

CENTRO UNIVERSITÁRIO DE FORMIGA – UNIFOR-MG
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL
WILLIAM DOUGLAS TOMÉ

UTILIZAÇÃO DE SÍLICA ATIVA EM CONCRETOS DE ALTO DESEMPENHO

FORMIGA-MG

2014

WILLIAM DOUGLAS TOMÉ

UTILIZAÇÃO DE SÍLICA ATIVA EM CONCRETOS DE ALTO DESEMPENHO

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil do UNIFOR, como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Matheus de Faria e Oliveira Barreto.

FORMIGA - MG
2014

T656 Tomé, William Douglas.
Utilização de sílica ativa em concretos de alto desempenho / William
Douglas Tomé. – 2014.
98 f.

Orientador: Matheus de Faria e Oliveira Barreto.
Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil) - Centro
Universitário de Formiga–UNIFOR - MG, Formiga, 2014.

1. Concreto de alto desempenho. 2. Adição. 3. Sílica Ativa I. Título.

CDD 624.1834

William Douglas Tomé

UTILIZAÇÃO DE SÍLICA ATIVA EM CONCRETOS DE ALTO DESEMPENHO

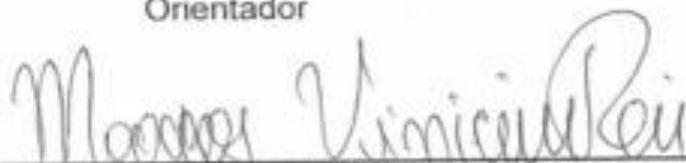
Trabalho de conclusão de curso
apresentado ao Curso de Engenharia Civil
do UNIFOR, como requisito parcial para
obtenção do título de bacharel em
Engenharia Civil.
Orientador: Matheus de Faria e Oliveira
Barreto.

BANCA EXAMINADORA



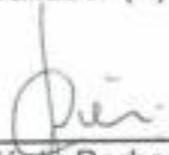
Prof. Dr. Matheus de Faria e Oliveira Barreto

Orientador



Prof. Esp. Marcos Vinicius Reis

Avaliador (A)



Prof. Ms. Clésio Barbosa Lemos Júnior

Avaliador (B)

“Tudo o que um sonho precisa para ser realizado é alguém que acredite que ele possa ser realizado”.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por ter me iluminado durante toda a minha vida, ter me dado força para acreditar e realizar esse sonho.

Em especial à minha família, aos meus pais e irmão, pela compreensão e apoio em todos os momentos de alegria e tristeza.

A todos os meus colegas e amigos pelo apoio e amizade.

Aos meus amigos da Empresa TECNO2000 pela oportunidade profissional e pela convivência.

Aos meus amigos da Empresa Segminas pela oportunidade profissional e pela convivência.

A Tecnosil por ter doado uma amostra de sílica ativa e a Viapol por ter doado uma amostra de um de seus superplastificantes.

Ao Grupo CMP e a FESP de Passos-MG, por terem me ajudado a realizar a parte prática do meu estudo.

A meu orientador e Prof. Dr. Matheus de Faria por ter dedicado sua experiência e seu tempo em toda a trajetória deste estudo.

A todos os professores do curso, minha gratidão, pois além de professores foram mestres.

A todos que de uma maneira ou de outra contribuíram para a realização desta conquista os meus sinceros agradecimentos.

Obrigado!

RESUMO

Com o desenvolvimento constante do mundo continua-se sempre buscando a melhor tecnologia para se realizar as grandes obras da construção civil. Uma dessas tecnologias empregadas é a utilização do concreto de alto desempenho que além de alcançar altas resistências à compressão também deve fornecer alta trabalhabilidade, alta durabilidade, acabamento, estética e integridade.

Uma parte importante do concreto de alto desempenho que foi demonstrada no decorrer deste trabalho é a adição de sílica ativa em sua composição. A sílica ativa associada com a massa de cimento gera um aumento do desempenho do concreto, preenchendo os vazios da zona de transição do concreto, fazendo então que se alcancem altas resistências à compressão. Outra vantagem importante entre várias outras citadas no decorrer do trabalho é a durabilidade, pois está ligada diretamente à permeabilidade do concreto que ao ter sílica ativa em sua composição, a mesma realiza um refinamento da zona de transição e da estrutura dos poros da matriz, reduzindo então a entrada de água no concreto.

Outra importante questão abordada neste trabalho foi a possível obtenção de sílica ativa através das cinzas da casca de arroz e do bagaço da cana-de-açúcar, demonstrando que existe uma busca por fontes alternativas que auxiliam tanto na diminuição do custo final do concreto de alto desempenho quanto na busca por um menor índice de poluição.

Pretendeu-se também realizar dosagens de concreto de alto desempenho em laboratório para avaliar qual porcentagem de adição de sílica ativa é a mais eficiente na obtenção de altas resistências à compressão e tração do concreto de alto desempenho.

Palavras-chave: Concreto de Alto Desempenho, Adição, Sílica Ativa.

ABSTRACT

With the world in constant development, the search for better technologies goes on to realize great buildings work in civil engineering. One of these technologies is the utilization of high performance concrete, it reaches high resistance to compression, and it also has high durability, finishing, esthetic and integrity.

An important part of high performance concrete that was shown in this study is the addition of silica fume in its composition. The silica fume associated with the mass of cement produces a high performance of the concrete, filling the empties of the concrete transition zone, promoting high resistance to compression. Another important advantage among others reported a long this study is the durability, because it's associated directly to the concrete permeability, with silica fume in its composition, it realizes a refinement of the transition zone and structure of the matrix pores, reducing the entrance of water in the concrete.

Another important question handled in this study was the possible getting of silica fume through the ashes of rice peel and bagasse of sugar cane, demonstrating that there is a search for alternative sources that help in a decrease of the final cost of the high performance concrete and in a lower pollution level.

It was also intended to realize a dosage of high performance concrete in laboratory to assess what percentage of silica fume addition is more efficient to obtain high resistance to compression and traction of high performance concrete.

Keywords: High performance concrete, addition, silica fume.

LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

ABCP,	Associação Brasileira de Cimento <i>Portland</i> .
ABNT,	Associação Brasileira de Normas Técnicas.
Al₂O₃,	Alumina.
C₃A,	Aluminato tricálcio.
CAD,	Concreto de Alto Desempenho.
CaO,	Cal.
CA(OH)₂	Hidróxido de cálcio (CH).
CC,	Concreto(s) comum(ns).
CP,	Cimento <i>Portland</i> .
DRX,	Difratometria de raios X.
E_c,	Módulo de elasticidade.
E_{ci},	Módulo de elasticidade tangente do concreto, a 28 dias, em MPa.
f_c,	Resistência à compressão do concreto.
f_{cj},	Resistência à compressão do concreto aos <i>j</i> dias.
f_{ck},	Resistência característica à compressão do concreto.
Fe₂O₃,	Ferro.
FESP	Fundação de Ensino Superior de Passos.
K₂O,	Óxido de potássio.
MgO,	Magnésia
MPa,	Mega Pascal.
Na₂O,	Óxido de sódio.
SAAE,	Serviço Autônomo de Água e Esgoto.
SiO₂,	Sílica ativa ou dióxido de silício.
SO₂,	Anidrido sulfúrico.
TiO₂,	Óxido de titânio.
α_E,	Coeficiente função do tipo de agregado, variando de 1,2 para basalto a 0,7 para arenito.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 01: Pasta de cimento sem aditivos (a), com aditivo super plastificante (b) e com super plastificante e aditivo mineral de elevada finura (c).....	32
FIGURA 02: Relações entre a resistência à compressão e os coeficientes de carbonatação para as diversas misturas pozolânicas	36
FIGURA 03: Curvas tensão-deformação de CAD conforme norma norueguesa	38
FIGURA 04: Fluxograma do Método de Aïtcin.....	41
FIGURA 05: Relação entre a relação a/ag e a resistência à compressão aos 28 dias.....	41
FIGURA 06: Exemplo de diagrama de dosagem com o teor de argamassa variando	45
FIGURA 07: Reação gerada pela sílica ativa e imagens de sua utilização ou não	48
FIGURA 08: a) Edifício Burj Khalifa (ENGENHARIA ESTRUTURAL E CONSTRUÇÃO CIVIL, 2012); b) Fundação em radier (ABDELRAZAQ et al., 2008); c) estrutura com paredes diafragamas internas e pilares circulares externos (BAKER et al., 2007)	51
FIGURA 09: Alternativas de projeto da Ponte <i>Stichte</i> , Holanda, utilizando concreto leve C45, concreto normal C65 e CAD C85	52
FIGURA 10: Fluxograma simplificado do projeto de pesquisa.....	58
FIGURA 11: Betoneira de eixo inclinado com capacidade de 120 litros	75
FIGURA 12: Preenchimento do tronco de cone para realização do <i>slump test</i>	76
FIGURA 13: O concreto após ser colocado nas fôrmas	77
FIGURA 14: Identificação dos corpos de prova.....	78
FIGURA 15: Tanque com água onde são mantidos os corpos de prova após suas retiradas das fôrmas	78
FIGURA 16: Recipiente com enxofre sólido para capeamento.....	79
FIGURA 17: Corpos de prova capeados com enxofre.....	79
FIGURA 18: Medição do abatimento do concreto.....	82
FIGURA 19: Prensa hidráulica da fabricante Solotest para realização do ensaio de compressão axial	83

FIGURA 20: Prensa hidráulica da fabricante <i>Forney</i> para realização do ensaio de compressão axial e também o de tração por compressão diametral	84
FIGURA 21: Realização do ensaio de compressão axial	88
FIGURA 22: Corpo de prova após realização do ensaio de compressão axial	88
FIGURA 23: Prensa hidráulica da fabricante Solocap para realização do ensaio de tração por compressão diametral	89
FIGURA 24: Realização do ensaio de tração por compressão diametral	92
FIGURA 25: Corpo de prova após realização do ensaio de tração por compressão diametral.....	92

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 01: Comparação entre penetração de cloretos em concreto usual e em CAD.....	54
GRÁFICO 02: Comparação entre a carbonatação em concreto usual e em CAD..	54
GRÁFICO 03: Curva granulométrica do agregado e limites granulométricos da graduação 4,75/12,5 mm conforme a NBR 7211:2009	63
GRÁFICO 04: Curva granulométrica do agregado e limites granulométricos da graduação 9,5/25 mm conforme a NBR 7211:2009	65
GRÁFICO 05: Curva granulométrica do agregado e limites granulométricos da graduação 0,15/9,5 mm conforme a NBR 7211:2009	67

LISTA DE TABELAS

TABELA 01: Caracterização mecânica do cimento CP V-ARI MAX.....	59
TABELA 02: Caracterização física do cimento CP V-ARI MAX.....	60
TABELA 03: Caracterização química do cimento CP V-ARI MAX	60
TABELA 04: Características físicas e químicas da sílica ativa.....	61
TABELA 05: Massa unitária da sílica ativa.....	61
TABELA 06: Comparativo de finura de alguns materiais	61
TABELA 07: Caracterização do agregado graúdo (brita 0)	62
TABELA 08: <i>Check list</i> da granulometria agregado graúdo (brita 0).....	63
TABELA 09: Caracterização do agregado graúdo (brita 1)	64
TABELA 10: <i>Check list</i> da granulometria agregado graúdo (brita 1).....	64
TABELA 11: Caracterização do agregado miúdo (areia)	66
TABELA 12: <i>Check list</i> da granulometria do agregado miúdo (areia)	66
TABELA 13: Características técnicas do superplastificante PLASTOL® 4010	68
TABELA 14: Parâmetros utilizados para a análise da água.....	69
TABELA 15: Resultados dos testes de acordo com os parâmetros apresentados anteriormente para a análise da água.....	69
TABELA 16: Traço unitário e densidade de cada material.....	70
TABELA 17: Traço unitário, traço final com e sem umidade descontada dos materiais para a dosagem do lote W1	73
TABELA 18: Traço unitário, traço final com e sem umidade descontada dos materiais para a dosagem do lote W1 já corrigido pela adição de água	74
TABELA 19: Proporção dos materiais em massa por dosagem.....	75
TABELA 20: Datas de realização das dosagens e ensaios de cada lote	80
TABELA 21: Resultados da medição do abatimento do concreto pelo ensaio <i>slump test</i>	81
TABELA 22: Resultados obtidos na realização dos ensaios de compressão axial aos 7 dias.....	86
TABELA 23: Avaliação do ensaio através do coeficiente de variação dentro do ensaio.....	87

TABELA 24: Resultados obtidos na realização dos ensaios de tração por compressão diametral aos 7 dias.....	91
TABELA 25: Razão entre resistência à tração e a resistência à compressão.....	93

LISTA DE QUADROS

QUADRO 01: Tipos de cimento <i>Portland</i> em função das adições	23
QUADRO 02: Resistência à compressão de alguns cimentos <i>Portland</i> do Brasil. .	27
QUADRO 03: Resistência média do concreto em MPa em função da relação a/c para vários tipos de cimentos brasileiros	28
QUADRO 04: Relações f_{cj}/f_c , admitindo cura úmida em temperatura de 21°C a 30°C	28
QUADRO 05: Efeitos do teor de pozolana.....	35
QUADRO 06: Efeitos do nível de resistência.....	35
QUADRO 07: Módulos de elasticidade tangente e reduzido	37
QUADRO 08: Determinação da água mínima de dosagem do CAD	42
QUADRO 09: Principais obras em CAD	50

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	16
2.	OBJETIVOS	18
2.1.	Objetivo Geral	18
2.2.	Objetivos Específicos	18
3.	JUSTIFICATIVA	19
4.	REFERENCIAL TEÓRICO	20
4.1.	Concreto de Cimento <i>Portland</i>	20
4.1.1.	História e Desenvolvimento	20
4.1.2.	Materiais Constituintes	21
4.1.3.	Uso do Concreto de Cimento <i>Portland</i>	25
4.1.4.	Propriedades mecânicas	27
4.2.	Concreto de Alto Desempenho (CAD)	29
4.2.1.	Materiais para uso no CAD	30
4.2.2.	Propriedades mecânicas	33
4.2.3.	Dosagem do CAD	39
4.3.	Sílica Ativa	46
4.3.1.	Uso de Sílica Ativa em CAD	47
4.4.	CAD com Adição de Sílica Ativa	49
4.4.1.	Uso em Obras de Construção Civil	49
4.4.2.	Dosagem de CAD com Sílica Ativa	53
4.5.	Durabilidade	53
4.6.	Vantagens do uso de CAD com Sílica Ativa	55
5.	MATERIAIS E MÉTODOS	57

5.1. Materiais	59
5.1.1. Cimento	59
5.1.2. Adição Mineral	60
5.1.3. Agregados	61
5.1.4. Aditivo Superplastificante	67
5.1.5. Água de Amassamento	68
5.2. Métodos	70
5.2.1. Proporcionamento dos Materiais	70
5.2.2. Produção e Preparo dos Corpos de prova	75
6. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	81
6.1. <i>Slump Test</i>	81
6.2. Resistência à Compressão Axial	82
6.3. Resistência à Tração por Compressão Diametral	89
7. CONSIDERAÇÕES FINAIS	94
7.1. Conclusões	94
7.2. Sugestões para Trabalhos Futuros	95
REFERÊNCIAS	96

1. INTRODUÇÃO

O emprego do concreto está presente na maioria das obras de infraestrutura dos países sendo utilizados em edificações residenciais, industriais e comerciais. Essa grande utilização é devido as suas características excepcionais de versatilidade, resistência, durabilidade e economia. Estes fatores vêm fazendo com que o concreto seja estudado a fundo desde meados do século XIX gerando novas possibilidades de materiais e até a melhoria da qualidade dos já existentes.

