Paraíba), alguns ainda em construção. São edifícios de 183 m a 280 m de altura. Entre eles, destaca-se o One Tower, em Balneário Camboriú (SC), que atingirá, ao concluir a sua construção, o recorde brasileiro de 280 m de altura (BUNDER, 2016).

3. CONSTITUINTES DO CONCRETO

Segundo Couto et al. (2013), o concreto é um material heterogêneo, constituído de cimento, água, agregado miúdo (areia), agregado graúdo (pedra ou brita) e ar. Com a finalidade de melhorar ou modificar suas propriedades básicas, ele pode conter aditivos químicos e adições minerais (Quadro 1).

Quadro 1: Constituintes do concreto

AGRUPAMENTO	CONSTITUINTES	OBSERVAÇÕES
Constituintes básicos	Cimento	Cimento Portland
	Água	Pode ter parte ou totalidade substituída por gelo
	Agregado miúdo	Areia natural ou pó de pedra beneficiado
	Agregado graúdo	Pedra britada ou seixo natural
Constituintes de melhoria das propriedades	Aditivos químicos	Redutores de água, plastificantes, modificadores de pega, modificadores de viscosidade, incorporadores de ar
	Adições minerais	Sílica ativa, pozolana, cinza volante, escória granulada de alto forno, metacaulim, fíler, cal, pó de pedra

Fonte: Próprio autor, 2021 (baseado em www.concrettem.com.br)

3.1 Cimento

O cimento Portland, componente aglomerante do concreto, é um pó fino com propriedades ligantes, que endurece sob a ação da água (Figura 13). Apresenta-se comercialmente com as siglas CP I, CP II, CP III, CP IV e CP V-ARI. Os tipos I, II, III e IV são fabricados com resistências à compressão de 25, 32 ou 40 MPa (limite inferior aos 28 dias) e o tipo V-ARI é fabricado com resistência à compressão de 34 MPa (limite inferior aos 7 dias) (ABNT NBR 16697:2018).



Figura 11: Cimento Portland utilizado em concretos

Fonte: www.portaldoconcreto.com.br, 2020

De acordo com Fonseca (2010), os componentes principais do cimento Portland são: cal (CaO), sílica (SiO₂), alumina (Al₂O₃), óxido de ferro (Fe₂O₃), magnésia (MgO), álcalis (Na₂O e K₂O) e sulfatos (SO₃). O autor ainda afirma que essas substâncias são aquecidas em forno a uma temperatura necessária para a clínquerização, moendo-se em seguida o clínquer resultante. E acrescenta que:

O cimento Portland fabricado hoje é constituído de clínquer, um material sinterizado e peletizado, resultante da calcinação, a uma temperatura aproximada de 1450°C, de uma mistura de calcário, argila e eventuais corretivos químicos de natureza silicosa, aluminosa ou ferrífera (FONSECA, 2010, p. 24).

Segundo Lima (1997), o cimento está diretamente ligado às características de resistência inicial e final, trabalhabilidade e características reológicas que o concreto venha a apresentar. A escolha do tipo de cimento a ser utilizado é fundamental e é função das necessidades requeridas para o produto final.

A Norma ABNT NBR 16697:2018 especifica os cimentos Portlands conforme o Quadro 2.

Quadro 2: Tipos de cimentos Portlands especificados pela ABNT

TIPO	SIGLA	CARACTERÍSTICAS
Cimento Portland Comum	CP I	Sem adição, exceto o gesso como regulador de pega
	CP I-S	Com adição de escória, pozolanas ou fíler (até 5%)
Cimento Portland Composto	CP II-E	Com adição de escória granulada de alto forno
	CP II-F	Com adição de fíler carbonático
	CP II-Z	Com adição de material pozolânico
Cimento Portland de Alto Forno	CP III	Teores maiores de escória do que o CP II-E
Cimento Portland Pozolânico	CP IV	Teores maiores de pozolanas do que o CP II-Z
Cimento Portland de Alta Resistência Inicial	CP V-ARI	Não contém adições. Processo especial de produção do clínquer (dosagem especial de calcário e argila)

Fonte: Próprio autor, 2021 (baseado na ABNT NBR 16697:2018)

3.2 Água

A adição de água possibilita as reações químicas de hidratação do cimento, que garantem as propriedades de resistência e durabilidade do concreto. Tem também a função de lubrificar as partículas de agregados para proporcionar o manuseio do concreto (ALVES, 2002).

Fonseca (2010) cita que, em presença de água, ocorrem reações no cimento Portland, que o transformam em agente ligante. Os silicatos e os aluminatos formam produtos de hidratação que dão origem à pasta de cimento endurecida.

Para melhorar a trabalhabilidade e facilitar o manuseio na aplicação, tem-se a tendência em adicionar água ao concreto, porém, o excesso de água compromete as suas propriedades mecânicas. A baixa relação água/cimento é fator fundamental para o aumento da resistência mecânica do concreto, notadamente a resistência à compressão. Segundo Lima (1997), a natureza do cimento influencia na demanda de água, admitindo-se uma determinada trabalhabilidade. E acrescenta:

Fator fundamental, apesar de não ser o único, para a obtenção de altas resistências mecânicas é a baixa relação água/cimento, que por alguns autores é tratada englobando-se as adições minerais na forma de fator água/materiais cimentícios. Os valores dos fatores a/c devem estar próximos daqueles necessários para uma completa hidratação do cimento (LIMA, 1997, p. 23).

Sobral (2000) afirma que a quantidade ótima de água na mistura permite obter a máxima densidade do concreto, o que concorrerá para maior resistência mecânica do mesmo, melhor aderência e ancoragem das armaduras, maior impermeabilidade e resistência aos agentes agressivos.

3.3 Agregados

Os agregados são materiais granulosos e inertes que entram na composição do concreto e representam cerca de 70 % de sua composição. Quanto à origem, são classificados em naturais (areias, cascalhos e pedra britada) e artificiais

(escórias de alto-forno, argila expandida, poliestireno expandido etc.) (ALVES, 2002).

De acordo com Fonseca (2010), os agregados utilizados para o concreto são classificados em agregados graúdos e agregados miúdos, conforme a dimensão das partículas. Os agregados graúdos são aqueles constituídos de partículas maiores do que 4,8 mm e os agregados miúdos aqueles de partículas menores do que 4,8 mm (Figura 14).



Figura 12: Agregados utilizados em concretos. (a) Agregado miúdo (areia). (b) Agregado graúdo (brita).

Fonte: www.portaldoconcreto.com.br, 2020

Almeida (2012) define como agregado miúdo a areia de origem natural ou resultante do britamento de rochas estáveis, cujos grãos passam pela peneira de 4,8 mm, e como agregado graúdo os pedregulhos ou a brita proveniente de rochas estáveis, cujos grãos ficam retidos na peneira de 4,8 mm. Entretanto, a ABNT NBR 7211:2019 define como agregado miúdo o agregado cujos grãos passam pela peneira com abertura de malha de 4,75 mm, e como agregado graúdo o agregado cujos grãos passam pela peneira com abertura de malha de 75 mm e ficam retidos na peneira com abertura de malha de 4,75 mm.

Por razões comerciais, as areias são classificadas em Areia Fina (de 0,06 mm a 0,2 mm), Areia Média (de 0,2 mm a 0,6 mm) e Areia Grossa (de 0,6 mm a

2,0 mm). E as britas são classificadas em Brita 0 (de 4,75 mm a 9,5 mm), Brita 1 (de 9,5 mm a 19 mm), Brita 2 (de 19 mm a 38 mm) e Brita 3 (de 38 mm a 75 mm).

A ABNT NBR 12655:2015 classifica os agregados segundo sua massa específica, definindo como agregados leves aqueles de massa específica menor ou igual a 2.000 kg/m^3 e como agregados densos ou pesados aqueles de massa específica maior ou igual a 3.000 kg/m^3 .

3.4 Aditivos químicos

Os aditivos químicos são produtos adicionados ao concreto no momento da mistura, com o objetivo de modificar certas características, seja quando ainda frescos ou durante a sua passagem ao estado endurecido. Eles atuam na tensão superficial, nas forças de atração entre as partículas de cimento e na velocidade das reações de hidratação durante a pega e endurecimento (SOBRAL, 2000).

A ABNT NBR 12655:2015 define os aditivos químicos como materiais adicionados ao concreto durante o processo de mistura, em uma quantidade não superior a 5% da massa de cimento contida na mistura, para modificar as propriedades do concreto, tanto no estado fresco quanto no estado endurecido.

Os aditivos químicos são fornecidos, na sua maioria, na forma líquida, prontos para uso (Figura 15).



Figura 13: Aditivos químicos utilizados em concretos

Fonte: www.revistaadnормas.com.br, 2019

Com a incorporação desses aditivos na mistura, o concreto pode ter sua trabalhabilidade, compacidade e resistência melhoradas, bem como sua retração, permeabilidade e absorção de água reduzidas. Segundo Fonseca (2010), os aditivos químicos mais usuais são:

Redutores de água, plastificantes e superplastificantes: são tensoativos, permitem reduzir a quantidade de água, diminuindo a retração, aumentando a resistência ou economizando aglomerante, além de melhorar a fluidez, a plasticidade e a trabalhabilidade dos concretos.

Aceleradores de pega: aceleram o endurecimento do concreto em tempo frio, quando a pega é retardada pela temperatura mais baixa, e aumentam a velocidade de crescimento da resistência, permitindo a desforma mais rápida.

Retardadores de pega: retardam o endurecimento do concreto, mantendo-o trabalhável durante o lançamento, ajudam na concretagem em tempo quente, quando a pega é acelerada pela temperatura mais alta, e mantêm o concreto plástico por um período maior, evitando juntas frias entre as sucessivas camadas lançadas.

Incorporadores de ar: melhoram a plasticidade do concreto, diminuem a possibilidade de segregação, reduzem a exsudação e aumentam a resistência do concreto aos ciclos de congelamento e descongelamento, sendo aplicável em concretos submetidos a grandes variações de temperatura.

Impermeabilizantes: reduzem a penetração de umidade e de elementos agressivos, agem por ação repulsiva em relação à água ou por obturação dos poros.

Produtores de gás ou espuma: produzem bolhas de gás ou de espuma na massa do concreto, dando origem aos concretos porosos, celulares ou aerados, de baixo peso específico e melhor desempenho no isolamento térmico e proteção contra o fogo.

Fungicidas, germicidas e inseticidas: controlam o crescimento de algas, fungos e líquens no concreto endurecido.