Com o passar do tempo percebeu-se a necessidade de se obter mais avanços na qualidade do concreto em relação, principalmente, a sua durabilidade e resistência mecânica. Com a preocupação sobre a implantação de edifícios muito altos e de maior porte foi necessária a criação de concretos mais eficientes, pois os materiais que eram utilizados já não permitiam chegar a tais níveis de resistência e durabilidade.

Foi desenvolvido então o Concreto de Alto Desempenho (CAD) na Noruega na década de 1950, com a adição de novos materiais que fizeram com que o concreto ultrapassasse a barreira dos 50 MPa de resistência à compressão.

No final dos anos 60 foram utilizados pela primeira vez os superplastificantes nos concretos, mas seus maiores avanços foram alcançados nos anos 80 que, utilizados juntamente com subprodutos pozolânicos e outros aditivos fizeram com que os concretos alcançassem resistências próximas e superiores a 100 MPa diminuindo assim o fator água/cimento sem diminuir a trabalhabilidade.

Hoje já se consegue ultrapassar a marca de 150 MPa graças aos avanços da tecnologia, descobertas e criação de novos materiais e substâncias. Mas o Concreto de Alto Desempenho não é só um concreto de alta resistência, ele deve ter características desejáveis como: baixa permeabilidade, elevado módulo de elasticidade, resistência a certos tipos de ataque, elevada densidade (EVANGELISTA, 1996).

O foco deste trabalho se dará na utilização de sílica ativa, estando sempre presente no Concreto de Alto Desempenho, garantindo-lhe benefícios nas propriedades mecânicas e em sua microestrutura devido, principalmente, a seus efeitos físicos e químicos.

Tem-se o objetivo de analisar a utilização de sílica ativa no Concreto de Alto Desempenho observando-se principalmente: as vantagens e desvantagens de seu uso, ganho de resistência mecânica, sua utilização nas obras de construção civil e avaliar qual porcentagem de adição de sílica ativa é a mais eficiente na obtenção de altas resistências à compressão e tração do concreto de alto desempenho.

Pretende-se com este trabalho demonstrar a importância da adição de sílica ativa no Concreto de Alto Desempenho esclarecendo suas propriedades que favorecem na constituição e desempenho do CAD e sua viabilidade.

O trabalho se constitui de dados obtidos através de livros, normas, *sites*, revistas e documentários relatados por autores e empresas confiáveis, mas também contém os resultados de pesquisas do autor deste trabalho, que devem ser comparados com os dados já declarados por outros autores.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

Avaliar as propriedades mecânicas do concreto de alto desempenho com adição de sílica ativa.

2.2. Objetivos Específicos

- Verificar as vantagens e desvantagens da utilização de sílica ativa no Concreto de Alto Desempenho;
- Verificar o ganho de resistência mecânica devido à adição de sílica ativa em CAD;
- Discutir a utilização de CAD com sílica ativa nas obras de construção civil;

3. JUSTIFICATIVA

Acredita-se que este trabalho seja viável devido à possibilidade de se conseguir demonstrar a eficiência da sílica ativa no CAD, demonstrando como ela consegue essa eficácia e porque ela pode também gerar uma economia pois, se pode reduzir o volume de cimento quando ela é utilizada.

Também se deseja demonstrar que a sílica ativa além de ser um subproduto proveniente da fabricação de silício metálico, também pode ser obtida através das cinzas do bagaço da cana-de-açúcar e da casca de arroz.

A utilização das cinzas do bagaço da cana-de-açúcar e da casca de arroz gera também além de economia, a diminuição do índice de poluição. Deve-se ressaltar também que ao utilizar essas outras formas acaba-se dando um fim útil à casca de arroz e, principalmente ao bagaço da cana-de-açúcar, por ele ser produzido em maior escala no Brasil através da agroindústria.

Pretende-se então demonstrar que de acordo com todos esses fatos citados acima, a sílica ativa é muito importante para a composição do CAD, sendo ainda, um objeto de estudo em se tratando dos seus métodos de obtenção e sua adição em um teor ótimo.

4. REFERENCIAL TEÓRICO

4.1. Concreto de Cimento *Portland*

4.1.1. História e Desenvolvimento

O concreto de cimento *Portland* é considerado o material estrutural mais importante da atualidade na construção civil. Mesmo sendo sua descoberta mais recente em relação aos outros materiais empregados na construção de estruturas, pode-se considerá-lo como uma das mais interessantes descobertas da história da qualidade de vida e desenvolvimento da humanidade (ANDRADE; HELENE, 2010).

Segundo Andrade e Helene (2010), foi a descoberta (fim do século XIX) e o intensivo uso (século XX) do concreto de cimento *Portland* que fez com que ele se transformasse no material mais consumido pelo homem depois da água, revolucionando a arte de projetar e construir estruturas.

Desde então, foram realizados diversos estudos sobre o material. Duas das grandes potências das sociedades atuais, os Estados Unidos e o Canadá, resolveram investir no estudo das estruturas de concreto pois, acreditavam ser um dos mais importantes investimentos na ciência e tecnologia, visando também manter a qualidade de vida de seu povo e não perderem a sua alta competitividade nesta área (ANDRADE; HELENE, 2010).

Em 1989 foram então realizados apoios financeiros aos programas ACBM *Center for Advanced Cement-Based Materials* na Universidade de *Northwestern* e *Béton* Canadá, em *Sherbrooke*, compreendendo que o estudo do concreto deve estar relacionado também a recursos naturais, eletrônica, saúde, biotecnologia, espaço sideral entre outras (ANDRADE; HELENE, 2010).

De acordo com Andrade e Helene (2010), os resultados dessas pesquisas foram muito satisfatórios demonstrando que o concreto de cimento *Portland* alcançou uma enorme evolução nessas duas últimas décadas podendo ser considerada como uma 4ª revolução na maneira de construir e projetar estruturas.

Conforme Andrade e Helene (2010), nos últimos 10 anos foram publicados vários trabalhos relacionados à pesquisa e desenvolvimento do concreto. Dentre

eles, destacam-se algumas inovações relacionadas às variações, que vão desde concretos de alto desempenho até concretos reforçados com fibra de aço, sendo estas apenas duas modalidades dentre várias outras, cada uma com uma característica própria e um objetivo a cumprir.

Devido a estes e a vários outros fatores estima-se que a produção mundial de cimento deva crescer 5% ao ano. Mas deve-se ressaltar que para chegar a esse ponto será preciso um desfrute maior do meio ambiente, utilizando assim maiores quantidades de materiais não renováveis e ao mesmo tempo gerando maior poluição atmosférica (BERTOLINI, 2010).

Mas a visão que se pretende demonstrar sobre este material é que ele é de importância vital para a economia, para construção civil e para a arquitetura moderna. Ele é considerado um material versátil e rico para descrever a história através de monumentos duráveis e originais sendo, principalmente, considerado um material fundamental para a qualidade de vida, ciência aplicada e essencial para a engenharia, tornando-o um dos prioritários investimentos para grandes e pequenas nações (ANDRADE; HELENE, 2010).

4.1.2. Materiais Constituintes

Para obter-se o concreto de cimento *Portland* a mistura deve conter cimento, agregados e água, podendo ter também aditivos, fibras, pigmentos, adições minerais e agregados minerais, tudo dependendo da necessidade e das condições a se alcançarem. A tecnologia que vem sendo desenvolvida e aplicada no concreto permite que hoje se possam atender simultaneamente propriedades físicas, mecânicas e de durabilidade sem esquecer-se da trabalhabilidade necessária para se realizar o transporte, adensamento e lançamento, devendo-se realizar uma proporção entre os constituintes do concreto (ANDRADE; HELENE, 2010).

Um dos principais elementos constituintes do concreto de cimento *Portland* é o próprio **cimento *Portland***, que é um produto obtido pela pulverização de clinker composto principalmente de silicatos hidráulicos de cálcio, juntamente com uma proporção adequada de cálcio natural e ao mesmo tempo com adições de certas

substâncias capazes de facilitar seu emprego ou modificar suas propriedades (BAUER, 2011).

Segundo Bauer (2011), o cimento *Portland* é constituído fundamentalmente de cal (CaO), sílica ativa (SiO₂), óxido de ferro (Fe₂O₃), alumina (Al₂O₃), uma pequena porcentagem de anidrido sulfúrico (SO₂) e uma limitada proporção de magnésia (MgO). Mas existem ainda constituintes menores, óxido de sódio (Na₂O), óxido de potássio (K₂O), óxido de titânio (TiO₂), impurezas e outras substâncias de menor importância.

Conforme Bauer (2011), os componentes essenciais para o cimento *Portland* são a cal, a sílica, o óxido de ferro e a alumina que compõem aproximadamente de 95 a 96% do total da análise de óxidos. A magnésia está presente em proporções de 2 a 3%, podendo alcançar o máximo de 5% porém, no Brasil, chega-se a 6,4%. Já os outros óxidos menores chegam à proporção de no máximo 1%, mas se for algum caso especial não deve ultrapassar 2%.

Deve-se ressaltar que o conhecimento e seguimento da proporção dos elementos constituintes do cimento Portland é de fundamental importância pois são eles que determinam as propriedades finais do cimento e conseqüentemente do concreto (BAUER, 2011).

Sua fabricação é resultante da moagem do clinker sendo este obtido da calcinação de uma mistura crua de calcário e argila seguindo uma dosagem e homogeneização adequada. Depois da queima é realizada uma adição de gesso, com o objetivo de impedir que ocorram instantaneamente as reações de hidratação entre o cimento e a água. Sua forma ao sair do forno é a de nódulos escurecidos, mas logo que se resfria ele é moído e recebe a adição de gesso (RIBEIRO, PINTO, STARLING, 2011).

Existem vários tipos de cimento *Portland* normatizados pela ABNT, sendo os principais demonstrados pelo QUADRO 01 a seguir:

Quadro 01 – Tipos de cimento *Portland* em função das adições

Tipos de Cimento Portland	Sigla	Composição (% de massa)			
		Materiais			
		Clínquer	Escória	Pozolana	Carbonáticos
CP comum	CP I	100	0	0	0
CP com adição	CP I - S	95 - 100		1 - 5	
CP com escória	CP II - E	56 - 94	6 - 34	-	0 - 10
CP com pozolana	CP II - Z	76 - 94	-	6-14	0 - 10
CP com fíler	CP II - F	90 - 94	-	-	6 - 10
CP de alto-forno	CP III	25 - 65	35 - 70	-	0 - 5
CP pozolânico	CP IV	50 - 85	-	15 - 50	0 - 5
CP de alta resistência inicial	CP V ARI	95 - 100	0	0	0 - 5

Fonte: RIBEIRO, PINTO, STARLING (2011)

Deve-se resaltar que cada tipo de cimento *Portland* é determinado pela sua composição sendo esta definitiva para sua classificação e conseqüentemente o local e condições de onde se deve empregar cada tipo (RIBEIRO, PINTO, STARLING, 2011).

Outro elemento essencial na composição do concreto é o **agregado**, que é um material de atividade química praticamente nula, particulado, incoesivo¹, composto por misturas de partículas que cobrem uma extensa gama de tamanhos (BAUER, 2011).

Os agregados podem ser classificados segundo sua origem, dimensões das partículas e peso específico aparente, sendo estas classificações de primordial importância para a realização do concreto previsto em projeto, com os agregados já devidamente determinados conforme estas classificações (BAUER, 2011).

Segundo Bauer (2011), os produtos resultantes da classificação dos agregados podem ser também divididos em industrializados e naturais.

Os industrializados podem ser subdivididos nos seguintes elementos: brita, pedra britada, pó de pedra, areia de brita, *fíler* (possui graduação 0,005/0,075, tendo

¹ Incoesivo é algo que não possui coesão, ou seja, não possui resistência ao cisalhamento.

seus grãos uma mesma ordem de grandeza dos de cimento), bica-corrida (material britado no estado em que se encontra a saída do britador), rachão (é a fração acima de 76mm da bica-corrida primária), restolho e blocos. Suas matérias primas são rochas que dentre as mais utilizadas se destacam: granito, basalto, gnaise, calcário, arenito, escória de alto-forno, hematita, dentre outras (BAUER, 2011).

Segundo o mesmo autor, os agregados naturais são divididos em areias e cascalhos, podendo essas duas divisões ainda serem subdivididas em outras categorias, de acordo com suas características, origens, propriedades mecânicas, impurezas, usos, entre outras. Estas subdivisões influenciam diretamente na escolha e no resultado final pretendido na mistura dos elementos necessários para geração de um bom concreto pois, deve-se resaltar como exemplo que o traço para o projeto já foi especificado, sendo que uma variação de umidade ou de granulometria nos agregados utilizados pode alterar significativamente o traço de um concreto. Este exemplo serve tanto para agregados naturais quanto para os industrializados.