Inibidores de corrosão de armaduras: reduzem as taxas de corrosão das armaduras, utilizados em concretos submetidos à ação de cloretos.

A respeito dos superplastificantes, Lima (1997) cita que a quantidade de água para atender à trabalhabilidade do concreto é maior do que a ideal para atender às propriedades mecânicas. Sendo assim, para produzir concretos de alta resistência e de alto desempenho, há a necessidade de usar aditivos químicos superplastificantes. E acrescenta:

Os aditivos são substâncias que quando incorporadas adequadamente ao concreto modificam suas propriedades, conferindo, ao mesmo, características particulares. No caso dos CADs, os aditivos fundamentais são os superplastificantes, que são capazes de propiciar a obtenção conjunta de trabalhabilidade adequada com baixas relações a/c, ditos redutores de água de alto alcance ou ainda fluidificantes. Em DUCATTI (1993) e ALMEIDA (1990) encontram-se informações mais detalhadas sobre este tipo de aditivo que basicamente apresenta três tipos de composição: derivados sulfatos de melamina, derivados sulfatos de naftaleno e lignossulfatos (LIMA, 1997, p. 24).

“Esses aditivos superplastificantes ainda vieram possibilitar o pleno emprego de pozolanas de alta reatividade, para a produção de concretos de alto desempenho, sob a ótica da durabilidade” (HELENE E ANDRADE, 2010, p. 925). Isso porque essas pozolanas, por exemplo, a sílica ativa, têm como objetivo melhorar o desempenho mecânico e reduzir a porosidade do concreto, para a mesma relação água/cimento (HELENE E ANDRADE, 2010).

3.5 Adições minerais

Enquanto os aditivos químicos são utilizados para alterar as características do cimento, sem alterar sua proporção na composição do concreto, as adições minerais são utilizadas com o objetivo de somar ou substituir parte do cimento, por apresentarem propriedades semelhantes a este (FONSECA, 2010).

As adições minerais são produtos fornecidos em forma de pó (Figura 16) e são geralmente mais duros que os agregados convencionais utilizados no concreto. Por serem muito finos, eles atuam na redução da porosidade do concreto, inibindo a penetração de umidade e agentes agressivos, como os cloretos, além de

contribuir para o aumento da resistência à abrasão. Fonseca (2010) acrescenta que “As heterogeneidades na microestrutura da pasta de cimento hidratada, especialmente a existência de grandes poros e cristais na zona de transição, podem ser consideravelmente reduzidas com a introdução das partículas finas presentes nas adições minerais” (FONSECA, 2010, p. 50).



Figura 14: Sílica ativa utilizada em concretos

Fonte: www.inova.unicamp.br, 2020

As adições minerais mais usuais são a sílica ativa, cinza volante, cinza de casca de arroz, metacaulim, escória granulada de alto forno, fíler e pozolanas. Souza (2003) cita que a excelente atividade pozolânica dos resíduos provenientes da indústria ferro-silício e silício-metálico fez com que esses materiais fossem denominados pozolanas de alta reatividade. Assim, as principais pozolanas altamente reativas em uso atualmente no concreto são a sílica ativa e o metacaulim (SOUZA, 2003).

Sponholz (1998) afirma que o concreto de alto desempenho é obtido com agregados comuns de boa qualidade, cimento Portland comum, sílica ativa (em substituição parcial do cimento, entre 5 e 20 % de seu peso ou volume) e aditivos redutores de água (plastificantes e superplastificantes). E argumenta que, às vezes, ainda pode-se utilizar outros materiais cimentantes, tais como cinza volante e escória granulada de alto forno.

4. PROPRIEDADES DO CONCRETO

4.1 Propriedades do concreto no estado fresco

O concreto é considerado fresco até o momento em que tem início a pega do aglomerante, que é o período inicial de solidificação da pasta. Pode-se dizer também que o concreto “é denominado fresco enquanto a pasta estiver no estado fluido ou plástico e permitir uma reorganização das partículas constituintes por uma ação dinâmica qualquer” (SOBRAL, 2000, p. 5). As principais propriedades a observar neste estado são consistência, trabalhabilidade e homogeneidade.

4.1.1 Consistência

A consistência é a maior ou menor capacidade que o concreto fresco tem de se deformar, ou seja, é uma propriedade relacionada ao estado de fluidez da mistura, é a facilidade com que o material poderá fluir durante o lançamento. Na mistura, a película de água formada na superfície dos sólidos altera o atrito interno entre as partículas dos agregados, resultando em um concreto mais consistente ou menos consistente. A consistência do concreto é influenciada basicamente pela quantidade de água empregada, pela granulometria e forma dos grãos dos agregados, pelo teor de finos na mistura e pela presença de aditivos plastificantes (ALVES, 2002).

O principal fator que influi na consistência do concreto é o teor água/mistura seca, sendo mistura seca a mistura de cimento e agregados. A consistência é o componente físico mais importante da trabalhabilidade e “traduz propriedades intrínsecas da mistura fresca relacionadas com a mobilidade da massa e a coesão entre os elementos componentes, tendo em vista a uniformidade e a compacidade do concreto” (SOBRAL, 2000, p. 6).

4.1.2 Trabalhabilidade

A trabalhabilidade é a maior ou menor facilidade que o concreto fresco tem de ser lançado e adensado. Ela é definida como a propriedade de ser misturado, transportado, lançado e vibrado sem mudança de sua homogeneidade. É uma

propriedade que depende da mistura e das condições de fabricação, transporte, lançamento e adensamento do concreto na obra (ALVES, 2002).

A *American Society for Testing and Materials* (ASTM C-125) associa a trabalhabilidade à propriedade que determina o esforço necessário para manipular uma quantidade de concreto recém misturado com uma perda mínima de homogeneidade (BOGGIO, 2000).

O concreto fresco é considerado trabalhável quando apresenta consistência e dimensão máxima do agregado adequadas ao tipo da obra a que se destina e aos métodos de lançamento, adensamento e acabamento que vão ser adotados, envolvendo totalmente as armaduras e sendo adequadamente compactado, sem segregação ou exsudação (SOBRAL, 2000).

4.1.3 Homogeneidade

A homogeneidade é definida como a manutenção das características do concreto fresco em toda a sua massa, durante as operações de fabricação e concretagem, garantida pela coesão que mantém os materiais unidos grão a grão, ou seja, é a distribuição uniforme dos agregados graúdos dentro da massa do concreto, estando totalmente envolvidos pela pasta, sem apresentar desagregação (ALVES, 2002).

O espalhamento do concreto deve acontecer sem perda de coesão, sem segregação do agregado graúdo, e sem manifestações de exsudação na superfície do concreto. Sobral (2000) argumenta que a segregação é entendida como a separação dos constituintes da mistura, impedindo a obtenção de um concreto razoavelmente uniforme, e que ela ocorre quando os grãos maiores do agregado tendem a separar-se dos demais, depositando-se no fundo das fôrmas. Uma homogeneidade inadequada é também observada na segregação dos grãos maiores do agregado, quando os concretos se deslocam mais rapidamente, no caso de transporte em calhas.

4.2 Propriedades do concreto no estado endurecido

O concreto é considerado endurecido após o fim da pega do aglomerante, ou seja, quando a pasta se solidifica completamente. As principais propriedades a observar neste estado são resistência à compressão, resistência à tração, módulo de elasticidade, porosidade e permeabilidade. Alhadas (2008) acrescenta a resistência aos agentes agressivos e a durabilidade, como propriedades importantes do concreto. E afirma que os parâmetros de controle são a relação água/cimento, o grau de adensamento e o calor gerado na reação do cimento com a água, entre outros.

4.2.1 Resistência à compressão

Nos concretos, a resistência à compressão é definida como a tensão última aplicada ao corpo de prova que provoca a desagregação do material que o compõe. Um dos ensaios mais importantes é o ensaio de resistência à compressão axial simples, utilizado principalmente para determinar a relação entre a tensão e a deformação normal (ALMEIDA, 2012).

O concreto é um material que apresenta tipicamente boa resistência à compressão. A resistência à compressão geralmente é considerada a propriedade mais importante do concreto, pois além de oferecer uma estimativa geral da qualidade da estrutura, as propriedades como resistência à tração, módulo de deformação longitudinal e relação tensão-deformação são expressas em termos de resistência à compressão (TAKEUTI, 1999).

Boggio (2000) concorda que o ensaio de resistência à compressão axial simples, além de fornecer uma indicação geral da qualidade do material, possibilita estimar, de forma indireta, outras características do material, como as resistências à tração e à flexão e o módulo de deformação.

4.2.2 Resistência à tração

A resistência à tração do concreto desempenha um papel importante em certos problemas como a fissuração, a deformação, o esforço cortante, a aderência e deslizamento das armaduras. Segundo Lima (1997), “A resistência à tração é

importante porque é baseado nela que se avalia o comportamento do concreto, no que diz respeito ao controle da fissuração” (LIMA, 1997, p. 30).

A resistência à tração apresenta uma relação com a resistência à compressão. É amplamente difundido que o valor da resistência à tração do concreto corresponde a 10% do valor de sua resistência à compressão. De acordo com Alves (2002), a razão entre a resistência à tração e a resistência à compressão é geralmente entre 0,07 a 0,11 e que os fatores que influem na resistência à tração do concreto são composição mineralógica dos agregados, textura superficial dos agregados, incorporadores de ar e adições minerais.

Existem três ensaios disponíveis para a obtenção do valor da resistência à tração: resistência à tração por compressão diametral, resistência à tração na flexão e resistência à tração direta. Entretanto, quando não se dispõe de dados experimentais, é usual prever a resistência característica à tração por meio de equações, através de critérios estabelecidos por normas internacionais, ou seja, a resistência característica à tração (valor médio ou valor característico da resistência à tração) pode ser obtida por meio de equações, a partir da resistência característica de compressão (LIMA, 1997).

4.2.3 Módulo de elasticidade

O módulo de elasticidade (ou módulo de deformação ou módulo de Young) define a relação entre tensão e deformação em um material no regime de elasticidade linear de uma deformação uniaxial. A partir dos dados de tensão e deformação obtidos nos ensaios de compressão axial simples em corpos de prova de concreto é possível construir o diagrama tensão-deformação. O módulo de elasticidade pode ser obtido por meio de equações, a partir da resistência característica de compressão (LIMA, 1997).