Outros elementos importantes presentes na composição do concreto são os **aditivos** que são todos os produtos não indispensáveis à composição e finalidade do concreto. Estes são encontrados geralmente em quantidades pequenas e bem homogeneizadas com o objetivo de reforçar ou demonstrar mais claramente algumas características (BAUER, 2011).

Conforme Bauer (2011), os aditivos podem ser classificados da seguinte forma:

- **Aditivos destinados a melhorar a trabalhabilidade do concreto:**
 - Plastificantes redutores;
 - Incorporadores de ar;
 - Dispersantes ou fluidificantes.
- **Modificadores das resistências mecânicas:**
 - Redutores plastificantes.
- **Modificadores das resistências do concreto a condições especiais de exposição:**
 - Incorporadores de ar.
- **Impermeabilizantes:**
 - Repelentes à absorção capilar;

- Redutores da permeabilidade.
- **Modificadores de tempo de pega e endurecimento:**
 - Retardadores;
 - Aceleradores.
- **Expansores:**
 - Geradores de gás;
 - Geradores de espuma;
 - Estabilizadores de volume.
- **Adesivos;**
- **Anticorrosivos;**
- **Corantes, Fungicidas, Germicidas e Inseticidas;**

Porém, deve-se ressaltar que a utilização dos aditivos, comparando-os aos produtos farmacêuticos pode ser benéfica ao causar a cura de certos defeitos ou acrescentar certas qualidades gerando o aparecimento de outras deficiências (BAUER, 2011).

Por fim, deve-se estar atento ao processo de produção do concreto, tendo o profissional os conhecimentos necessários para o proporcionamento dos diversos constituintes que o compõem, que influenciam diretamente em todas as propriedades e desempenho do concreto (ANDRADE; HELENE, 2010).

4.1.3. Uso do Concreto de Cimento *Portland*

Existem hoje no mercado diversas formas de uso do concreto de cimento *Portland*, sendo uma parte delas denominadas como artefatos de cimento que são produzidos tanto com concreto como com argamassa, sendo esta última um tipo particular de concreto sem agregado graúdo (GUIMARÃES; RECENA; PEREIRA, 2007).

De acordo com Guimarães, Recena e Pereira (2007), os artefatos de cimento são divididos nos seguintes produtos:

- **Blocos vazados de concreto para alvenaria;**
- **Ladrilhos hidráulicos:** são placas de concreto de alta resistência ao desgaste para acabamento de pisos externos e internos e paredes, sendo o

formato das placas retangulares, quadradas ou outro formato geometricamente definido;

- **Blocos para pavimentação;**
- **Granilitas ou granitina:** tipo especial de microconcreto sendo destinado a revestimento de pisos, degraus de escadas, bancadas, soleiras e parapeitos;
- **Meios-fios;**
- **Equipamentos básicos de saneamento:** observa-se principalmente a produção de tubos destinados para transporte de água pluvial e esgoto;
- **Telhas;**
- **Muros de placas:** colunas em forma de H onde são encaixadas as placas;
- **Mourões:** são subdivididos em três tipos sendo o primeiro o mourão de suporte (destinado para manter os fios em suspensão praticamente imóveis), o segundo que é o mourão esticador e o terceiro que é o de escora;
- **Postes;**
- **Dormentes de concreto:** são os principais elementos das vias férreas responsáveis por suportar os trilhos, transmitir ao lastro as ações horizontais e verticais recebidas pelos veículos ferroviários e também manter o eixo da via férrea constante;
- **Blocos de concreto celular:** são maiores e possuem material mais leve que os demais blocos facilitando assim a velocidade de execução de paredes;

Existem também outros elementos como pré-moldados diversos podendo ser vazados e balaústres, além de peças maiores, como galpões pré-fabricados, terças, passarelas, segmentos para revestimento de túneis, estacas, peças para construção de obras costeiras, como tetrápodes, entre outras peças, sem esquecer-se da utilização mais usual que é o preenchimento de vigas, pilares e lajes (GUIMARÃES; RECENA; PEREIRA, 2010).

4.1.4. Propriedades mecânicas

Um dos principais fatores a serem observados para a realização de uma estrutura de concreto armado é a **resistência característica à compressão**, sendo esta a base a ser adotada no cálculo (ANDRADE; HELENE, 2010).

De acordo com Andrade e Helene (2010), o concreto é considerado uma rocha artificial, através de diversas dosagens desenvolvidas pode-se então alcançar vários níveis de resistência à compressão. No QUADRO 02, demonstrado abaixo, estão representados alguns cimentos nacionais e suas respectivas resistências à compressão:

Quadro 02 – Resistência à compressão de alguns cimentos *Portland* do Brasil

Idade	Resistência à Compressão (28 dias) MPa					
	CP V ARI	CP II F 32	CP II Z 32	CP II Z 32	CP IV 32	CP III 40
1 dia	21,1	-	-	-	-	-
3 dias	33,6	28,8	25,8	22,6	20,6	21,0
7 dias	40,0	35,0	32,0	28,0	29,8	30,2
28 dias	50,1	43,6	42,3	35,0	42,8	50,2

Fonte: ANDRADE; HELENE (2010)

Para obterem-se as resistências desejadas acima e tantas outras possíveis, devem-se seguir diversas etapas disponíveis em forma de normas que determinam todos os procedimentos a serem seguidos. Elas vão desde a coleta de amostras e seus respectivos volumes que determinam as moldagens dos corpos de prova até a qualidade potencial do concreto que está diretamente ligada ao fator água/cimento e seu grau de hidratação. São estes dois fatores os principais parâmetros que influenciam também em outras propriedades mecânicas como a tração, abrasão, fluência, relaxação, módulo de elasticidade, entre outras (ANDRADE; HELENE, 2010).

Segundo ainda os mesmos autores, para alcançar-se essas propriedades deve-se ter o completo controle dos procedimentos de mistura, transporte, lançamento, adensamento, cura e desmoldagem que são de grande importância para as propriedades de permeabilidade, difusividade e absorção capilar de água e gases. O QUADRO 03, a seguir, demonstra brevemente como varia a resistência do

concreto sendo utilizados diferentes tipos de cimentos observando-se a relação água/cimento:

Quadro 03 – Resistência média do concreto em MPa em função da relação a/c para vários tipos de cimentos brasileiros

Tipo e classe de cimento	Relação a/c				
	0,65	0,60	0,55	0,50	0,45
CP I 32	28	32	37	41	47
CP II 32	24	28	31	35	39
CP II 40	28	32	36	41	46
CP III 32	23	27	31	36	41
CP III 40	27	32	37	42	49
CP IV 32	24	28	32	36	41
CP V ARI.RS	30	33	38	42	46
CP V ARI	33	38	42	47	53

Notas:
 1 Agregados de origem granítica 2 Diâmetro máximo dos agregados de 25mm
 3 Abatimento entre 50mm e 70mm 4 Concretos com aditivo plastificante normal

Fonte: ANDRADE; HELENE (2010)

De acordo com Andrade e Helene (2010), deve-se observar ainda que o concreto adquire com o tempo uma evolução da resistência à compressão, sendo este ganho obtido através de ensaios laboratoriais específicos mas, em falta desses, podem-se seguir os resultados obtidos demonstrados no QUADRO 04.

Quadro 04 – Relações f_{cj}/f_c , admitindo cura úmida em temperatura de 21°C a 30°C

Cimento Portland	idade, em dias									
	3	7	14	28	63	91	120	240	360	720
CP III CP IV	0,46	0,68	0,85	1	1,13	1,18	1,21	1,28	1,31	1,36
CP I CP II	0,59	0,78	0,9	1	1,08	1,12	1,14	1,18	1,20	1,22
CP V	0,66	0,82	0,92	1	1,07	1,09	1,11	1,14	1,16	1,17

Fonte: ANDRADE; HELENE (2010)

Mas é necessário lembrar-se de que nem todas as porções do concreto fabricado possuem a mesma resistência, sendo verificado isso a partir de vários fatores de dependência que são: materiais empregados, mistura e condições de

transporte, lançamento, adensamento e cura. Portanto, a resistência do concreto produzido é uma característica que pode variar em cada lote fabricado e em cada ponto onde o material foi lançado (FUSCO, 2008).

Conforme Fusco (2008), em relação à propriedade de **resistência do concreto à tração**, sabe-se que o concreto é muito mais resistente à compressão do que à tração. Em uma peça a ruptura do concreto por meio de tração ocorre na matriz da argamassa, ocorrendo da fratura contornar os grãos do agregado graúdo originando a separação de uma parte do concreto em relação ao restante da peça, devendo-se observar que as tensões de tração correspondem em uma ordem de 1/10 em relação às tensões de compressão que causam a ruptura.

Outra propriedade importante é o **módulo de elasticidade** ou módulo de deformação tangente à origem ou inicial. Este módulo ou o secante que também é utilizado para análise do módulo de elasticidade têm maior relação com o valor médio da propriedade de resistência à compressão de certo concreto que será utilizado na obra, sendo mais prudente calcular E_c (módulo de elasticidade) em função do f_{ck} (resistência característica à compressão do concreto) e assim, prevendo deformações um pouco maiores que as reais, mas com segurança devido às variabilidades no decorrer do processo (ANDRADE; HELENE, 2010).

4.2. Concreto de Alto Desempenho (CAD)

Segundo Tutikian, Isaia e Helene (2011), CAD é um material de qualidade e comportamento superior ao concreto comum, procurando atender satisfatoriamente às especificações exigidas pelo usuário e pelo proprietário e conseqüentemente aos projetistas da estrutura de concreto.

O CAD deve demonstrar ao mesmo tempo alta trabalhabilidade, alta durabilidade, alta resistência, estética, acabamento e integridade. Pretende-se demonstrar então que o CAD não é apenas realizado para se alcançar altas resistências, mas também atender as qualidades citadas acima de acordo com as necessidades da estrutura e solicitações do projetista (TUTIKIAN; ISAIA; HELENE, 2011).

4.2.1. Materiais para uso no CAD

Os materiais a serem utilizados na constituição do CAD devem ser selecionados essencialmente para proporcionar a geração de um concreto durável, resistente e que apresente as condições adequadas de trabalhabilidade que devem ser ideais ao assentamento nas formas (TUTIKIAN; ISAIA; HELENE, 2011).

De acordo com Tutikian, Isaia e Helene (2011), os componentes do CAD são: cimento, agregado graúdo, agregado miúdo, aditivo químico, adição mineral, pigmentos, fibras e água. Pode-se deixar de utilizar alguns desses componentes ou também utilizar mais de um do mesmo grupo, isso dependendo das condições e finalidades da estrutura a ser empregada.

Tutikian, Isaia e Helene (2011) descreveram algumas observações a serem vistas em alguns dos materiais mais importantes constituintes do CAD que são:

- **Cimento:** deve ser escolhido o mais puro possível pois se necessita de uma grande quantidade de pozolana sendo a qualidade superior à encontrada em cimentos comerciais sendo exemplos, a escória de alto-forno e a cinza volante. Portanto, sem observar as dimensões das partículas, os cimentos mais recomendados são o CP I e CP V ARI;

Aïtcin (2000) apresenta um resumo dos requisitos dos cimentos utilizados no CAD descritos abaixo:

- É preciso ter acesso a informações sobre o C_3A e sobre os sulfatos de cálcio, devendo a soma dos dois elementos estarem por volta de 14 e 16%;
- É de grande importância a utilização de ensaios de reologia e *mini-slump* e cone de *Marsh* entre o cimento, os superplastificantes e a água são necessários para verificar a compatibilidade entre o cimento e o aditivo a ser utilizado;
- A finura deve ser média;
- Realizar o DRX (Difratometria de raios X) do cimento, buscando demonstrar os compostos menores, sendo importante para se observar o tipo de C_3A e sulfatos.

➤ **Adição mineral:** é a adição de materiais com atividade pozolânica inseridos à mistura, sendo exemplos a escória básica granulada de alto-forno, sílica ativa, metacaulim, cinza de casca de arroz, cinzas volantes, entre outras. Mas deve-se deixar claro que ao inserir um novo material deve-se retirar parte de outro da mistura para conservar o mesmo volume e unidade;

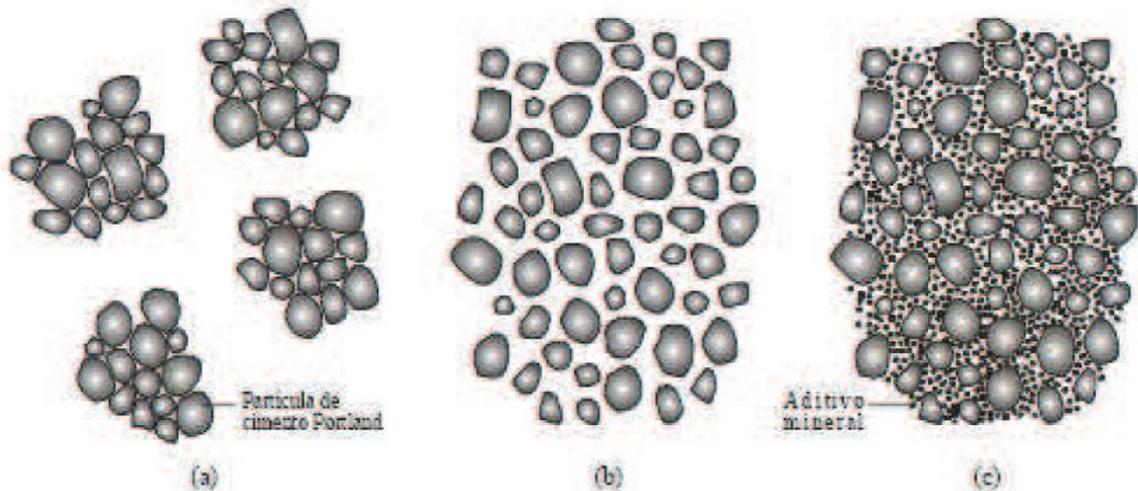
Atualmente, as adições pozolânicas que estão sendo mais utilizadas são o metacaulim, a sílica ativa e a cinza da casca de arroz devido ao fato de possuírem grãos de pequena dimensão além de terem a capacidade de consumir o $CA(OH)_2$. Devido às pequenas dimensões dessas partículas as reações ocorrem mais rápido além de quebrarem a inércia do sistema ocorrendo assim a hidratação mais rápida e completa.

➤ **Aditivos químicos:** tem a função de melhorar a consistência do concreto sem aumentar a quantidade de água a ser utilizada podendo também aumentar a durabilidade e propriedades mecânicas da mistura visando-se também manter a consistência e reduzir o consumo de cimento. São recomendados os aditivos superplastificantes de terceira geração observando-se que atualmente no mercado já existem os de quarta geração. Mas é necessário observar certas características como a compatibilidade entre o aditivo e o cimento, o grau de elevação de trabalhabilidade no concreto em relação aos materiais utilizados e o tempo de ação;

A FIG. 01 demonstra o efeito *filler*², e assim demonstra com clareza a importância da utilização de aditivos na composição dos concretos de cimento. Ela representa a ação do efeito *filler* por meio da ação conjunta de um cimento *Portland* com a água, de um aditivo mineral de alta finura e de um aditivo químico superplastificante.

² O efeito *filler* é definido pelo preenchimento dos vazios entre partículas do cimento por finíssimos grãos de determinado material, aumentando assim a resistência e compacidade do material.

Figura 01 – Pasta de cimento sem aditivos (a), com aditivo superplastificante (b) e com superplastificante e aditivo mineral de elevada finura (c)



Fonte: MEHTA e MONTEIRO (2008)

➤ **Agregados:** devem ser alvo de estudo na composição do CAD pois o concreto ao alcançar resistências elevadas, acredita-se que os agregados são o elo fraco da mistura.

Aïtcin (2000) apresenta um resumo dos requisitos dos agregados utilizados no CAD descritos abaixo:

- São recomendados os diâmetros para as seguintes classes de CAD: 25mm para CAD classe I e II, 19mm para classe III e 12mm para a classe IV e V;
- Deve ser escolhido criteriosamente, pois o agregado corresponde ao fator limitante da resistência última do CAD, em relação a patamares acima de 100MPa;
- É aconselhável utilizar a menor dimensão possível do agregado gráudo, que diminui assim a zona de transição tornando-a mais homogênea, sendo resultado desta escolha que ao utilizar partículas menores, se ganha resistência, pois estas partículas apresentam menos microfissuras, poros menores e menos inclusões de materiais frágeis;
- É preferível que agregado gráudo possua módulo de finura entre 2,7 a 3,0, sem partículas finas, excluindo-se os grãos menores de 5mm;

- A forma cúbica é a mais indicada para os agregados, podendo ser utilizadas rochas diabásicas, dolomíticas, calcárias, graníticas, e de preferência pedra glacial britada.

4.2.2. Propriedades mecânicas

Segundo Tutikian, Isaia e Helene (2011), a microestrutura do CAD é diferente do concreto comum, sendo incorreto acreditar que as propriedades do CAD no estado endurecido são apenas um prolongamento dos concretos usuais.

O CAD atua essencialmente como material composto não isotrópico, constituídos de pasta de cimento hidratado e agregados que tem a possibilidade de possuírem propriedades mecânicas muito diferentes. Possui microestrutura compacta que inclui a zona de transição com o agregado graúdo, sendo delgada ou quase inexistente. Percebe-se então a grande influência das propriedades mecânicas do agregado graúdo em relação às propriedades finais do CAD (TUTIKIAN; ISAIA; HELENE, 2011).

De acordo com Tutikian, Isaia e Helene (2011), as propriedades do CAD que são mais distintas em relação ao concreto comum são: retração autógena, cura, calor de hidratação, módulo de elasticidade, resistência à compressão e efeito das altas temperaturas.

A **retração autógena** ocorre pelo fato de água ser drenada da rede de poros que existe no interior do concreto para fora ou para poros menores durante a hidratação, sendo necessária a reposição. Mas se não acontecer a reposição pela cura com água externa, ou se o concreto for muito compacto acarretando a perda da velocidade da entrada de água em relação à quantidade necessária para o consumo interno, tem-se início o processo de autossecação (a água dentro do concreto reage com cristais de cimento, gerando o dessecamento dos poros internos) gerando então a retração autógena (TUTIKIAN; ISAIA; HELENE, 2011).

O importante a ser observado é que se deve realizar uma boa cura do concreto, tanto no CAD quanto no concreto comum, até que sejam desenvolvidas resistências suficientes para combater os esforços de retração sem fissurar (TUTIKIAN; ISAIA; HELENE, 2011).

A **resistência à compressão** do CAD geralmente é superior ao do CC (concreto comum). No caso do CC, é válida a lei de Abrams que gera uma relação entre o acréscimo de resistência à compressão com a diminuição da relação a/c (água/cimento) ou a a/ag (água/aglomerante), em proporção exponencial. Porém, essa lei só é válida se a resistência da pasta for menor do que a do agregado gráudo, devido ao fato de quando o agregado se torna a parte fraca da microestrutura, a resistência do CAD não aumenta de forma significativa à medida que a relação a/ag diminui (TUTIKIAN; ISAIA; HELENE, 2011).

Conforme Tutikian, Isaia e Helene (2011), quando a resistência do agregado gráudo é adequada em relação à pasta, nem sempre se consegue estabelecer uma regra geral entre a relação a/ag , observando-se que esse mesmo patamar de resistência pode ser alcançado de várias maneiras, em especial utilizando-se adições pozolânicas, que conseguem modificar significativamente a relação $f_c \times a/ag$.

Ao se utilizar adições minerais no CAD, as equações de Abrams tornam-se válidas para cada caso específico, dependendo do teor e do tipo de adição mineral a ser utilizada. Isto ocorre devido às alterações provenientes das reações pozolânicas no refinamento dos poros dos grãos de CH (hidróxido de cálcio $CA(OH)_2$), que por consequência das proximidades das paredes dos poros, geram um aumento no efeito físico devido às forças das superfícies de van der Waals (corresponde ao envelope molecular contendo as esferas atômicas de raio igual ao raio de van der Waals), em relação ao potencial zeta (é um indicador útil da carga efetiva das partículas e pode ser usado para prever e controlar a estabilidade de suspensões ou emulsões coloidais). Relacionando-se essas ligações secundárias com as atrações físicas, gera-se um aumento da resistência à compressão e de outras propriedades do concreto, sendo maiores à medida que as superfícies estiverem próximas, concluindo-se que quanto menor as dimensões dos poros, menores serão as relações a/ag (TUTIKIAN; ISAIA; HELENE, 2011).

Observa-se então que, outras propriedades relacionadas com a durabilidade e resistência mecânica do CAD com adições minerais são provenientes não só das reações de hidratação, mas também pelas reações pozolânicas e pelos efeitos físicos de superfície, havendo então uma parceria entre si, potencializando o resultado do parâmetro que está sendo medido, o comparando em relação a um

concreto sem adições minerais. Mas deve-se saber que os efeitos provenientes das reações pozolânicas aumentam dependendo do teor da adição mineral e ao mesmo tempo decresce o aumento da resistência (TUTIKIAN; ISAIA; HELENE, 2011).

Isaia, Gastaldini e Moraes³ (2003 apud TUTIKIAN; ISAIA; HELENE, 2011) apresentam por meio do QUADRO 05 e QUADRO 06 observações em relação ao acréscimo percentual, observando-se um maior efeito sobre o aumento do teor de pozolana do que o do nível de resistência.

Quadro 05 – Efeitos do teor de pozolana

Adição Mineral	12.5 %	50 %
Efeito total	+ 22 %	+ 79 %
Efeito pozolânico	+ 20 %	+ 45 %
Efeito físico	+ 2 %	+ 34 %

Quadro 06 – Efeitos do nível de resistência

Nível de resistência	35 MPa	65 MPa
Efeito total	+ 42 %	+ 55 %
Efeito pozolânico	+ 36 %	+ 30 %
Efeito físico	+ 6 %	+ 25 %

Fonte: ISAIA; GASTALDINI; MORAES (2003)

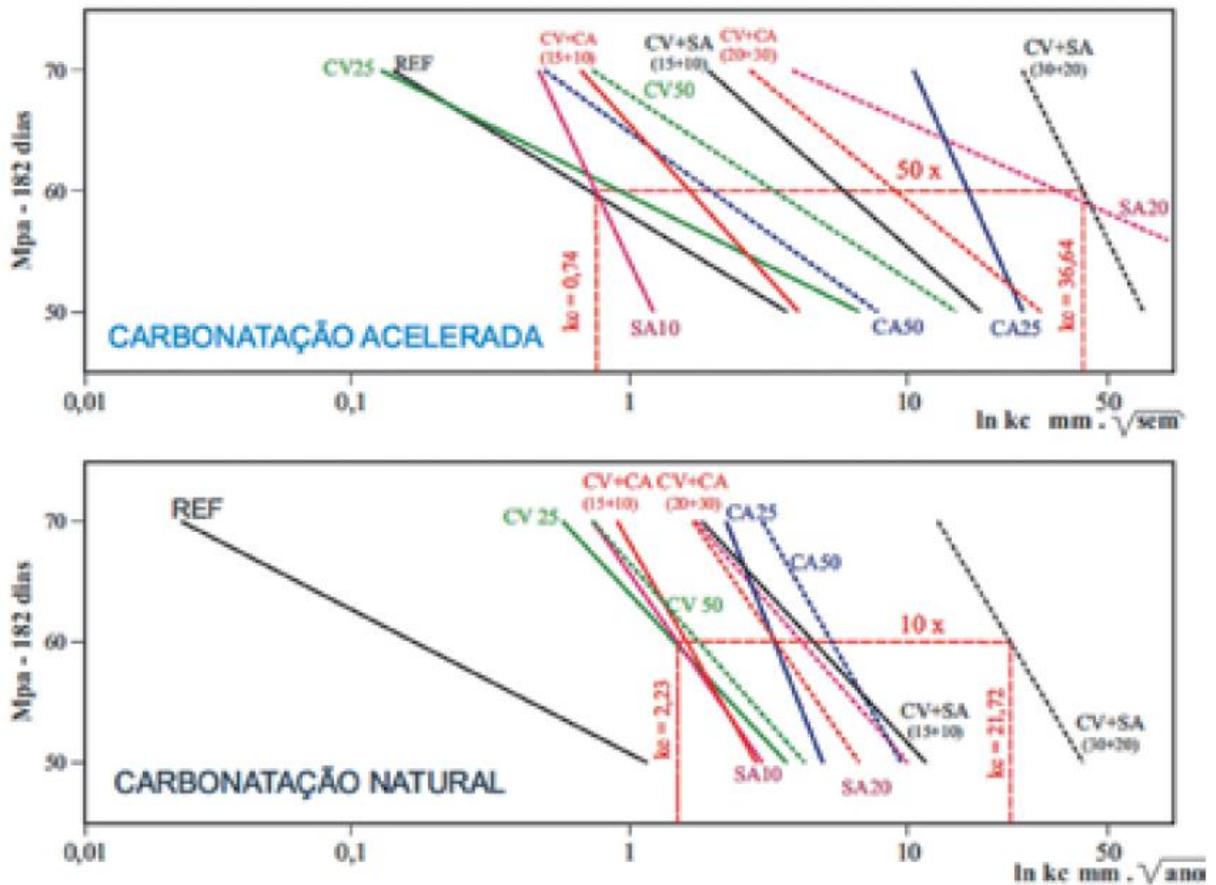
Fonte: ISAIA; GASTALDINI; MORAES (2003)

Isaia, Vagheti e Gastaldini⁴ (2001 apud TUTIKIAN; ISAIA; HELENE, 2011), apresentaram a FIG. 02 que demonstra através de uma pesquisa sobre carbonatação acelerada e natural utilizando 11 amostras de misturas pozolânicas compostas por sílica ativa, cinza de casca de arroz e cinza volante, contidas em misturas terciárias e binárias com teores dentro da faixa de 10% a 50%. Na pesquisa, para se atingir o nível de 60 MPa de resistência, as relações a/ag variaram de 0,30 a 0,61, demonstrando enfim que os poros formados com diferentes estruturas pelos tipos e teores de pozolana aplicados, foram responsáveis tanto quanto na variação da difusão de CO₂, como no teor de CH que permaneceu em cada mistura.

³ ISAIA, G. C.; GASTALDINI, A. L. G.; MORAES, R. Physical and pozzolanic action of mineral additions on the mechanical strength of high-performance concrete. **Cement & Concrete Research**, v. 25, p. 69-76, 2003.

⁴ ISAIA, G. C.; VAGHETTI, M.; GASTALDINI, A. L. G. Carbonatação acelerada e natural de concreto com alto teor de pozolana: um estudo preliminar. *In*: Congresso Brasileiro do IBRACON, 43, 2001, Foz do Iguaçu. **Anais...** São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, 2001. Trabalho III-023.

Figura 02 – Relações entre a resistência à compressão e os coeficientes de carbonatação para as diversas misturas pozolânicas



Fonte: ISAIA; VAGJETTI; GASTALDINI (2001)⁵

Portanto, para se executar estruturas mais duráveis em ambientes agressivos, é necessário produzir-se CAD dosado para fim específico, sob medida, em que são pesquisadas em laboratório as relações únicas entre as propriedades necessárias para a estrutura e sua eficácia em obras (ISAIA, 1995).

O **módulo de elasticidade** no CAD é importante porque é uma propriedade que influencia diretamente nas deformações dos elementos que compõem a estrutura. De forma geral, a sua previsão é feita por meio da resistência à compressão, na condição de que exista uma relação proporcional entre estas propriedades, tendo-se em vista que os parâmetros que influenciam são os mesmos,

⁵ ISAIA, G. C.; VAGHETTI, M.; GASTALDINI, A. L. G. Carbonatação acelerada e natural de concreto com alto teor de pozzolana: um estudo preliminar. *In*: Congresso Brasileiro do IBRACON, 43, 2001, Foz do Iguaçu. **Anais...** São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, 2001. Trabalho III-023.

embora em graus diferentes. Então, se deve lembrar que o principal parâmetro que tem influência depois da relação a/c ou a/ag é a resistência do agregado graúdo, pois esta consegue diminuir ou aumentar o valor de E_c , alcançando-se a mesma resistência à compressão do concreto (TUTIKIAN; ISAIA; HELENE, 2011).