Alves (2000) afirma que, devido às dificuldades em medir-se simultaneamente a carga aplicada e a deformação gerada por essa carga, pesquisadores têm tentado achar uma maneira simples de estimar o módulo de deformação do concreto, a partir da resistência à compressão, por meio de correlações.

4.2.4 Porosidade e permeabilidade

A necessidade de inserir o fator durabilidade no dimensionamento das estruturas de concreto tem estimulado o emprego de aditivos químicos e adições minerais na produção do concreto. Segundo Fonseca (2010), concretos com baixa porosidade capilar são de extrema importância para a durabilidade das construções, uma vez que evitam a penetração de agentes agressivos juntamente com a água.

Boggio (2000) afirma que, devido ao fato de que a permeabilidade e a capacidade de absorção do concreto serem funções diretas da porosidade (existência de vazios e poros capilares), a durabilidade das estruturas de concreto depende do controle e da minimização dessas características.

Sabe-se que quanto maior o calor de hidratação do cimento, maior a tendência ao aparecimento de fissuras no concreto. De acordo com Alves (2002), durante o processo de hidratação, o espaço inicialmente ocupado pelo cimento e a água vão sendo substituídos pelo cimento e pelos produtos de sua hidratação. A porosidade é constituída pelos vazios capilares que dependem do fator A/C e do grau de hidratação do cimento.

A respeito da resistência à compressão e da porosidade, Alhadas (2008) cita que:

Na prática da engenharia, considera-se que a resistência de um concreto a uma certa idade, curado em água a uma temperatura estabelecida, depende de apenas dois fatores: a relação água/cimento (a/c) e o grau de adensamento (NEVILLE, 1997). Neville ressalta ainda que a relação a/c determina a porosidade da pasta de cimento endurecida em qualquer estágio da hidratação (ALHADAS, 2008, p. 29).

Lima (1997) afirma que o emprego da sílica ativa, em combinação com aditivos químicos do tipo superplastificantes, viabiliza a produção de concreto com características de alta resistência mecânica, alta coesão, alta impermeabilidade, alta resistência aos meios agressivos e maior durabilidade.

5. SUPERPLASTIFICANTES

Os superplastificantes são polímeros tensoativos aniônicos de cadeia longa. Quando absorvidos pelas partículas de cimento, os tensoativos ajudam a reduzir a tensão superficial da água circundante e aumentam a fluidez do concreto. Através da absorção de suas moléculas nos grãos de cimento, ocorre a repulsão das partículas de cimento, causando a dispersão entre as mesmas (SPONHOLZ, 1998).

Segundo Fonseca (2010), os tensoativos permitem reduzir a quantidade de água nos concretos, diminuindo a retração, aumentando a resistência ou economizando aglomerante, além de melhorar a fluidez, a plasticidade e a trabalhabilidade dos concretos.

Conforme Alves (2000), os superplastificantes são classificados, de acordo com a sua composição química, em quatro categorias: condensados de formaldeído e melamina sulfonada, condensados de formaldeído e naftaleno sulfonado, lignosulfonados modificados e copolímeros.

Sponholz (1998) observa que os mais utilizados mundialmente são os condensados de formaldeído e melamina sulfonada (SMF), desenvolvidos pelos alemães, e os condensados de formaldeído e naftaleno sulfonado (SNF), desenvolvidos pelos japoneses. E acrescenta que os aditivos superplastificantes são geralmente comercializados em forma líquida (diluídos em água) e com adição de substâncias que melhoram sua estabilidade de estocagem e corrigem o pH.

Lima (1997) afirma que os mecanismos de atuação dos superplastificantes no concreto, proporcionados por sua natureza tensoativa, são: redução da tensão superficial da água, que diminui a coesão das moléculas da água e aumenta o seu poder de penetração; efeito lubrificante, em que as moléculas do aditivo são adsorvidas pelas partículas sólidas da mistura, diminuindo o atrito existente entre elas; e efeito dispersor, pois a adsorção das moléculas do aditivo pelas partículas sólidas as torna eletricamente carregadas, sendo que as cargas iguais se repelem, promovendo a dispersão, notadamente das partículas de cimento, reduzindo o atrito interno e expondo uma maior superfície específica do cimento à hidratação,

tornando-o mais ativo. E conclui que a soma desses fatores permite a redução da água necessária para a trabalhabilidade do concreto.

6. SÍLICA ATIVA

A sílica ativa, também conhecida como sílica volatizada, sílica de fumo ou microsílica, é um subproduto dos fornos usados nas indústrias de silício metálico e ligas ferro-silício. Durante o processo de redução do quartzo em silício, realizado em altíssimas temperaturas, é gerado um gás (SiO) que, ao sair do forno, resfria-se, condensa-se e oxida-se, formando partículas muito finas de sílica amorfa (SiO_2) (LIMA, 1997).

Fonseca (2010) afirma que a sílica ativa é uma pozolana artificial altamente reativa. Muito utilizada em concretos de alto desempenho, é uma das adições minerais de maior reatividade, graças à sua natureza amorfa e ao tamanho extremamente pequeno de suas partículas, apresentando formato esférico e diâmetro cem vezes menor que o do cimento.

Sendo a sílica ativa uma das adições de maior reatividade, sua incorporação ao concreto proporciona melhor estabilidade à mistura no estado fresco e alta resistência e estabilidade ao concreto no estado endurecido. “Concretos de alta resistência, contendo superplastificantes para baixo fator água/cimento e uma pozolana de boa qualidade, possuem grande impermeabilidade e durabilidade” (FONSECA, 2010, p. 48).

Sobre este assunto, Lima (1997) cita que o emprego da sílica ativa em percentuais que variam de 4% a 15% do peso do cimento, em combinação com aditivos químicos do tipo superplastificantes, viabiliza a produção de concreto com alto desempenho. Com essa combinação, pode-se obter concretos com características de alta resistência mecânica, minimização da exsudação e segregação, maior durabilidade, maior trabalhabilidade, alta coesão, alta impermeabilidade e alta resistência aos meios agressivos.

CAPÍTULO II: ARTIGO CIENTÍFICO

AVALIAÇÃO COMPARATIVA DAS PROPRIEDADES DO CONCRETO CONVENCIONAL E DO CONCRETO COM ADIÇÃO DE SUPERPLASTIFICANTE E SÍLICA ATIVA

Leôncio de Almeida Souza*

RESUMO

As crescentes exigências por maior resistência mecânica e durabilidade das estruturas de edificações levaram a processos de melhoramento do concreto em muitos países, impulsionando a indústria da construção civil em todo o mundo. Para aprimorar as propriedades do concreto, passou-se a desenvolver produtos e materiais que pudessem melhorar o seu desempenho. Adicionados aos constituintes básicos (cimento, água e agregados), os aditivos químicos e as adições minerais se consagraram como insumos capazes de aumentar a resistência mecânica e a durabilidade das estruturas de concreto. Entretanto, diversos autores alertam que a eficiência de um aditivo depende de vários fatores, tais como, a composição química do próprio aditivo e do cimento, a dosagem e a proporção da mistura, o momento de incorporação do aditivo à mistura, a temperatura de reação e o teor de sulfato álcali solúvel presente no cimento. Para o objetivo deste trabalho, foram realizados ensaios de resistência à compressão e medição da absorção de água de um concreto convencional, um concreto com adição de superplastificante e um concreto com adição de superplastificante e sílica ativa. Os resultados mostraram um baixo desempenho dos concretos que receberam as adições. Foram levantadas as hipóteses para esse comportamento e listadas as recomendações para trabalhos futuros.

Palavras-chave: Concreto; Aditivos Químicos; Adições Minerais.

*Institutos Superiores de Ensino do CENSA - ISECENSA - Laboratório de Engenharia Civil - Rua Salvador Correa, 139, Centro, Campos dos Goytacazes, RJ, CEP: 28035-310, Brasil
e-mail: leonciosouza@isecensa.edu.br

COMPARATIVE EVALUATION OF THE PROPERTIES OF CONVENTIONAL CONCRETE AND CONCRETE WITH ADDITION OF SUPERPLASTICIZER AND ACTIVE SILICA

*Leôncio de Almeida Souza**

ABSTRACT

The increasing demands for greater mechanical strength and durability of building structures have led to concrete improvement processes in many countries, boosting the construction industry worldwide. In order to improve the properties of concrete, products and materials that could improve its performance were developed. Added to the basic constituents (cement, water and aggregates), chemical additives and mineral additions have established themselves as inputs capable of increasing the mechanical strength and durability of concrete structures. However, several authors warn that the efficiency of an additive depends on several factors, such as the chemical composition of the additive itself and the cement, the dosage and proportion of the mixture, the time of incorporation of the additive into the mixture, the reaction temperature and the soluble alkali sulfate content present in the cement. For the purpose of this paper, compressive strength tests and measurement of water absorption of a conventional concrete, a concrete with addition of superplasticizer and a concrete with addition of superplasticizer and silica fume were carried out. The results showed a low performance of the concretes that received the additions. Hypotheses for this behavior were raised and recommendations for future work were listed.

Keywords: Concrete; Chemical Additives; Mineral Additions.

*CENSA Superior Education Institutes - ISECENSA - Civil Engineering Laboratory - Rua Salvador Correa, 139, Centro, Campos dos Goytacazes, RJ, CEP: 28035-310, Brazil
e-mail: leonciosouza@isecensa.edu.br

1. INTRODUÇÃO

1.1 Justificativa e relevância

Essa pesquisa se justifica pelas tendências atuais do setor da construção civil em obter e utilizar concretos de alta resistência e de alto desempenho nas edificações. Ao longo do século XX, a busca por maior resistência mecânica das estruturas de concreto fez surgir o termo concreto de alta resistência (CAR). Nas últimas décadas deste mesmo século, surgiu o termo concreto de alto desempenho (CAD), pelo fato de não somente a resistência mecânica, mas também o módulo de elasticidade e a durabilidade tornarem-se características desejadas para o concreto (SPONHOLZ, 1998). Assim, a necessidade de aprimorar essas propriedades levou ao desenvolvimento de aditivos químicos e adições minerais que pudessem aumentar a resistência mecânica e a durabilidade do concreto.

Os aditivos químicos são produtos fornecidos normalmente na forma líquida. Com a incorporação desses aditivos na mistura, o concreto pode ter sua trabalhabilidade, compacidade e resistência melhoradas, bem como sua retração, permeabilidade e absorção de água reduzidas. Segundo Fonseca (2010), os aditivos químicos mais usuais são os redutores de água, plastificantes, superplastificantes, aceleradores de pega, retardadores de pega, incorporadores de ar, impermeabilizantes, produtores de gás ou espuma, inibidores de corrosão de armaduras, fungicidas, germicidas e inseticidas.

A respeito dos superplastificantes, Lima (1997) cita que a quantidade de água para atender à trabalhabilidade do concreto é maior do que a ideal para atender às propriedades mecânicas. Sendo assim, para produzir concretos de alta resistência e de alto desempenho, há a necessidade de usar aditivos químicos superplastificantes.

As adições minerais, por sua vez, são produtos fornecidos em forma de pó. Por serem muito finos, esses produtos atuam na redução da porosidade do concreto, inibindo a penetração de umidade e agentes agressivos, como os cloretos e os sulfatos, além de contribuir para o aumento da resistência à abrasão. As adições minerais mais usuais são a sílica ativa, cinza volante, cinza de casca de

arroz, metacaulim, escória granulada de alto forno, fíler e pozolanas. Souza (2003) cita que as principais pozolanas altamente reativas em uso atualmente no concreto são a sílica ativa e o metacaulim.

Sponholz (1998) afirma que o concreto de alto desempenho é obtido com agregados comuns de boa qualidade, cimento Portland, sílica ativa e aditivos redutores de água (plastificantes e superplastificantes). E argumenta que, às vezes, ainda pode-se utilizar outros materiais cimentantes, tais como cinza volante e escória granulada de alto forno.

Segundo Helene e Andrade (2010), os aditivos superplastificantes vieram possibilitar o pleno emprego de pozolanas de alta reatividade, para a produção de concretos de alto desempenho, especialmente no aspecto da durabilidade. Isso porque essas pozolanas, por exemplo a sílica ativa, têm como objetivo melhorar o desempenho mecânico e reduzir a porosidade do concreto, para a mesma relação água/cimento.

Isso se torna relevante, no momento em que, no Brasil, o concreto de alto desempenho vem ampliando a sua utilização e se consolidando como uma tecnologia capaz de aumentar a qualidade e a durabilidade das construções.

Em matéria intitulada “Concreto de alto desempenho se solidifica no Brasil”, publicada no Portal Itambé, da Empresa Cimento Itambé, Paraná, em 04/10/2017, o jornalista Altair Santos cita que desde a publicação da Norma de Desempenho (ABNT NBR 15575:2013) os chamados concretos duráveis e de alto desempenho vêm ampliando seu mercado no Brasil. O engenheiro civil e professor-doutor da Escola de Engenharia Civil da Universidade Federal de Goiás (UFG), Oswaldo Cascudo, entrevistado nesta matéria, explica que obras especiais, como pontes, viadutos e grandes estruturas, são hoje as que mais demandam concretos de alto desempenho. “Esses concretos, obviamente, incluem aditivos, sejam eles plastificantes, superplastificantes ou aditivos de alta capacidade de redução de água. Eles também podem receber adições minerais, como as superpozolanas, que propiciam microestruturas muito fechadas, praticamente impedindo a ação de agentes agressivos. O resultado é uma altíssima durabilidade, o que explica as vantagens dos concretos de alta resistência e de alto desempenho”, define.

Em artigo publicado no Portal Sebrae, intitulado “Use a tecnologia para aumentar a produtividade na construção civil”, atualizado em 03/12/2019, o concreto de alto desempenho aparece como uma das tecnologias disponíveis para o setor, capaz de aumentar a produtividade e garantir a competitividade das empresas de construção civil. Os materiais citados no artigo (terras soldadas, monoforte, lajes mistas, painéis de EPS e microconcreto de alto desempenho) são algumas alternativas de materiais modernos e econômicos, que oferecem maior qualidade e praticidade para o trabalho.

Neste cenário brasileiro de exigências por qualidade e durabilidade das edificações, de crescimento da indústria da construção civil e investimentos no setor, proliferam normas técnicas ligadas à especificação do concreto e desempenho de edificações. As tendências do setor justificam a corrida pelo desenvolvimento de novos materiais e a busca do melhoramento do concreto convencional que possam garantir os padrões exigidos, a produtividade e a competitividade no mercado.

Este trabalho se propõe, desta maneira, avaliar o comportamento da resistência à compressão e da absorção de água de um concreto, ao se adicionar à mistura um superplastificante e a sílica ativa.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

A presente pesquisa tem como objetivo geral comparar, por meio de ensaios laboratoriais, as propriedades do concreto convencional e do concreto com adição de superplastificante e sílica ativa.

1.2.2 Objetivos específicos

- Produzir em laboratório um concreto convencional, um concreto com adição de superplastificante e um concreto com adição de superplastificante e sílica ativa.
- Realizar ensaios de resistência à compressão e medir a absorção de água de cada concreto, na idade de 28 dias, e comparar os resultados obtidos.

2. REVISÃO BIBLIOMÉTRICA

BIBLIOMETRIA					
Curso: Engenharia Civil					
Título: Avaliação Comparativa das Propriedades do Concreto Convencional e do Concreto com Adição de Superplastificante e Sílica Ativa					
Autor: Leôncio de Almeida Souza					
Orientador: Diogo Pereira dos Santos Kropf					
Fonte de Referências Bibliográficas	Antes 2005	2005-2010	2010-2015	2015-2020	Total
TCC (Graduação e PG <i>lato sensu</i>):					
ISECENSA					
IFF					
UFF					
Outras:					
Subtotal					
Dissertações de Mestrado:					
UFF			1		1
UENF					
UFRJ					
PUC					
USP	1				1
UFMG		1	2		3
UFSC	1				1
UFRGS	3				3
Outras:					
Subtotal					
Teses de Doutorado:					
UFF					
UENF					
UFRJ					
PUC					
USP	1				1
UFMG					
UFSC					
UFRGS	1				1
Outras:					
Subtotal					
Artigos em Anais de Congresso:					
ENESEP					
SIMPEP					
ICIEOM					
POMS					
Congresso Nacional de Excelência em Gestão					
Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional					
Outros:					
Subtotal					

Artigos em Periódicos Nacionais:					
Revista Produção on-Line					
Gestão & Produção					
Pesquisa & Desenvolvimento Engenharia de Produção					
Sistemas & Gestão					
Revista Gestão Industrial					
Revista de Gestão da Tecnologia e Sistemas de Informação					
Revista Eletrônica Produção & Engenharia					
Boletim Técnico Organização & Estratégia (O&E)					
GEPROS					
Revista Gestão e Tecnologia de Projetos					
Revista Brasileira de Gerenciamento de Projetos					
Revista Gestão e Projetos					
Outros:	1	3	2	1	7
Subtotal					
Artigos em Periódicos Internacionais:					
Brazilian Journal of Operations & Production Management					
Revista Production					
Journal of Management Studies					
Harvard Business Review					
European Management Journal					
Journal of Management					
International Business Review					
Outros:					
Subtotal					
Livros:					
	2		1		3
Total	10	4	6	1	21

3. METODOLOGIA

Para o objetivo deste trabalho, foram acrescentados à mistura do concreto um aditivo químico e uma adição mineral que pudessem contribuir para o aumento da resistência à compressão e redução da porosidade. Foram utilizados um aditivo químico superplastificante, com a finalidade de reduzir a quantidade de água de amassamento, e a sílica ativa, com o objetivo de reduzir a porosidade e a permeabilidade do concreto.

A caracterização dos materiais, dosagem, produção dos corpos de prova, cura e medição da absorção de água foram realizadas no Laboratório de

Engenharia Civil do ISECENSA (Institutos Superiores de Ensino do CENSA), enquanto o ensaio de resistência à compressão foi realizado no Laboratório de Engenharia Civil da UENF (Universidade Estadual do Norte Fluminense).

3.1 Equipamentos

Foram utilizados neste trabalho os seguintes equipamentos de laboratório:

- Balança digital eletrônica de precisão da marca Marte, modelo MS20K1, capacidade máxima de 20 kg.
- Betoneira elétrica da marca CSM, com capacidade de 145 litros.
- Moldes metálicos cilíndricos para corpos de prova nas dimensões de 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura.
- Baldes, latas, bandejas, colher de pedreiro e haste de socamento.
- Frasco de Chapman, recipientes e paquímetro.
- Peneiras metálicas de análise granulométrica das marcas Solotest e Contenco.
- Estufa elétrica da marca Deleo.
- Prensa hidráulica da marca Solotest, capacidade de 100 tf.

3.2 Materiais e métodos

3.2.1 Caracterização dos materiais

A areia e a brita utilizadas neste estudo tiveram suas características determinadas em laboratório, enquanto as características dos outros materiais foram obtidas nas fichas técnicas dos fabricantes.

a) Cimento

Para o presente trabalho, foi escolhido o cimento Portland Mauá CP II F-32, fabricado pela Holcim. Trata-se de um cimento produzido com adição de fíler carbonático (calcário moído) e apresenta, em sua composição, 75% a 89% em massa de clínquer mais gesso e 11% a 25% em massa de material carbonático. As principais características e a composição química deste cimento estão apresentadas no Quadro 3 e Quadro 4.

Quadro 3: Propriedades físicas e químicas do cimento Portland CP II F-32

Estado físico	Sólido, pó cinza
Odor	Sem cheiro
Massa específica aparente	0,9 a 1,2 g/cm ³ a 20 °C
Massa específica absoluta	2,8 a 3,2 g/cm ³ a 20 °C
Solubilidade em água	Até 1,5 g/l a 20 °C
pH em solução aquosa	12 a 14

Fonte: Ficha técnica do produto

Quadro 4: Composição química do cimento Portland CP II F-32 (%)

Óxido de alumínio (Al ₂ O ₃)	5,01
Óxido de cálcio (CaO)	60,46
Óxido de cálcio livre (CaO)	1,4
Óxido de ferro (Fe ₂ O ₃)	2,37
Óxido de magnésio (MgO)	1,73
Dióxido de silício (SiO ₂)	17,69
Trióxido de enxofre (SO ₃)	1,82
Sulfato de cálcio (CaSO ₄)	3,09
Resíduo insolúvel	3,23
Álcalis totais	1,74
Álcalis solúveis em água	1,25

Fonte: Ficha técnica do produto

b) Areia

O agregado miúdo utilizado na produção dos concretos foi uma areia natural média de natureza quartzosa. A análise granulométrica foi realizada por meio de peneiramento mecânico, a massa específica, pelo método do frasco de Chapman, a massa unitária, por pesagem e medição de volume, enquanto o teor de umidade foi determinado por diferença de massa quando úmida e depois de secagem por 4 dias em estufa. O Quadro 5 e a Figura 15 apresentam a análise granulométrica e a curva granulométrica da areia, respectivamente.