Segundo Tutikian, Isaia e Helene (2011), ao se relacionar o f_c x E_c para o CAD, existem vários métodos, entre eles a equação do fib (CEB-FIP) Model Code 2010 apresenta a equação a seguir:

$$E_{ci} = E_{c0} \times \alpha_E (f_{cm}/10)^{1/3}$$

onde:

E_{ci} : módulo de elasticidade tangente do concreto, a 28 dias, em MPa;

E_{c0} : $21,5 \times 10^3$ MPa;

α_E : coeficiente função do tipo de agregado, variando de 1,2 para basalto a 0,7 para arenito;

f_{cm} : resistência à compressão média, a 28 dias, determinada em corpos de prova.

De acordo com Tutikian, Isaia e Helene (2011), quando se quer analisar somente a fase elástica do concreto na estrutura, pode-se utilizar o módulo de elasticidade reduzido levando em conta as deformações plásticas iniciais que acarretam em deformações irreversíveis utilizando-se a equação a seguir:

$$E_c = \alpha_1 \times E_{ci}$$

em que:

E_c : módulo de elasticidade reduzido;

$\alpha_1 = 0,8 + 0,2 (f_{cm} / 88)$;

E_{ci} : módulo de elasticidade do concreto a 28 dias.

Segundo Tutikian, Isaia e Helene, o QUADRO 07 demonstra os valores do módulo de elasticidade tangente E_{ci} e os módulos reduzidos E_c para CAD entre C50 e C120. Pode-se observar que nas classes superiores a C80, utiliza-se o mesmo valor do módulo de elasticidade tangente.

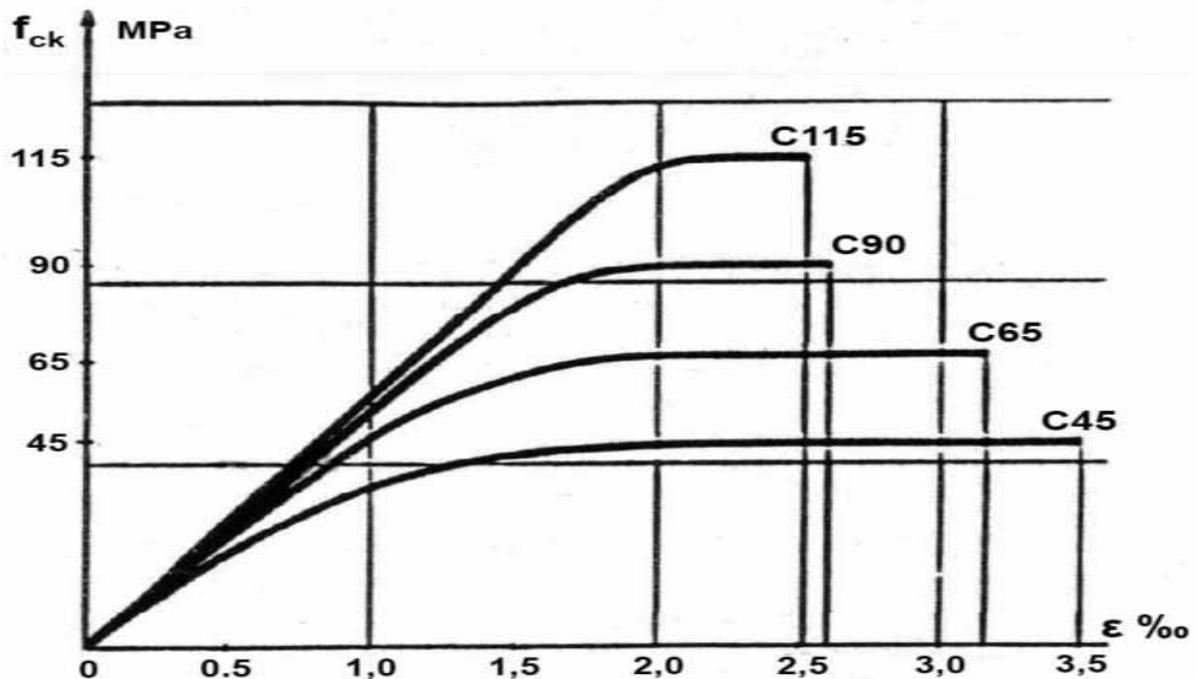
Quadro 07 – Módulos de elasticidade tangente e reduzido

Classes	C50	C60	C70	C80	C90	C100	C110	C120
E_{ci} (GPa)	38,6	40,7	42,6	44,4	46,0	47,5	48,9	50,3
E_c (GPa)	36,0	38,9	41,7	44,4	46,0	47,5	48,9	50,
α_i	0,909	0,955	0,977	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0

Fonte: TUTIKIAN; ISAIA; HELENE (2011)

Tutikian, Isaia e Helene (2011) apresentam a FIG. 03 que demonstra a evolução das curvas tensão-deformação de acordo com a norma norueguesa, aumentando a resistência característica do concreto de 45 até 115 MPa. Nela, observa-se que ao aumentar o f_{ck} , diminui-se a deformação na ruptura, passando de 3,5‰ ($f_{ck} = 45\text{MPa}$) a 2,5‰ ($f_{ck} = 115\text{MPa}$), observando-se que ela se torna cada vez mais frágil a medida que a resistência aumenta.

Figura 03 – Curvas tensão-deformação de CAD conforme norma norueguesa



Fonte: TUTIKIAN; ISAIA; HELENE (2011)

Os **efeitos das altas temperaturas** no CAD geram diversas opiniões entre os pesquisadores. Em vista do meio técnico, a teoria que prevalece é a de que as altas temperaturas são mais perigosas em CAD do que em CC, devendo-se isso ao fato de ocorrer o deslocamento entre as camadas externas que estão aquecidas e as

internas que estão resfriadas, por motivo da eficiência térmica dos concretos (TUTIKIAN; ISAIA; HELENE, 2011).

Ao seguir essa teoria, desconsidera-se a resistência à tração dos concretos, que geralmente é desprezível em relação às resistências fornecidas pela armadura de aço. Mas ao se tratar de CAD, a resistência à tração pode chegar a 8 MPa, sendo uma medida considerável e que pode absorver tensões de tração ao aparecerem no concreto, tanto sendo as trações geradas no estado fresco como no estado endurecido através da pressão exercida pelo vapor de água gerado pelo efeito de altas temperaturas (TUTIKIAN; ISAIA; HELENE, 2011).

Segundo Tutikian, Isaia e Helene (2011), deve-se entender também que as altas temperaturas provenientes de incêndios em estruturas de concretos são de modo geral um efeito prejudicial, dando ênfase as temperaturas partindo de 300 °C, mas não é possível afirmar se os efeitos no CAD e no CC tenham mesmo comportamento.

Já o **calor de hidratação** no concreto é proporcional ao consumo de cimento, observando-se que a elevação da temperatura ocorre devido às reações de hidratação exotérmica, que tem maior intensidade nos estados iniciais. Porém, para o CAD essa ação nem sempre é válida, mesmo sendo o consumo de cimento maior do que no CC (TUTIKIAN; ISAIA; HELENE, 2011).

Deve-se ressaltar então que não se deve considerar que o calor de hidratação é o proporcional ao conteúdo total de cimento e sim à quantidade em hidratação, pois o cimento não é todo hidratado ao mesmo tempo. Observa-se também que a utilização de retardadores, menor quantidade de concreto ou a altos teores de superplastificantes, como é geralmente visto no CAD, pode afetar por consequência a emissão do calor de hidratação, distribuindo-o por um maior tempo, fazendo com que os ápices de temperatura não sejam mais altos do que nos CC (TUTIKIAN; ISAIA; HELENE, 2011).

4.2.3. Dosagem do CAD

Para ser feita a produção de CAD deve-se saber que ela é bem mais sensível e complexa do que a de outros concretos, pelo fato das propriedades do material

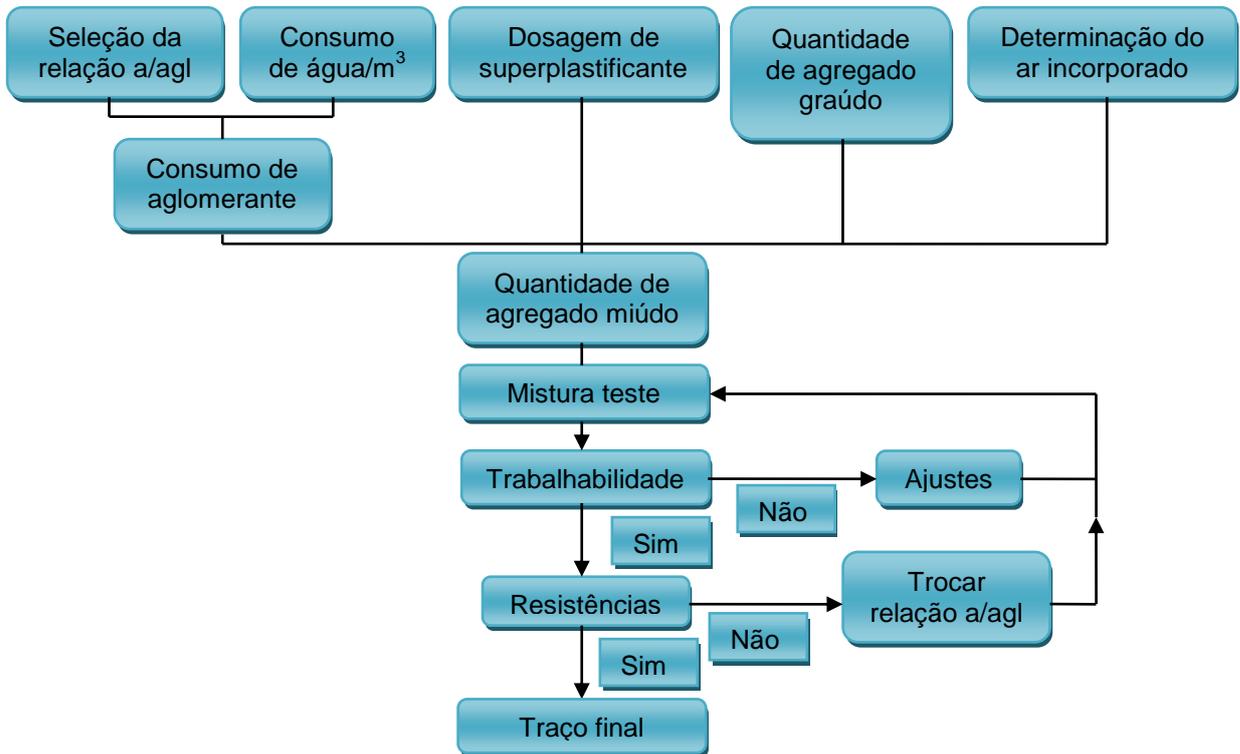
utilizado serem superiores ao normal. Por em sua produção se ter uma quantidade maior de elementos e por fazer parte de peças estruturais de maior importância, a produção de CAD deve ser realizada da forma mais cuidadosa possível, seguindo todos os procedimentos necessários para se alcançar a dosagem ótima prevista em laboratório (TUTIKIAN; ISAIA; HELENE, 2011).

Sabe-se que existe geralmente um maior número de constituintes no CAD do que no CC, sendo os sete mais utilizados no CAD (sílica ativa, areia, concreto, metacaulim, brita 1, brita 0, aditivo superplastificante e plastificante) mas também podem ser utilizados algum material fino ou outro tipo de aditivo, pigmentos e fibras (TUTIKIAN; ISAIA; HELENE, 2011).

Existem vários métodos diferentes de dosagem de CAD, dentre eles destacam-se três que são: o Método de Aïtcin (2000) utilizando o volume absoluto, o Método de O'Reilly (1998) utilizando conceitos de esqueletos granulares, e os Métodos O'Reilly e IBRACON combinados sendo considerado um método científico experimental (TUTIKIAN; ISAIA; HELENE, 2011).

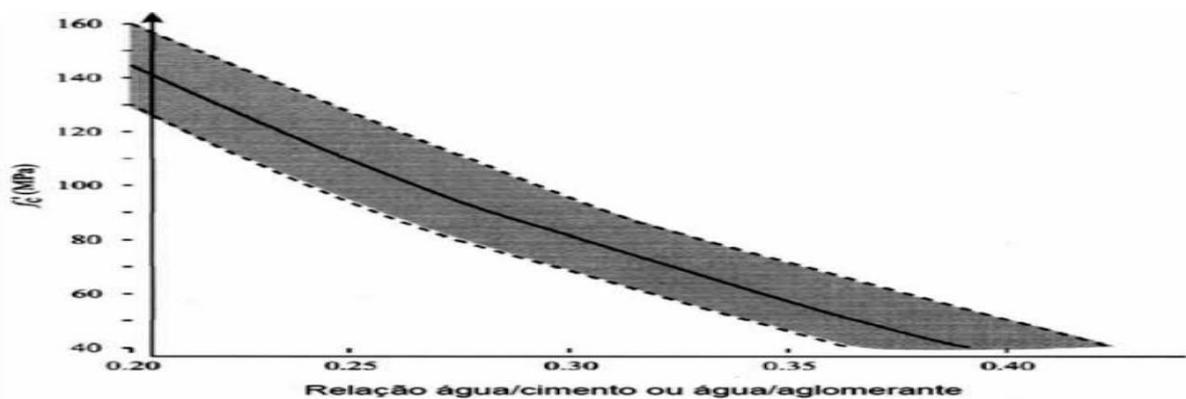
O **Método de Aïtcin** utiliza resultados combinados empíricos com cálculos matemáticos, o tornando praticamente simples, mesmo não havendo a garantia de uma exatidão em seus resultados. A FIG. 04 demonstra um fluxograma do método (TUTIKIAN; ISAIA; HELENE, 2011).