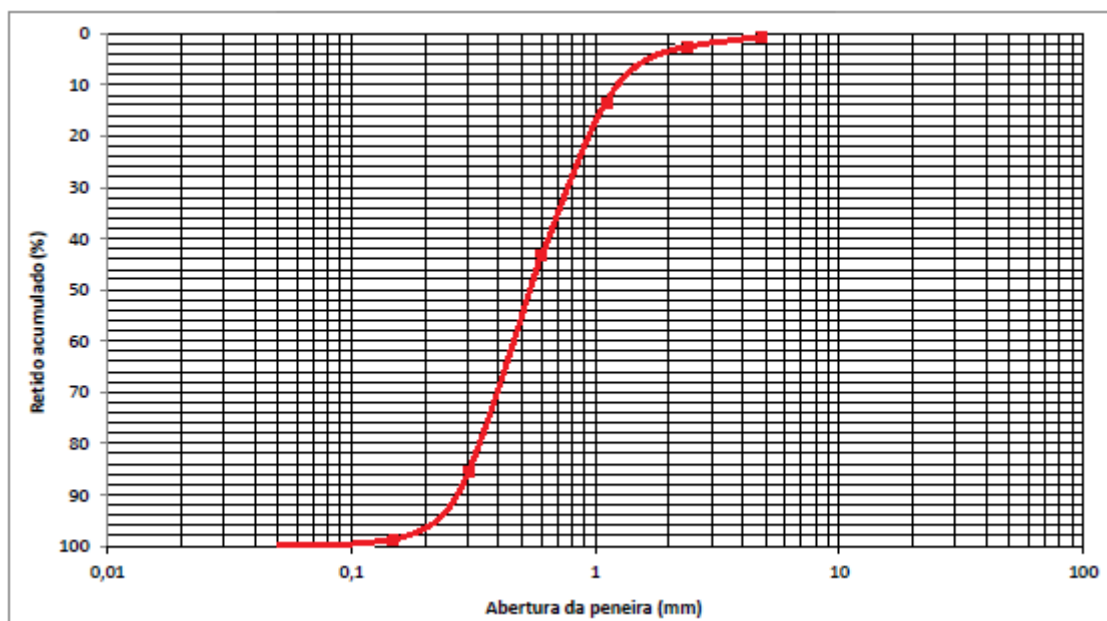
Quadro 5: Análise granulométrica da areia

Peneiras (mm)	Massa retida (g)	Retida individual (%)	Retida acumulada (%)
4,8	4,2	0,423	0,423
2,4	31,7	3,192	3,615
1,2	101,7	10,242	13,857
0,6	292,2	29,426	43,283
0,3	417,4	42,034	85,317
0,15	136,0	13,696	99,013
Fundo	9,8	0,987	100,000
Total	993,0	100,000	245,508
DMC = 2,4 mm		MF = 245,508/100 = 2,46	

Valor do DMC = peneira que retém o acumulado imediatamente menor do que 5 %.
 Cálculo do MF = não considera no somatório o retido acumulado no fundo.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021

Figura 15: Curva granulométrica da areia



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021

Para a determinação da massa específica da areia, utilizou-se o Método de Chapman, por meio de duas amostras de 500 g de areia saturada. Foi colocado água até a divisão de 200 cm³ do frasco de Chapman. Em seguida, foi introduzida uma amostra de 500 g de areia, agitando-se o frasco para eliminar os vazios. Após uns minutos de repouso, foi feita a leitura do nível atingido pela água. Depois de

repetir o procedimento com a outra amostra, foi determinada a massa específica de cada amostra, dividindo-se 500 g pelo volume da areia medida no frasco (em cm^3) menos 200. Por fim, obteve-se a média dos dois valores (Quadro 6).

Quadro 6: Massa específica da areia

Ensaio	1	2	Média
Massa da areia (g)	500	500	
Volume da areia no frasco de Chapman (cm^3)	391	390	
Massa específica real (cm^3)	2,6178	2,6316	2,6247

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021

Foi obtida a massa unitária da areia e a sua caracterização (Quadros 7 e 8).

Quadro 7: Massa unitária da areia

Ensaio	1	2
Massa areia + recipiente (kg)	0,1702	0,1693
Massa recipiente (kg)	0,0131	0,0121
Massa areia (kg)	0,1571	0,1572
Volume recipiente (dm^3)	0,1130	0,1126
Massa unitária (kg/dm^3)	1,3903	1,3961
Massa unitária média (kg/dm^3)	1,3932	

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021

Quadro 8: Caracterização da areia

Massa específica (kg/m^3)	2.625
Massa unitária solta - M_{UM} (kg/m^3)	1.393
Dimensão máxima característica - DMC (mm)	2,4
Módulo de finura - MF	2,46
Umidade (%)	5

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021

c) Brita

O agregado graúdo utilizado foi uma pedra britada (brita “0”), com dimensão máxima característica estimada em 12,5 mm e massa específica estimada em

2.700 kg/m³, baseando-se em trabalhos de outros autores. Foi possível analisar em laboratório apenas a massa unitária. As principais características desta brita estão dispostas nos Quadros 9 e 10.

Quadro 9: Massa unitária da brita

Ensaio	1	2
Massa brita + recipiente (kg)	0,9219	0,9195
Massa recipiente (kg)	0,0557	0,0524
Massa brita (kg)	0,8662	0,8671
Volume recipiente (dm ³)	0,5776	0,5706
Massa unitária (kg/dm ³)	1,4996	1,5196
Massa unitária média (kg/dm ³)	1,5096	

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021

Quadro 10: Caracterização da brita

Massa específica (kg/m ³)	2.700
Massa unitária compactada - M _{UG} (kg/m ³)	1.510
Dimensão máxima característica - DMC (mm)	12,5
Umidade (%)	0,46

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021

d) Água

A água utilizada foi a água da rede pública de distribuição da cidade. De acordo com a concessionária de abastecimento de água, ela apresenta teor de flúor máximo de 1,5 mg/l, cloro entre 0,2 e 5,0 mg/l e turbidez máxima de 5,00 NTU.

e) Superplastificante

O aditivo químico utilizado foi o superplastificante de terceira geração MasterGlenium 51, produzido pela BASF S.A. Este aditivo tem base química de éter carboxílico modificado, que atua como dispersante do material cimentício, propiciando superplastificação e alta redução de água, resultando em um concreto com maior trabalhabilidade e sem alteração no tempo de pega. A adição foi feita

em substituição a 2,5% em peso do cimento. A especificação do produto é mostrada no Quadro 11.

Quadro 11: Dados técnicos do MasterGlenium 51

Tipo de produto	Superplastificante
Estado físico	Líquido
Aparência/cor	Branco turvo
Densidade (g/cm ³)	1,067 a 1,107
pH	5 a 7
Viscosidade (cps)	< 150

Fonte: BASF S.A.

f) Sílica ativa

A sílica ativa utilizada foi fabricada pela empresa Tecnosil. Trata-se de uma sílica ativa em pó, não densificada, apresentando cor cinza, diâmetro médio das partículas de 0,2 µm e massa específica igual a 2,20 kg/dm³, de acordo com a norma ABNT NBR 16605:2017. A adição foi feita em substituição a 5% em peso do cimento. A especificação do produto é mostrada no Quadro 12.

Quadro 12: Dados técnicos da sílica ativa

Principal constituinte	Sílica amorfa (SiO ₂)
Estado físico	Sólido, em pó
Aparência/cor	Cinza escuro
Densidade (g/cm ³)	2,20
Diâmetro das partículas (µm)	0,2

Fonte: TECNOSIL

3.2.2 Dosagem dos materiais

Para o cálculo da dosagem dos materiais, utilizou-se o método ABCP, adotado pela Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP).

Este método foi desenvolvido com base nos métodos do *American Concrete Institute* (ACI) e *Portland Cement Institute* (PCI), adaptando-se às condições

brasileiras. Permite-se, deste modo, a utilização de britas e areia de rio, que são os agregados mais utilizados na preparação de concretos no Brasil. Trata-se de um método baseado no critério do volume absoluto, que consiste em fornecer a proporção das quantidades dos materiais para a mistura, em função dos requisitos de trabalhabilidade, resistência e durabilidade, devendo ser executada uma mistura experimental para verificar se as qualidades desejadas foram atingidas (BOGGIO, 2000).

Este trabalho seguiu a sequência de etapas definidas pelo método, conforme os procedimentos descritos a seguir.

a) Determinação da resistência de dosagem (f_{cj})

Para o cálculo da resistência de dosagem (f_{cj}), definiu-se inicialmente a resistência característica de compressão do concreto aos 28 dias (f_{ck}), com base na classe de agressividade ambiental e na correspondência entre a classe de agressividade e a qualidade do concreto, a partir do exposto pela norma ABNT NBR 12655:2015.

Considerou-se, para o caso da cidade de Campos dos Goytacazes, RJ, a classe de agressividade II, de acordo com o Quadro 13, por se tratar de uma região urbana distante das praias, de agressividade moderada e de pequeno risco de deterioração das estruturas.

Quadro 13: Classes de agressividade ambiental

Classe de agressividade ambiental	Agressividade	Classificação geral do tipo de ambiente para efeito de projeto	Risco de deterioração da estrutura
I	Frac	Rural	Insignificante
		Submersa	
II	Moderada	Urbana	Pequeno
III	Forte	Marinha	Grande
		Industrial	
IV	Muito forte	Industrial	Elevado
		Respingos de maré	

Fonte: Norma NBR 12655 (ABNT, 2015)

A classe de agressividade II resultou, de acordo com a Quadro 14, em um concreto armado (CA) de classe C25, ou seja, $f_{ck} = 25 \text{ MPa}$.

Quadro 14: Correspondência entre classe de agressividade e qualidade do concreto

Concreto	Tipo	Classe de agressividade			
		I	II	III	IV
Relação água/cimento em massa	CA	$\leq 0,65$	$\leq 0,60$	$\leq 0,55$	$\leq 0,45$
	CP	$\leq 0,60$	$\leq 0,55$	$\leq 0,50$	$\leq 0,45$
Classe de concreto (ABNT NBR 8953)	CA	$\geq \text{C20}$	$\geq \text{C25}$	$\geq \text{C30}$	$\geq \text{C40}$
	CP	$\geq \text{C25}$	$\geq \text{C30}$	$\geq \text{C35}$	$\geq \text{C40}$
Consumo de cimento Portland por metro cúbico de concreto kg/m^3	CA e CP	≥ 260	≥ 280	≥ 320	≥ 360
CA Componentes e elementos estruturais de concreto armado. CP Componentes e elementos estruturais de concreto protendido.					

Fonte: Norma NBR 12655 (ABNT, 2015)

Em seguida, foi definido o abatimento do concreto, adotando-se o valor de 70 mm, levando-se em conta, de acordo com o Quadro 15, onde se apresentam os valores de abatimento em função dos diversos tipos de construção, que esse é um valor médio recomendado para fundações, pilares, vigas e lajes, além de ser um valor representativo de concretos de consistência semi-plástica à fluida, ideal para a aplicação do método de dosagem da ABCP.

Quadro 15: Valores de abatimentos recomendados em função do tipo de obra

Peças estruturais	(mm)
Artefatos de concreto, tubos, blocos, bloquetes, poste, palanque e palito	0 a 10
Peças pré-moldadas, vigas, laje, lajotas, meio fio, etc	10 a 20
Lançamento pelo sistema forma deslizante	20 a 50
Fundações armadas, paredes e pisos	50 a 120
Fundações maciças e infraestrutura de muro	30 a 100
Lajes, pilares, vigas e muros	50 a 150
Massa	< 60

Fonte: Elaborado pelo autor de acordo com o método de dosagem ABCP

De posse da resistência característica de compressão (f_{ck}), calculou-se a resistência de dosagem (f_{cj}), com o objetivo de garantir que o f_{ck} projetado seja alcançado. Como o desvio padrão (S_d) é desconhecido, adotou-se o valor de 4,0 MPa, de acordo com a norma ABNT NBR 12655:2015, que define este valor para a Condição de Preparo A, aplicável a todas as classes de concreto, na qual o cimento e os agregados são medidos em massa e a água em massa ou volume.

Aplicando-se a fórmula de resistência de dosagem (f_{cj}), obteve-se o valor de 32 MPa, conforme a seguinte expressão:

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

Onde:

- f_{cj} é a resistência média de dosagem a j dias de idade, em MPa.
- f_{ck} é a resistência característica do concreto à compressão, especificada em projeto, a j dias de idade, em MPa.
- S_d é o desvio padrão de dosagem, em MPa.

$$f_{cj} = 25 + (1,65 \times 4) = 31,6 \text{ ou } 32 \text{ MPa}$$

Chegou-se então às características desejadas para o concreto convencional a ser produzido (Quadro 16).

Quadro 16: Características estabelecidas para o concreto

Concreto	
f_{ck}	25 MPa
S_d	4 MPa
Abatimento	70 mm
f_{cj}	32 MPa

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021

b) Determinação da relação água-cimento (a/c)

Utilizando-se a Curva de Abrams (Figura 18), procurou-se na curva de resistência do cimento de 32 MPa o ponto correspondente à resistência do concreto de 32 MPa, chegando-se à relação a/c de 0,495.

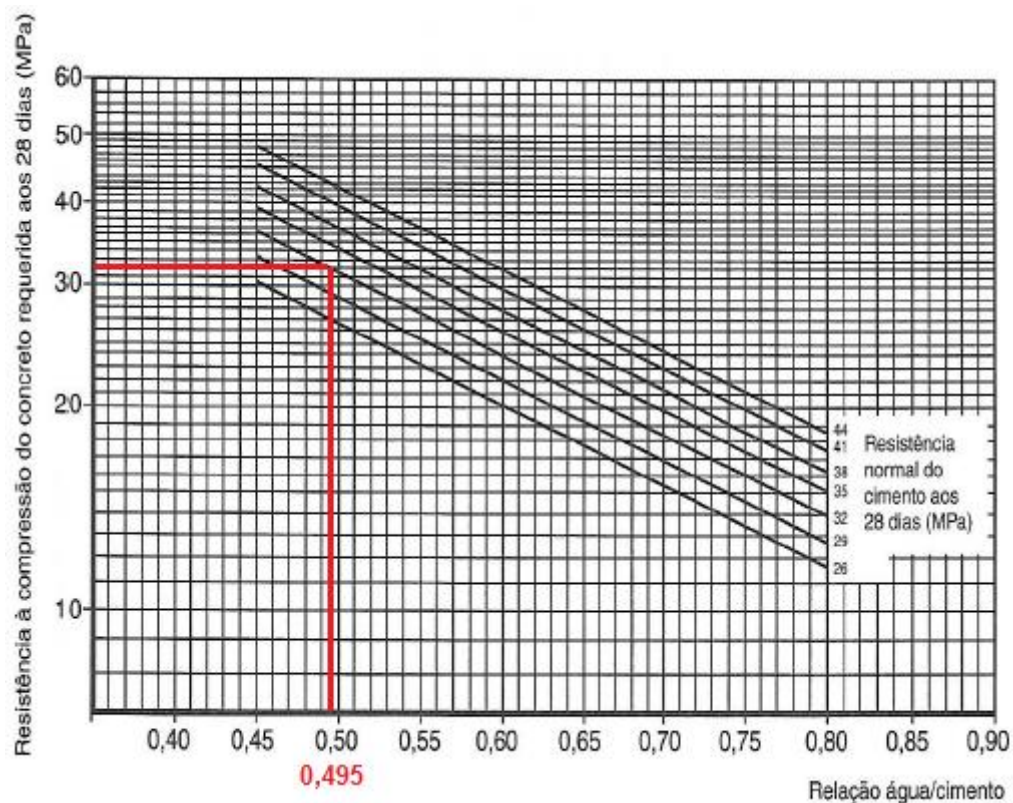


Figura 16: Relação água/cimento obtida na Curva de Abrams

Fonte: Elaborado pelo autor de acordo com o método de dosagem ABCP

c) Determinação aproximada do consumo de água do concreto (C_a)

Pela tabela que relaciona consumo de água e abatimento do concreto, tem-se, para o abatimento de 70 mm e DMC do agregado graúdo de 19 mm, o valor de consumo de água de 200 litros/ m^3 (Quadro 17). Como não consta na tabela o DMC de 12,5 mm, optou-se pelo de 19 mm, por resultar em um consumo de água menor.

Quadro 17: Consumo de água aproximado (l/m^3)

Consumo de água aproximado (l/m^3)					
Abatimento (mm)	Dimensão máxima característica do agregado graúdo (mm)				
	9,5	19,0	25,0	32,0	38,0
40 a 60	220	195	190	185	180
60 a 80	225	200	195	190	185
80 a 100	230	205	200	195	190

Fonte: Elaborado pelo autor de acordo com o método de dosagem ABCP

d) Determinação do consumo de cimento (C_c)

Aplicando-se a fórmula de consumo de cimento (C_c), obteve-se o valor de 404 kg/m^3 , conforme a seguinte expressão:

$$C_c = \frac{C_a}{a/c} \quad (2)$$

Onde:

- C_c é o consumo de cimento, em kg/m^3 .
- C_a é o consumo de água, em L/m^3 ou kg/m^3 .
- a/c é a relação água/cimento.

$$C_c = 200 / 0,495 = 404 \text{ kg/m}^3$$

e) Determinação do consumo de agregado graúdo (C_G)

Pela tabela que relaciona a dimensão máxima característica do agregado graúdo (DMC = 19,0 mm) e o módulo de finura do agregado miúdo (MF = 2,46), obteve-se o volume compactado seco do agregado graúdo (V_G) igual a $0,710 \text{ m}^3$ (Quadro 18). Não consta na tabela o DMC de 12,5 mm, estabelecido para a brita.

Quadro 18: Volume compactado seco do agregado graúdo

Módulo de finura do agregado miúdo MF	Dimensão máxima característica do agregado graúdo DMC (mm)				
	9,5	19,0	25,0	32,0	38,0
	Volume compactado seco (V_G) de agregado graúdo por m^3 de concreto				
1,8	0,645	0,770	0,795	0,820	0,845
2,0	0,625	0,750	0,775	0,800	0,825
2,2	0,605	0,730	0,755	0,780	0,805
2,4	0,585	0,710	0,735	0,760	0,785
2,6	0,565	0,690	0,715	0,740	0,765
2,8	0,545	0,670	0,695	0,720	0,745
3,0	0,525	0,650	0,675	0,700	0,725
3,2	0,505	0,630	0,655	0,680	0,705
3,4	0,485	0,610	0,635	0,660	0,685
3,6	0,465	0,590	0,615	0,640	0,665

Fonte: Elaborado pelo autor de acordo com o método de dosagem ABCP

Aplicando-se a fórmula de consumo de agregado graúdo (C_G), obteve-se o valor de 1.072 kg/m³, conforme a seguinte expressão:

$$C_G = V_G \times M_{UG} \quad (3)$$

Onde:

- C_G é o consumo de agregado graúdo, em kg/m³.
- V_G é o volume compactado seco do agregado graúdo, em m³.
- M_{UG} é a massa unitária compactada do agregado graúdo, em kg/m³.

$$C_G = 0,710 \times 1.510 = 1.072 \text{ kg/m}^3$$

f) Determinação do consumo de agregado miúdo (C_m)

A determinação do consumo de agregado miúdo (C_m) foi feita pela diferença dos demais constituintes já determinados, utilizando-se as seguintes expressões:

- Volume de agregado miúdo

$$V_m = 1 - \left(\frac{C_c}{\rho_c} + \frac{C_G}{\rho_G} + \frac{C_a}{\rho_a} \right) \quad (4)$$

Onde:

- V_m é o volume de agregado miúdo, em m³.
- ρ_c é a massa específica do cimento, em kg/m³.
- ρ_G é a massa específica do agregado graúdo, em kg/m³.
- ρ_a é a massa específica da água, em kg/m³.

$$V_m = 1 - (404/3100 + 1072/2700 + 200/1000) = 0,273 \text{ m}^3$$

- Consumo de agregado miúdo

$$C_m = \rho_m \times V_m \quad (5)$$

Onde:

- C_m é o consumo de agregado miúdo, em kg/m³.
- ρ_m é a massa específica do agregado miúdo, em kg/m³.
- V_m é o volume de agregado miúdo, em m³.

$$C_m = 2.650 \times 0,273 = 723 \text{ kg/m}^3$$

g) Apresentação do traço

O traço é apresentado deste modo: cimento (1) : areia : brita : relação a/c. Referenciado à massa de cimento, o traço é calculado pela seguinte expressão:

$$1 : \frac{C_m}{C_c} : \frac{C_g}{C_c} : \frac{C_a}{C_c} \quad (6)$$

Onde:

- C_m é o consumo de areia, em kg/m^3 .
- C_g é o consumo de brita, em kg/m^3 .
- C_a é o consumo de água, em kg/m^3 .
- C_c é o consumo de cimento, em kg/m^3 .

$$1 : 723/404 : 1072/404 : 200/404$$

$$1 : 1,790 : 2,653 : 0,495, \text{ com } C_c = 404 \text{ kg/m}^3$$

3.2.3 Produção dos concretos

Foram produzidos nove corpos de prova cilíndricos, nas dimensões de 200 mm de altura e 100 mm de diâmetro, sendo três corpos de prova de um concreto convencional, três de um concreto com adição de superplastificante e três de um concreto com adição de superplastificante e sílica ativa.