Figura 04 – Fluxograma do Método de Aïtcin



Fonte: TUTIKIAN; ISAIA; HELENE (2011)

Primeiro deve-se realizar a relação a/ag necessária para se obter a resistência à compressão desejada. Através da FIG. 05 gerada pelo autor do método, é fornecida uma curva teórica para se estipular a relação a/ag , sendo esta curva uma correlação entre a resistência à compressão aos 28 dias com a relação a/ag , sendo baseada em vários resultados encontrados em pesquisas (TUTIKIAN; ISAIA; HELENE, 2011).

Figura 05 – Relação entre a relação a/ag e a resistência à compressão aos 28 dias

Fonte: AÏTCIN (2000)

Depois se deve utilizar o QUADRO 08 apresentado pelo autor que correlaciona o ponto de saturação do aditivo superplastificante com a dosagem de água, determinando assim o consumo de água na mistura (TUTIKIAN; ISAIA; HELENE, 2011).

Quadro 08 – Determinação da água mínima de dosagem do CAD

Ponto de saturação do aditivo (%)	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4
Água (kg/m ³)	120 a 125	125 a 135	135 a 145	145 a 155	155 a 165

Fonte: TUTIKIAN; ISAIA; HELENE (2011)

O próximo passo é determinar o teor de saturação do aditivo. Deve-se então começar utilizando o teor de 1% em uma mistura como experimento, realizando os ajustes necessários se o resultado não for o ideal (TUTIKIAN; ISAIA; HELENE, 2011).

O quarto passo baseia-se ao se determinar a quantidade de agregado graúdo, com base apenas nas formas das partículas. Por sugestão, deve-se iniciar a mistura de experimento com 1000 kg/m³, sendo depois realizados os ajustes, se necessários (TUTIKIAN; ISAIA; HELENE, 2011).

O quinto passo é fazer a determinação do ar incorporado à mistura. Como sugestão, tem-se o valor de 1,5% como primeira aproximação (TUTIKIAN; ISAIA; HELENE, 2011).

Reunindo-se todos os resultados obtidos, subtrai-se de 1m³ a soma de todos, em volume, para encontrar a quantidade de agregado miúdo. Assim, vai-se para a mistura de traço experimental, verificando-se então a trabalhabilidade do concreto. Devem ser efetuados ajustes na dosagem de aditivo e água se os resultados não forem satisfatórios. Realizada novamente a mistura experimental esperasse a cura com a idade adequada para efetuar-se o rompimento dos corpos de prova, analisando-se então as propriedades obtidas. Sendo satisfatórias, tem-se o traço definitivo, se não, volta-se para a etapa de ajustes (TUTIKIAN; ISAIA; HELENE, 2011).

Já o **Métodos O'Reilly** pode ser dividido em duas partes, sendo a primeira a que determina através de experimentos a proporção entre os agregados, e sendo a

segunda onde se calcula os outros componentes do concreto por meio de tabelas (TUTIKIAN; ISAIA; HELENE, 2011).

Na primeira parte, apresenta-se um método experimental que determina a melhor composição de agregados no concreto, de dois em dois, partindo do de maior granulometria para o de menor (TUTIKIAN; ISAIA; HELENE, 2011).

Utilizando o método mais preciso e experimental, que se baseia na determinação da porcentagem de vazios presentes na mistura entre os agregados, procura-se obter a composição ótima, que é indicada pela porcentagem de vazios e a superfície específica mínima da mistura que contém os agregados, devendo o consumo de pasta ser mínimo (TUTIKIAN; ISAIA; HELENE, 2011).

Buscando encontrar estes valores, primeiramente ensaiam-se várias porcentagens entre dois elementos, sendo como exemplo, 20% de brita e 80% de areia regular (20-80). Depois, seguem-se utilizando outras proporções, como 50-50, 30-70 e 40-60. Assim, deve-se então calcular a massa unitária compactada (ρ_{ap}) para cada mistura já compactada, sendo utilizada no Brasil por meio da ABNT NBR NM 45:2006. Deve-se saber que a massa unitária é a massa da mistura compactada com vazios dividida pelo volume do recipiente. Um importante fator é que os materiais estejam secos e bem misturados (TUTIKIAN; ISAIA; HELENE, 2011).

Depois, é determinada a massa específica dos componentes, através da ABNT NBR NM 52:2009, para os agregados miúdos, e da ABNT NBR NM 53:2009, para os agregados graúdos. Ao obter estes resultados, calcula-se a massa específica da mistura dos agregados (d_{AB}) de cada uma das proporções, de acordo com a equação a seguir (TUTIKIAN; ISAIA; HELENE, 2011).

$$d_{AB} = \frac{(d_A \times A) + (d_B \times B)}{100}$$

em que:

d_{AB} - massa específica da mistura dos agregados;

d_A - massa específica da areia;

A - porcentagem de areia na mistura;

d_B - massa específica do agregado graúdo (brita);

B - porcentagem de brita na mistura.

Em posse das massas específicas de cada material e com o cálculo da massa unitária da mistura compactada já realizado, consegue-se determinar a porcentagem do volume de vazios de cada uma das composições, por meio da equação abaixo (TUTIKIAN; ISAIA; HELENE, 2011).

$$E_V = \frac{d_{AB} - \rho_{AB}}{d_{AB}} \times 100$$

em que:

E_V – porcentagem de vazios na mistura;

d_{AB} – massa específica da mistura;

ρ_{AP} – massa unitária da mistura.

Agora se deve partir para a segunda parte, que é a determinação dos outros componentes do CAD. Primeiramente busca-se o consumo de água e cimento do traço, que é determinado com base na experiência anterior de quem executou o traço anteriormente. Em posse disso, é misturado um traço experimental, e utilizando os valores de resistência à compressão média do concreto, do cimento e de constantes tabeladas pelo autor do método, se descobre a característica 'A' do agregado. Observa-se então que, partindo-se desse ponto em diante a etapa do método se torna empírica (TUTIKIAN; ISAIA; HELENE, 2011).

Tutikian⁶ (2007 apud TUTIKIAN; ISAIA; HELENE, 2011), propôs realizar os **Métodos de O'Reilly e IBRACON em conjunto**, utilizando-se a primeira parte do Método de O'Reilly realizando o empacotamento dos agregados, com a efetuação dos diagramas de dosagem e dos traços do Método de IBRACON, obtendo-se então um método combinado com vantagens econômicas e técnicas. O objetivo do autor foi de propor um método para concretos autoadensáveis, mas pode-se utilizar o mesmo método para concretos convencionais de alto desempenho em sua trabalhabilidade.

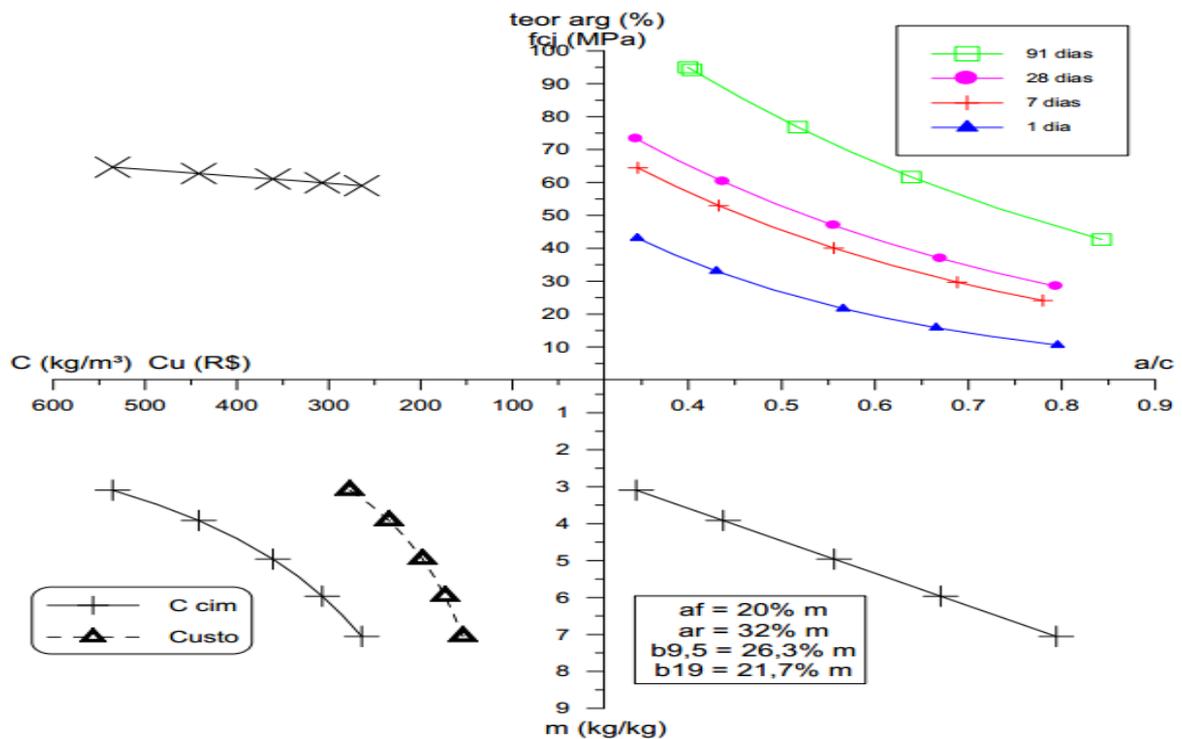
⁶ TUTIKIAN, B. F. **Proposição de um método de dosagem experimental para concretos autoadensáveis**. Porto Alegre: UFRGS, 2007. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS, Porto Alegre, 2007.

Primeiramente realiza-se a determinação do esqueleto granular, tendo base no meio de empacotamento de dois em dois constituintes, partindo-se dos de dimensão maior até os de dimensão menor, sendo definida a mistura entre todos os agregados que apresentem menor teor de vazios (TUTIKIAN; ISAIA; HELENE, 2011).

Segundo Tutikian, Isaia e Helene (2011), ao se definir o esqueleto, deve se executar no mínimo três traços, sendo um rico, um intermediário e um pobre. Deve-se ressaltar que, nesse momento, o teor de argamassa é a proporção entre os agregados, não sendo constante.

Enfim, moldam-se os corpos de prova para se realizar os ensaios determinados em suas específicas idades, para se calcular as equações de comportamento, a definição dos Diagramas de Dosagem e Desempenho conforme a FIG. 06, e os coeficientes de correlação (TUTIKIAN; ISAIA; HELENE, 2011).

Figura 06 – Exemplo de diagrama de dosagem com o teor de argamassa variando



Fonte: TUTIKIAN; ISAIA; HELENE (2011)

De acordo com Tutikian, Isaia e Helene (2011), ao se observar a FIG.06, percebe-se que o teor de argamassa é variável. Mas, o que torna todos os traços

pertencentes à mesma família, podendo então serem representados no mesmo diagrama é a proporção fixa entre os agregados. Neste caso, o total de agregados de todos os traços foi dividido em 20% de areia fina, 32% de areia média, 21,7% de brita 1, e 26,3% de brita 0, após serem realizados os empacotamentos. Então, por exemplo, para o traço 1:3 seria realizado calculando-se a partir de 1:0,6:0,96:0,79:0,65 (c:af:am:b0:b1).

Portanto, tornou-se possível obter concretos com resistência à compressão de até 75 MPa, para a idade de 28 dias e 94 MPa para os 91 dias, utilizando estes materiais e traços. Percebe-se então que se necessário, seria possível alcançar resistências superiores ao se utilizar misturas de traços mais ricos (TUTIKIAN; ISAIA; HELENE, 2011).

4.3. Sílica Ativa

Segundo Aïtcin (2000), a sílica ativa (também conhecida como microssílica ou sílica fume conforme ABNT) é um subproduto da fabricação do silício metálico, proveniente das ligas de ferro-silício e dentre outras ligas compostas de silício. A produção do silício e suas ligas são realizadas em fornos de arco elétrico imerso onde o quartzo é reduzido na presença de carvão e ferro. No período de redução da sílica, um subóxido de silício (SiO) é produzido dentro do arco elétrico. Sabendo-se que esse gás ao escapar para a parte superior da carga, tende a se resfriar, condensar e oxidar na forma de finíssimas partículas de sílica. Assim, para então coletá-las, utiliza-se um sistema de eliminação de pó.

Outra fonte de sílica ativa são as cinzas da casca de arroz. Ela possui alto teor de sílica, tendo em porcentagens de componentes, aproximadamente 20% de sílica à base de anidra, 30% de lignina e 50% de celulose (MEHTA, 1992). O resíduo inorgânico é composto por aproximadamente de 95% a 98% de sílica, sendo encontrado na forma amorfo hidratada, correspondendo a uma porcentagem total da casca de 13% a 29% (HOUSTON, 1972).

Pode-se também obter sílica ativa (dióxido de silício) através das cinzas do bagaço da cana-de-açúcar, que em percentual, pode ser extraída cerca de 60% da massa total das cinzas. Também se pode extrair a sílica através da areia (quartzo),

que vem juntamente com a cana-de-açúcar ao ser colhida da lavoura, pois ao passar pelo processo de lavagem a areia não é completamente retirada da cana-de-açúcar. É fácil observar esta areia ao término do processo de combustão (CORDEIRO, 2006).

4.3.1. Uso de Sílica Ativa em CAD

A adição de sílica associada à massa de cimento faz com que se consiga um aumento de desempenho do concreto. Ela possui partículas com dimensões médias cerca de 100 vezes menor do que a dos grãos de cimento. A sílica ativa tem a capacidade de preencher os vazios da zona de transição do material cimentício/agregado, ao mesmo tempo consegue reagir com a água e a portlandita disponível, gerando assim um aumento da resistência do concreto (TÉCHNE, 2002).

Segundo Aïtcin (2000), os benefícios gerados pela ação da sílica ativa na microestrutura do concreto ocorrem não só pela reação rápida pozolânica, mas também pelo efeito físico das partículas de sílica ativa conhecido como efeito filler. A sílica também tem um efeito químico que tem relação com os cristais de portlandita Ca(OH)_2 .

De acordo Aïtcin (2000), devido à finura relacionada às dimensões das partículas de sílica ativa, consegue-se preencher os vazios existentes entre as partículas maiores de cimento, ocorrendo quando elas estejam bem desfloculadas em presença de uma adequada dosagem de plastificante. Considera-se também que o efeito filler é responsável pela fluidez dos concretos, trabalhando com uma relação de água/aglomerante muito pequena. Em consequência, a matriz sólida encontrada que possui sílica ativa é densa antes que qualquer ligação química entre as partículas de cimento tenham ocorrido, sendo esse fato devido às suas características únicas.