O primeiro traço foi destinado à produção do concreto convencional e sua dosagem seguiu a dosagem estabelecida neste trabalho. O segundo traço recebeu a adição de superplastificante em dosagem de 2,5% em relação à massa de cimento. O terceiro traço recebeu a adição de superplastificante, na mesma dosagem anterior, e de sílica ativa, em dosagem de 5% em relação à massa de cimento. O Quadro 19 apresenta a quantidade em massa dos materiais utilizados para a produção dos três corpos de prova de concreto em cada traço, obedecendo a proporcionalidade entre os constituintes, estabelecida na dosagem dos materiais, qual seja, cimento (1) : areia (1,790) : brita (2,653) : relação a/c (0,495), com $C_c = 404 \text{ kg/m}^3$.

Quadro 19: Quantidade em massa dos materiais utilizados em cada traço

	TRAÇO 1	TRAÇO 2	TRAÇO 3
Cimento (kg)	2,09	2,09	1,99
Areia (kg)	3,64	3,64	3,64
Brita (kg)	5,54	5,54	5,54
Água (kg)	1,03	0,71	0,71
Superplastificante (kg)	-	0,05	0,05
Sílica ativa (kg)	-	-	0,10

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021

Observou-se, no Traço 2, que bastou utilizar 0,71 kg de água, como resultado da adição de 0,05 kg de superplastificante, representando uma redução de 31,1 % de água em relação ao Traço 1.

No Traço 3, foi reduzida a massa de cimento em 0,10 kg, referente à massa de sílica ativa adicionada. Observou-se neste último traço, que o consumo de água foi o mesmo ocorrido do Traço 2, indicando que a adição de sílica ativa, como era de se esperar, não influenciou no consumo de água.

Os três traços apresentaram uma boa consistência, homogeneidade e trabalhabilidade da mistura.

3.2.4 Adensamento, moldagem e cura dos corpos de prova

Na moldagem dos corpos de prova, o adensamento manual foi feito em duas camadas, com 25 golpes de socamento por camada, uniformemente distribuídos em toda a seção transversal do molde.

Após a moldagem, os corpos de prova permaneceram nas fôrmas em condição de cura inicial por 24 horas, até que o endurecimento do concreto permitisse a desforma, sem causar danos aos mesmos.

Após a desforma, os corpos de prova foram mantidos submersos em tanque com água por 28 dias, para a cura em água, de forma a preservar a água de amassamento da mistura e garantir a completa hidratação do cimento.

3.2.5 Ensaio de resistência à compressão axial simples

No ensaio de resistência à compressão axial simples, os corpos de prova foram rompidos nas idades de 28 dias, utilizando-se uma prensa hidráulica da marca Solotest, capacidade de 100 tf. Neste ensaio, a força de ruptura foi medida em toneladas-força (tf). Para obter a tensão de ruptura em MPa, foi dividida a força de ruptura (em tf) pela área da seção do corpo de prova (em cm²), multiplicando-se o resultado por 100.

3.2.6 Medição da absorção de água

Ao término do período de 28 dias de cura, os corpos de prova foram retirados da água e pesados para se obter a sua massa no estado úmido (saturado). Em seguida, foram mantidos fora da água em secagem natural por 48 horas e novamente pesados para se obter a sua massa no estado seco, com o objetivo de calcular a absorção de água e inferir o volume de espaço vazio, ou seja, a sua porosidade.

A sequência de fotos apresenta os materiais e os equipamentos utilizados, além das operações realizadas para esta pesquisa.



Figura 17: Cimento, areia e brita utilizados



Figura 18: Superplastificante e sílica ativa utilizados



Figura 19: Pesagem para medição da umidade da areia



Figura 20: Pesagem para medição da umidade da brita



Figura 21: Determinação da massa específica da areia pelo Método de Chapman



Figura 22: Determinação da massa unitária da areia e da brita



Figura 23: Peneiras de análise granulométrica e moldes para corpos de prova



Figura 24: Moldagem e desforma dos corpos de prova

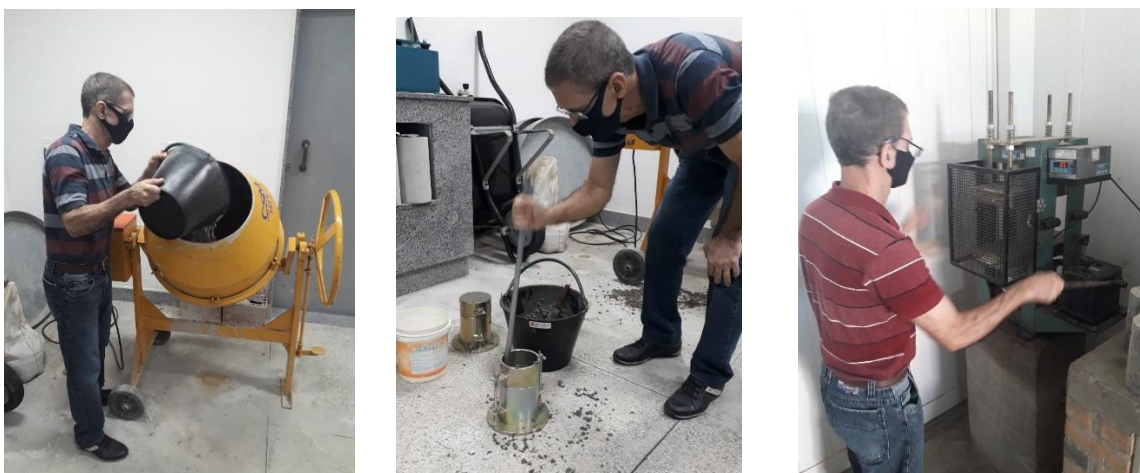


Figura 25: Operações de produção do concreto, adensamento e ensaio de resistência à compressão



Figura 26: Ensaio de resistência à compressão

4. RESULTADOS

No ensaio de resistência à compressão, os corpos de prova do concreto convencional (concreto de referência) atingiram a tensão de ruptura média de 33,66 MPa, correspondendo ao resultado esperado de $f_{cj} = 32$ MPa. Esse resultado demonstra um acerto na dosagem estabelecida e no método de mistura utilizado.

Por outro lado, os corpos de prova que receberam as adições mostraram um baixo desempenho, resultando em baixas tensões de ruptura (Quadro 20).

Quadro 20: Ensaio de resistência à compressão axial simples

Tipo de concreto	Corpo de prova	Força de ruptura	Força de ruptura média	Área	Tensão de ruptura média		
	Nº	(tf)	(tf)	(cm²)	(MPa)		
Concreto convencional	1	27,38	26,42	78,50	33,66		
	2	25,56					
	3	26,32					
Concreto com superplastificante	1	11,79	12,12		78,50	15,44	
	2	11,65					
	3	12,93					
Concreto com superplastificante e sílica ativa	1	13,63	13,73			78,50	17,49
	2	12,85					
	3	14,71					

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021

A absorção de água foi medida pela diferença de massa dos corpos de prova no estado úmido (saturado) e no estado seco. Os corpos de prova que receberam as adições mostraram também um resultado inesperado, indicando um desarranjo da microestrutura interna, interferindo negativamente na porosidade dos concretos (Quadro 21).

Quadro 21: Medição da absorção de água

Tipo de concreto	Corpo de prova	Massa (úmido)	Massa (seco)	Média (úmido)	Média (seco)	Absorção de água
	Nº	(g)	(g)	(g)	(g)	(g)
Concreto convencional	1	3.619	3.608	3.615	3.605	10
	2	3.611	3.602			
	3	3.615	3.605			
Concreto com superplastificante	1	3.776	3.755	3.801	3.778	23
	2	3.784	3.765			
	3	3.842	3.815			
Concreto com superplastificante e sílica ativa	1	3.630	3.600	3.598	3.577	21
	2	3.566	3.545			
	3	3.599	3.585			

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021

5. DISCUSSÃO

É importante ressaltar que o concreto convencional (concreto de referência) atingiu a tensão de ruptura esperada, tendo seu resultado correspondido ao f_{cj} de 32 MPa, calculado para a idade de 28 dias. Isso demonstra um acerto na dosagem e no método de mistura utilizados. A dosagem foi calculada pelo método de dosagem ABCP e a mistura foi realizada de acordo com os padrões estabelecidos. Primeiramente, foram colocadas na betoneira toda a brita e pouca água, para umedecer as superfícies do agregado. Após betonar, foram acrescentados todo o cimento e o restante da água, seguidos de mais uma betonada. Por fim, foi acrescentada toda a areia, efetuando-se a betonada final.

Entretanto, observa-se nos valores dos resultados experimentais medidos para cada tipo de concreto que as adições não contribuíram positivamente para o crescimento da resistência à compressão e redução da porosidade do material.

Nota-se ainda que os maiores valores de absorção de água dos concretos aditivados vieram a validar os resultados negativos da resistência à compressão desses concretos.

Os resultados de resistência à compressão e absorção de água do concreto do 2º traço, aditivado com o superplastificante, mostraram valores importantes para a análise. O superplastificante utilizado parece ter sido o principal responsável pelo baixo desempenho desse concreto. Do mesmo modo, a provável interferência negativa do superplastificante no concreto do 3º traço, não permitiu que a sílica ativa exercesse adequadamente a sua função.

Vários fatores que poderiam ter influenciado no baixo desempenho dos concretos foram analisados.