As adições de sílica são muito importantes principalmente para o emprego em CAD do que em concretos convencionais. Isso se deve ao fato de o CAD possuir constituintes de maior custo e por sua aplicação exigir a melhor eficiência em obra, sendo assim possível produzir CADs com níveis muito baixos de relação a/c

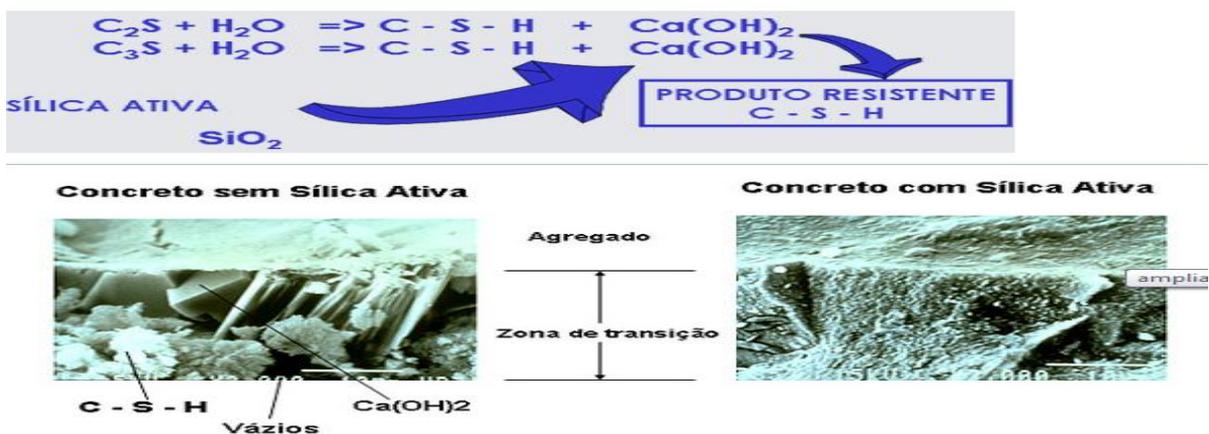
(geralmente em torno de 0,30). Assim, para se alcançar esse nível, é necessário o uso de superplastificantes (PRICE, 2003).

Deve-se destacar também que um concreto com 8% de sílica ativa em relação ao peso do cimento utilizado, pode-se alcançar uma melhora de 50% na aderência média e até 57% da aderência de ruptura entre a armadura e o concreto (BONINI et al., 1999).

Conforme Aïtcin (2000), pelo fato de as partículas de sílica possuírem dimensões extremamente pequenas, consegue-se reduzir drasticamente tanto a exsudação superficial como interna da mistura. Sendo muito importante a exsudação, pois ela consegue transformar radicalmente as características das microestruturas da zona de transição, localizada entre a armadura de aço e a pasta de cimento e entre os agregados e a pasta de cimento. Ao utilizar a sílica consegue-se então que as zonas de transição sejam mais compactas do que em um concreto que não a contenha.

Para se ter uma melhor noção do efeito da sílica, é apresentada a FIG. 07. Ao ocorrer a hidratação dos componentes do cimento Portland com água, é produzido o silicato de cálcio hidratado (CSH), que dá a resistência à pasta de cimento e produz também um subproduto chamado hidróxido de cálcio (crystal de baixa resistência e é solúvel em água). Enfim, a sílica ativa faz uma reação com o hidróxido de cálcio, gerando então um cristal resistente (CSH), obtendo-se então um grande aumento da resistência, durabilidade e impermeabilidade tanto em concretos como em argamassas (TECNOSIL, 2014).

Figura 07 – Reação gerada pela sílica ativa e imagens de sua utilização ou não



Fonte: Empresa Tecnosil Sílica Ativa (2014)

4.4. CAD com Adição de Sílica Ativa

Conforme Price (2003), a sílica ativa é indispensável no CAD, sendo um dos motivos de ser três vezes mais eficiente do que o cimento Portland, facilitando então o alcance de uma alta resistência sem ser necessária a utilização de uma maior quantidade de cimento. Para se alcançar essa eficiência, deve-se utilizar também um superplastificante em conjunto com a mistura.

4.4.1. Uso em Obras de Construção Civil

O CAD vem sendo cada vez mais utilizado no Brasil e no mundo. As cidades brasileiras onde se mais utiliza CAD são Salvador, Goiás, Curitiba e São Paulo, mas existem também aplicações em pontos isolados de outras regiões do país. O Quadro 09 demonstra as principais obras no mundo que foram realizadas utilizando CAD em parte ou no total de sua estrutura (BEZERRA, 2005; CHRISTOFOLLI, 2007; BIANCHINI, 2010⁷, apud TUTIKIAN; ISAIA; HELENE, 2011).

⁷ BEZERRA, S. A. **Influência do tipo e da duração de cura nas propriedades mecânicas de concretos de alto desempenho (CAD) produzidos em períodos quentes ($t > 25^{\circ}\text{C}$) e de baixa umidade relativa do ar ($h < 50\%$)**. Goiânia: UFG, 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2005.

BIANCHINI, M. **Análise da influência dos teores de sílica ativa na produção de concretos de alta resistência em central dosadora de concreto**. Curitiba: UFP, 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

CHRISTOFOLLI, J. L.; ENOUE, M. H.; FREITAS, J. A. **Recorde nacional de concreto de alto desempenho em pilares, Centro Empresarial Antarctica**. In: Congresso Brasileiro do Concreto, 49, 2007. Anais... Bento Gonçalves: IBRACON, 2007.

Quadro 09 – Principais obras em CAD

Obras	Local	Ano	f_{ck} (MPa)
Obras no Exterior			
Edifício Lake Point Tower	Chicago – EUA	1965	50
Edifício Water Tower Place	Chicago – EUA	1970	60
Plataforma Gullfaks	Noruega	1981	70*
Arco da Defense	Paris – França	1988	65*
Ponte da Ilê de Ré	França	1988	68
Edifício Scotia Plaza Building	Toronto – Canadá	1988	70
Ponte Joigny	França	1989	60
Edifício Two Union Square	Seattle – EUA	1988	130**
One Peachtree	Atlanta – EUA	1991	83***
Ponte Montée St-Rémi	Canadá	1993	80*
Ponte da Confederação	Canadá	1997	72**
Petronas Tower	Kuala Lumpur - Malásia	1999	80*
Burg Khalifa	Dubai	2009	80*
Obras no Brasil			
CNEC	São Paulo	1989	65
Ponte sobre o Rio Maranhão	Goiás	-	50
Edifício Banco de Tóquio	Salvador	1990	60
Supremo Tribunal de Justiça	Brasília	1993	72
Edifício Suarez Trade Center	Salvador	1993	60
Edifício Golden Park	Santa Maria	1994	60+
Torre das Nações Unidas	São Paulo	1997	50
Pavimento da Ponte Rio Niterói	Rio de Janeiro	2000	65
Museu Oscar Niemeyer	Curitiba	2000	35****
Edifício Evolution Towers	Curitiba	2000	60
Edifício e-Tower	São Paulo	2002	115***
Museu Iberê Camargo	Porto Alegre	2005	45
Edifício Buenos Aires	Curitiba	2007	50
Centro Empresarial Antártica	Ponta Grossa – PR	2007	70
Edifício Palazzo Lumini	Curitiba	2010	50
* Resistências medidas em cubos. O resultado deve ser multiplicado por 0,80 para se ter correlação com cp's cilíndricos. ** Resistências médias. Estas sempre são mais altas que o f_{ck} . *** $f_{ck,est}$. Normalmente o $f_{ck,est}$ é maior do que o f_{ck} . **** f_{ck} estimado aos três dias. + Resistência característica de pilares. Concreto com 50% de cinza volante e 3% de sílica ativa.			

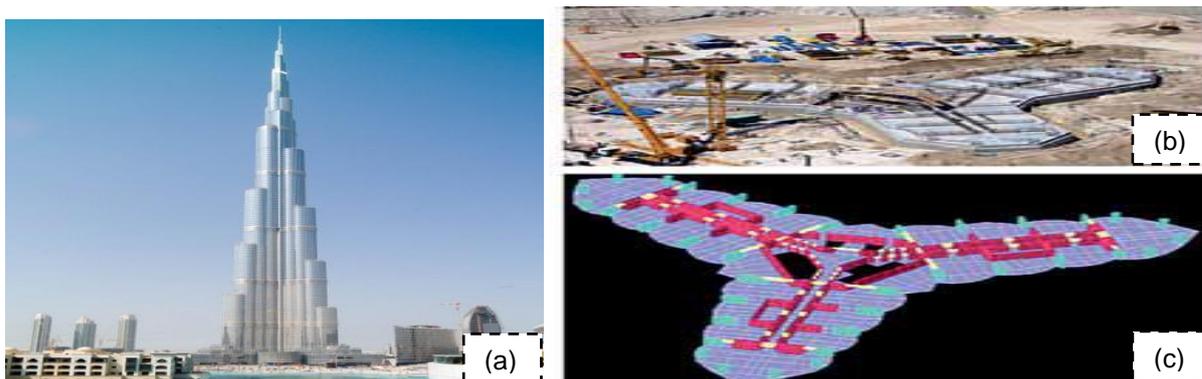
Fonte: BEZERRA (2005); CHRISTOFOLLI (2007); BIANCHINI (2010), apud TUTIKIAN; ISAIA; HELENE (2011)

Conforme Tutikian, Isaia e Helene (2011), os pioneiros no emprego do CAD são os edifícios comerciais e habitacionais, por possuírem maior facilidade em receber a tecnologia mais avançada do CAD, e também pela busca de se alcançar recordes em alturas. Os projetistas tem a preferência pelo CAD nesses tipos de estruturas pelas seguintes vantagens: maior rapidez de execução, maior massa e rigidez contra deflexões laterais, menor retração e fluência, menor frequência de deflexões nos pavimentos elevados, simplicidade de execução em relação ao aço e liberdade de dimensões e formas.

Ao fim da década de 1980, iniciou-se uma intensificação da utilização de estruturas mistas em CAD, que geralmente eram especialmente utilizados nos elementos comprimidos e perfis de aço para nos tracionados, para então se obter o melhor desempenho desses materiais no conjunto estrutural (TUTIKIAN; ISAIA; HELENE, 2011).

Atualmente o edifício mais alto é o Burj Khalifa, localizado em Dubai, com 160 pavimentos e 828 metros de altura, tendo sua estrutura em CAD até os seus 601 metros, possuindo também uma área utilizável de 465000 m², sendo que foram necessários 230000 m³ de concreto autoadensável. A FIG. 08 demonstra o edifício, que foi projetado com sua seção transversal em forma de “Y”, reduzindo-se assim a ação do vento e também propiciar a construção de uma estrutura simples e mais rápida de ser construída (TUTIKIAN; ISAIA; HELENE, 2011).

Figura 08 – a) Edifício Burj Khalifa (ENGENHARIA ESTRUTURAL E CONSTRUÇÃO CIVIL, 2012); b) Fundação em radier (ABDELRAZAQ et al., 2008); c) estrutura com paredes diafragamas internas e pilares circulares externos (BAKER et al., 2007)⁸



Fonte: ENGENHARIA ESTRUTURAL E CONSTRUÇÃO CIVIL (2012); ABDELRAZAQ et al. (2008);

⁸ ENGENHARIA ESTRUTURAL E CONSTRUÇÃO CIVIL. **Burj Khalifa**. Disponível em: <https://construcaocivilpet.files.wordpress.com/2012/10/burj_khalifa.jpg>. Acesso em: 20 de novembro de 2014.

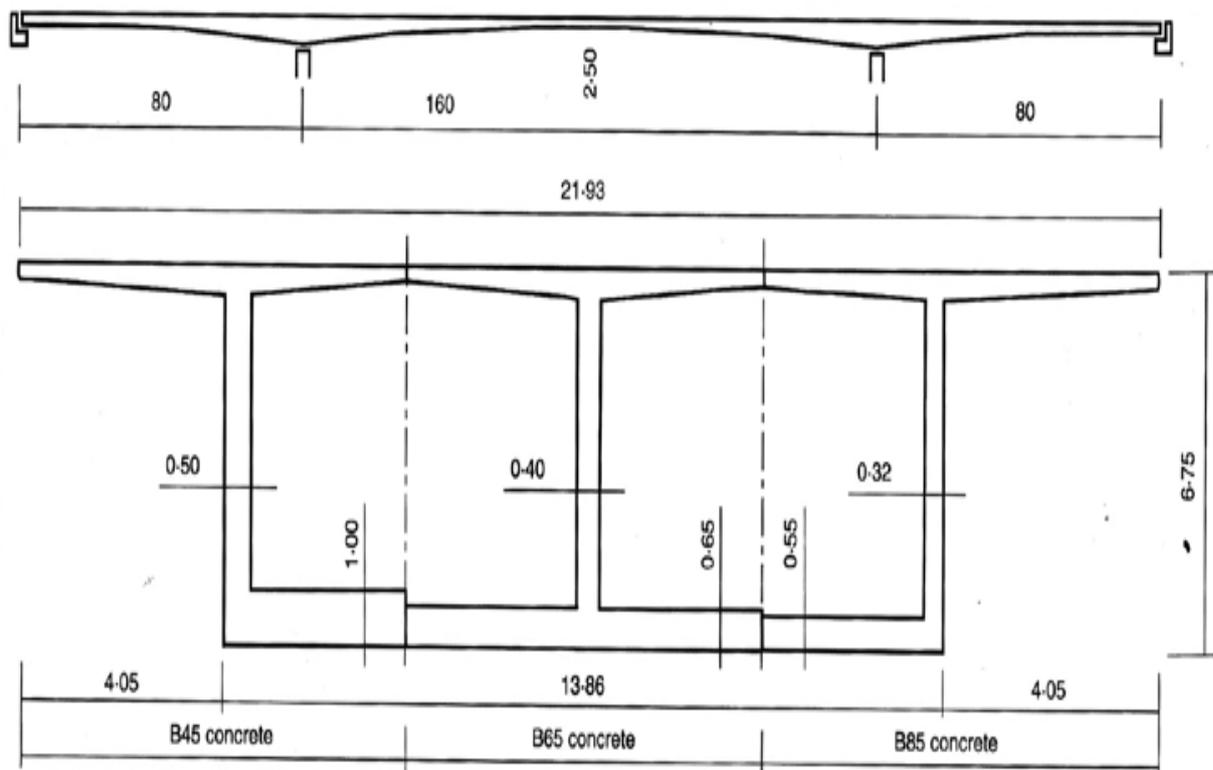
ABDELRAZAQ, A. S. E., KIM, K. J., KIM, J. H. Brief on the Construction of the Burj Dubai Project, Dubai, UAE. In: World Congress of Council on Tall Buildings and Urban Habitat, 8th, 2008, Dubai. **Proceedings...** Chicago: CTBUH, 2008, p. 1-9.