1- Dosagem dos materiais: os resultados positivos do 1º traço confirmaram a eficiência da dosagem dos materiais. A dosagem do superplastificante e da sílica ativa dos 2º e 3º traços seguiu um padrão conservador, utilizando-se a metade da margem de dosagem recomenda pela literatura pesquisada e pelos padrões da ABNT: o 2º traço recebeu a adição de superplastificante em dosagem de 2,5% em relação à massa de cimento (recomenda-se até 5%) e o 3º traço, além da adição de superplastificante na mesma dosagem do traço anterior, recebeu a adição de sílica ativa em dosagem de 5% em relação à massa de cimento (recomenda-se até 10%). Entretanto, não foi consultado o teor de superplastificante recomendado pelo fabricante e este fato pode ter influenciado significativamente no resultado.

2- Umidade da areia: não foi descontada a água presente na umidade da areia. Nos 2º e 3º traços, foram utilizados 3,64 kg de areia com umidade de 5%, representando 0,182 litros de água, que se fossem descontados, reduziriam o volume de água adicionada à mistura de 0,710 litros para 0,528 litros. Este fato não parece ter influenciado no resultado, pois o 1º traço não foi impactado e os três traços apresentaram uma boa consistência, homogeneidade e trabalhabilidade da mistura.

3- Método de incorporação das adições na mistura: o superplastificante foi adicionado à mistura em dois momentos. Inicialmente, uma parte foi introduzida na betoneira juntamente com um pouco de água e, depois, a outra parte foi introduzida juntamente com o restante da água. A sílica ativa foi adicionada de uma só vez, juntamente com o cimento. O método de incorporação das adições na mistura não parece ter influenciado de modo significativo no baixo desempenho.

4- Incompatibilidade entre o cimento e o superplastificante: o cimento utilizado nesta pesquisa continha um teor de 1,25% de álcalis solúveis em água e 3,09% de sulfato de cálcio, o que justifica um estudo sobre as reações destes compostos com o aditivo utilizado.

Foi pesquisado na literatura que a eficiência de um aditivo depende de vários fatores, tais como, a composição química do próprio aditivo e do cimento, a dosagem e a proporção da mistura, o momento de incorporação do aditivo à mistura, a temperatura de reação e o teor de sulfato álcali solúvel presente no cimento e/ou no aditivo.

Sobre este assunto, Castro e Pandolfelli (2009) citam que:

Nem todos os cimentos que cumprem as especificações regulamentares têm o mesmo comportamento reológico com um dado superplastificante quando se trabalha com baixas relações água/cimento. Da mesma maneira, nem todos os superplastificantes que cumprem as especificações de normas interagem da mesma forma com um dado cimento. Assim, os aditivos superplastificantes não são onipotentes: existem problemas importantes de incompatibilidade entre pares de cimento-superplastificante (CASTRO E PANDOLFELLI, 2009, p. 20)

E acrescentam que “a quantidade de álcalis solúveis que entram em solução durante os primeiros minutos da hidratação também pode ser considerada um ponto fundamental na compatibilidade cimento-aditivo” (CASTRO E PANDOLFELLI, 2009, p. 20).

Sobre cimentos e aditivos, Corrêa (2010) orienta que seja feito um teste de ajuste da melhor dosagem, tomando-se por base duas a três dosagens diferentes do aditivo, para que se tenha o concreto com a melhor relação desempenho/custo.

Esses pesquisadores concordam que “para misturas com baixa relação água/cimento, a compatibilidade cimento-aditivo não pode ser determinada somente a partir das especificações de cada material, é necessária a avaliação

experimental da mistura, devido aos complexos fenômenos químicos envolvidos” CASTRO E PANDOLFELLI, 2009, p. 20).

6. CONCLUSÕES

Diante dos resultados experimentais obtidos, essa pesquisa aponta para a necessidade de novos estudos. É necessário estudar o processo de hidratação do cimento para uma melhor compreensão da interferência do aditivo e realizar novos ensaios, variando o tipo de cimento e o tipo de superplastificante.

A dosagem dos materiais pelo método ABCP se mostrou eficiente para o concreto de referência. Entretanto, a dosagem utilizada para os traços que receberam as adições necessita de ajustes experimentais.

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros recomenda-se:

- Descontar a água presente na umidade da areia e da brita.
- Avaliar diferentes dosagens de aditivos químicos e adições minerais.
- Avaliar diferentes métodos de incorporação das adições na mistura.
- Avaliar diferentes cimentos e diferentes aditivos superplastificantes.

8. REFERÊNCIAS

ALVES, José Dafico. **Manual de Tecnologia do Concreto**. 4. ed. Goiânia: Editora da PUC Goiás, 2002.

ALVES, Martha Figueiredo. **Estudo comparativo de métodos de dosagem para concreto de alta resistência**. 2000. 140 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16697. **Cimento Portland – Requisitos**. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12655: **Concreto de cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento**. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7211: **Agregados para concreto - Especificação**. Rio de Janeiro, 2009, versão corrigida 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16972. **Agregados - Determinação da massa unitária e do índice de vazios**. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16605. **Cimento Portland e outros materiais em pó — Determinação da massa específica**. Rio de Janeiro, 2017.

CASTRO, A. L. de; PANDOLFELLI, V. C. Conceitos de dispersão e empacotamento de partículas para a produção de concretos especiais aplicados na construção civil. **Cerâmica**, São Carlos, SP, 2009.

CORRÊA, Augusto Cesar Abduche. **Estudo do desempenho dos aditivos plastificantes e polifuncionais em concretos de cimento Portland tipo CPIII-40**. 2010. 149 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal Fluminense (UFF), Niterói, 2010.

FONSECA, Gustavo Celso da. **Adições minerais e as disposições normativas relativas à produção de concreto no Brasil: uma abordagem epistêmica**. 2010. 105 p. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, 2010.

LIMA, Flávio Barboza de. **Pilares de concreto de alto desempenho: fundamentos e experimentação**. 1997. 206 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo (USP), São Carlos, 1997.

SPONHOLZ, Ildo. **Avaliação do desempenho de aditivos redutores de água em concreto de alto desempenho**. 1998. 180 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Florianópolis, 1998.

CAPÍTULO III: REFERÊNCIAS

ALHADAS, Miguel Fernando Schettini. **Estudo da influência do agregado graúdo de diferentes origens mineralógicas nas propriedades mecânicas do concreto**. 2008. 126 p. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, 2008.

ALMEIDA, Sílvio Martins de. **Análise do módulo de elasticidade estático e dinâmico do concreto de cimento Portland através de ensaios de compressão simples e de frequência ressonante**. 2012. 213 p. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, 2012.

ALVES, José Dafico. **Manual de Tecnologia do Concreto**. 4. ed. Goiânia: Editora da PUC Goiás, 2002.

ALVES, Martha Figueiredo. **Estudo comparativo de métodos de dosagem para concreto de alta resistência**. 2000. 140 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16697. **Cimento Portland – Requisitos**. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12655: **Concreto de cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento**. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7211: **Agregados para concreto - Especificação**. Rio de Janeiro, 2009, versão corrigida 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16972. **Agregados - Determinação da massa unitária e do índice de vazios**. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16605. **Cimento Portland e outros materiais em pó — Determinação da massa específica**. Rio de Janeiro, 2017.

BOGGIO, Aldo J. **Estudo comparativo de métodos de dosagem de concretos de cimento Portland**. 2000. 180 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2000.

BUNDER, Jeferson. O concreto: sua origem, sua história. **Educação e Pesquisa** (USP. Impresso), São Paulo, 2016.

CASTRO, A. L. de; PANDOLFELLI, V. C. Conceitos de dispersão e empacotamento de partículas para a produção de concretos especiais aplicados na construção civil. **Cerâmica**, São Carlos, SP, 2009.

CORRÊA, Augusto Cesar Abduche. **Estudo do desempenho dos aditivos plastificantes e polifuncionais em concretos de cimento Portland tipo CPIII-40**. 2010. 149 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal Fluminense (UFF), Niterói, 2010.

COUTO, José Antônio Santos; CARMINATTI, Rafael Lima; NUNES, Rogério Reginato Alves; MOURA, Ruan Carlos A. O concreto como material de construção. **Cadernos de Graduação - Ciências Exatas e Tecnológicas**, UNIT, Sergipe, v. 1, n.17, p. 49-58, out. 2013.

FONSECA, Gustavo Celso da. **Adições minerais e as disposições normativas relativas à produção de concreto no Brasil: uma abordagem epistêmica**. 2010. 105 p. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, 2010.

HELENE, Paulo Roberto do Lago; LEVY, Salomon Mony. Estado da arte do concreto como material de construção. **Exacta**, São Paulo, v. 1, n. 1, p. 109-116, abr. 2003.

HELENE, Paulo; ANDRADE, Tibério. **Concreto de Cimento Portland**. In: Geraldo Cechella Isaia (Organizador/Editor). **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia dos Materiais**. 1. ed. São Paulo: Ibracon, 2010.

KAEFER, Luís Fernando. A evolução do concreto armado. **Cimento.Org**, Brasília, 2008.

LIMA, Caio I. V.; COUTINHO, Carlos O. D.; AZEVEDO, Gabriel G. C.; BARROS, Tarsys Y. G.; TAUBER, Thiago C; LIMA, Sandovânio F. de. **Concreto e suas**

inovações. **Cadernos de Graduação - Ciências Exatas e Tecnológicas**, FITS, Maceió, v. 1, n.1, p. 31-40, mai. 2014.

LIMA, Flávio Barboza de. **Pilares de concreto de alto desempenho**: fundamentos e experimentação. 1997. 206 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo (USP), São Carlos, 1997.

PEDROSO, Fábio Luís. Concreto: as origens e a evolução do material construtivo mais usado pelo homem. **Revista Concreto e Construções**, IBRACON, São Paulo, n. 53, p. 14-19, jan./fev./mar. 2009.

SOBRAL, Hernani Sávio. **Propriedades do Concreto Fresco**. 5. ed. São Paulo: Associação Brasileira de Cimento Portland, 2000.

SOUZA, Paulo Sérgio Lima. **Verificação da influência do uso de metacaulim de alta reatividade nas propriedades mecânicas do concreto de alta resistência**. 2003. 203 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2003.

SPONHOLZ, Ildo. **Avaliação do desempenho de aditivos redutores de água em concreto de alto desempenho**. 1998. 180 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Florianópolis, 1998.

TAKEUTI, Adilson Roberto. **Reforço de pilares de concreto armado por meio de encamisamento com concreto de alto desempenho**. 1999. 184 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo (USP), São Carlos, 1999.

VASCONCELLOS, Juliano Caldas de. **Concreto Armado Arquitetura Moderna Escola Carioca**: Levantamentos e Notas. 2004. 313 p. Dissertação (Mestrado em Arquitetura) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2004.