BAKER, W. F.; KORISTA, D. S.; NOVAK, L. C. Engineering the world's tallest Burj Dubai. In: World Congress of Council on Tall Buildings and Urban Habitat, 8th, 2008, Dubai. **Proceedings...** Chicago: CTBUH, 2008. p. 1-10.

BAKER et al. (2007), apud TUTIKIAN; ISAIA; HELENE (2011)

As obras de infraestrutura são as que mais têm a capacidade de se adequar ao uso do CAD, tendo-se em vista a busca por um melhor desempenho e uma maior vida útil. Um exemplo disso foi a construção da Ponte Stichtse, perto de Amsterdam, Holanda, sendo demonstrada através da FIG. 09, com vão principal de 160m, tendo sido projetada inicialmente utilizando-se concreto da classe C45 (concreto leve), depois da classe C65 (concreto normal) e finalmente foi recalculada para classe C85 resistência em cubos. Ao se calcular a ponte com o concreto da classe C85 se obteve uma economia de 30% do volume de concreto, do custo e do peso próprio (TUTIKIAN; ISAIA; HELENE, 2011).

Figura 09 – Alternativas de projeto da Ponte *Stichte*, Holanda, utilizando concreto leve C45, concreto normal C65 e CAD C85



Fonte: WALRAVEN⁹, 2000 apud TUTIKIAN; ISAIA; HELENE 2011

⁹ Walraven, J. "Projeto de estruturas com concreto leve: situação atual de revisão do EC -2", Anais do Segundo Simpósio Internacional sobre Leve Estrutural Agregados de concreto. Kristiansand: Noruega, 2000.

Antes de tudo é importante ressaltar que não adianta a especificação de um CAD de grande qualidade e durabilidade se os projetos estruturais e arquitetônicos, juntamente com o processo de construção e os controles de qualidade não forem adequados para o nível do material utilizado. Enfim, deve-se planejar todas as fases do projeto e também pensar no uso e manutenção corretos a serem utilizados para fazer com que se tenha um perfeito alcance do requisito de construção de alto desempenho (TUTIKIAN; ISAIA; HELENE, 2011).

4.4.2. Dosagem de CAD com Sílica Ativa

As dosagens de sílica ativa geralmente estão na faixa de 5 a 15% da massa de cimento utilizado para o CAD (ACI 363R-92, 2001).

Teores abaixo de 5% não geram um ganho de resistência, pois essa quantidade não é suficiente para gerar o fortalecimento da interface agregado/pasta (NEVILLE, 1997). Teores acima de 15% geram menores aumentos de resistência, e conseqüentemente se tem um aumento no custo final do concreto (GUTIÉRREZ; CÁNOVAS, 1996).

Outra maneira de se incorporar sílica ativa no concreto seria adicioná-la a uma quantidade de cimento já especificada em projeto, gerando então um significativo ganho de resistência à compressão entre 3 a 28 dias, comparando-se a um concreto sem adição. Porém, esse método é menos usado (BARATA, 1998).

Em geral, é necessário realizar um estudo para a dosagem correta de sílica ativa ao CAD em cada situação, buscando-se o teor adequado para atender cada projeto, sem deixar de seguir as especificações contidas em normas, entre elas, as da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), regida pela NBR 13956 como exemplo (ABNT, 2014).

4.5. Durabilidade

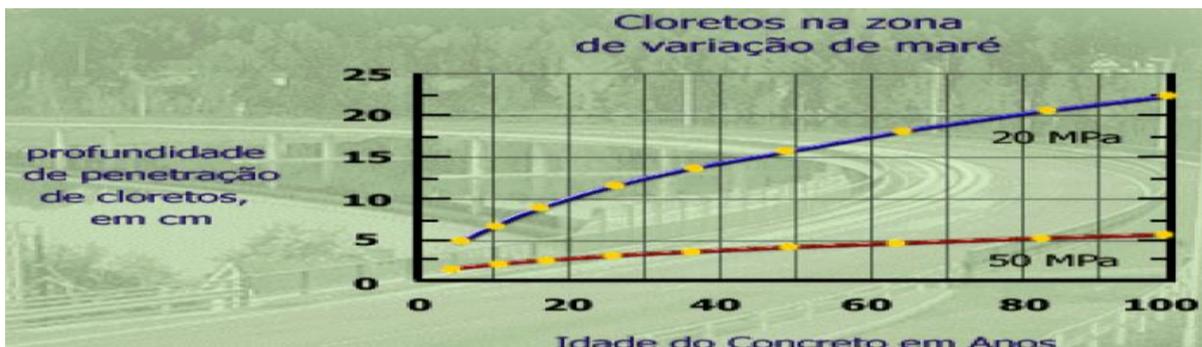
Segundo Aïtcin (2000), a permeabilidade do concreto está diretamente ligada a sua durabilidade. Reduzindo-se a permeabilidade consegue-se um concreto mais resistente a ambientes agressivos. Para alcançar essa ação, o fato que mais

demonstra melhorias é a adição de minerais, por ocorrer um refinamento da zona de transição e da estrutura dos poros da matriz.

É importante o concreto possuir baixa porosidade por assim se conseguir alcançar altos níveis de resistência mecânica e conseqüentemente gerar um concreto de baixa permeabilidade, alcançando-se então uma proteção contra os agentes agressivos ao concreto. O CAD então acaba se tornando a melhor opção por possuir um grau de durabilidade muito maior do que os concretos convencionais (JORGE; ASCOLI; CARASEK, 2003).

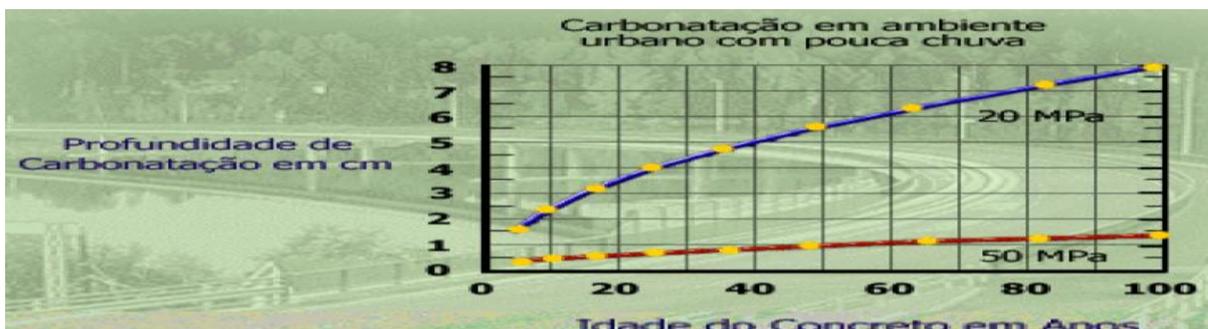
Analisando os gráficos GRAF. 01 e GRAF. 02, observa-se claramente a grande diferença das ações de penetração de cloretos e carbonatação em um concreto normal e um CAD, sendo esses fatores determinantes na vida útil do concreto utilizado. Percebe-se então que o CAD é recomendável para ambientes mais agressivos, principalmente em ambientes marítimos onde se necessita também de altas resistências (ABCP, 1999).

Gráfico 01 – Comparação entre penetração de cloretos em concreto usual e em CAD



FONTE: ABCP (1999)

Gráfico 02 – Comparação entre a carbonatação em concreto usual e em CAD



FONTE: ABCP (1999)

Deve-se ressaltar também que ao se utilizar um CAD com alta resistência, em casos de incêndio, as altas temperaturas geradas fazem com que possa ocorrer o deslocamento do concreto por a água contida no CAD não encontrar saída por suas características de alta compactidade. Assim, para procurar evitar essa possível ocorrência, deve-se utilizar a introdução de fibra de polipropileno, que fazem com que ao se ocorrer um incêndio, elas criem pequenos canais que vão liberar o vapor de água gerado (AITCIN, 2000).

4.6. Vantagens do uso de CAD com Sílica Ativa

Segundo a ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland) (1999), ao se utilizar CAD em obras, podem-se alcançar diversas vantagens, dentre elas as que mais se destacam são as seguintes:

- Redução do risco de corrosão;
- Ótima aderência ao substrato do concreto já endurecido;
- Redução da carbonatação;
- Alcance de resistências à compressão em pequenas e longas idades;
- Alta resistência elétrica;
- Redução na penetração de cloretos;
- Elevado modo de elasticidade;
- Redução da permeabilidade de água e outros elementos;
- Não ocorre exsudação (somente se a dosagem for adequada sendo realizada com o aditivo superplastificante correto);
- Retração no decorrer e após o processo de secagem menor do que em CC;
- Diminuição da deformação lenta (fluência) relacionada a aplicação de cargas de longa duração;
- Não ocorre a segregação no lançamento e adensamento (somente se a dosagem for bem executada);
- Possibilidades de se reaproveitar materiais (utilização de bagaço da cana-de-açúcar e casca de arroz para obtenção de sílica ativa), ajudando assim o meio ambiente;

- Redução das dimensões e números de pilares;
- Menor tempo para se realizar a desforma;
- O peso das peças feitas em CAD é bem menor do que se fossem realizadas com CC;
- Suas estruturas são mais duráveis possuindo baixa manutenção;
- Seus elementos estruturais são menores do que se fossem realizados com CC, favorecendo então o aproveitamento maior do espaço.

5. MATERIAIS E MÉTODOS

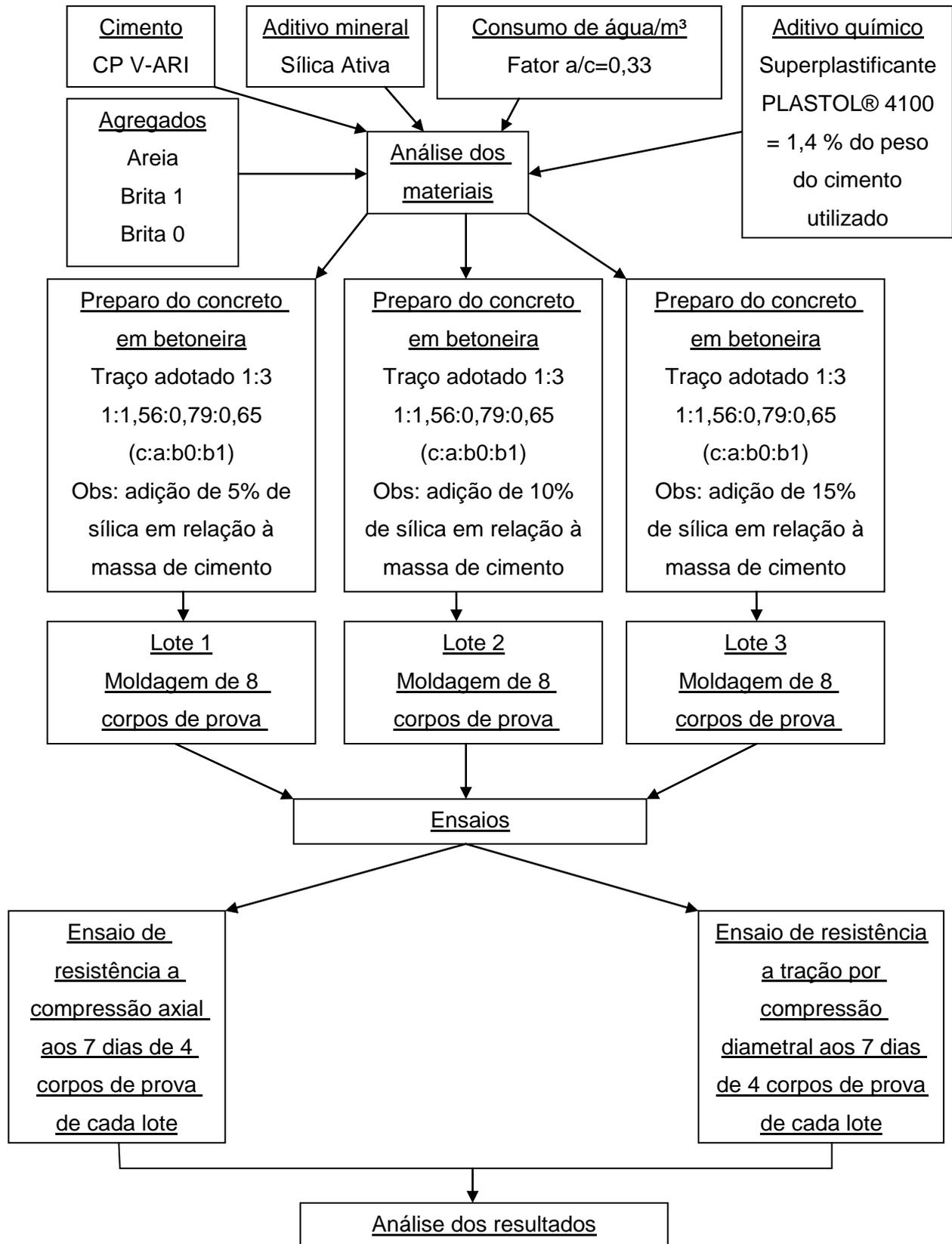
Neste capítulo é apresentada a metodologia usada para o desenvolvimento do trabalho, iniciando-se pelas descrições dos materiais usados, seguida da exposição dos métodos de dosagem adotados e sua aplicação.

A seleção dos materiais e os métodos utilizados neste trabalho foram realizados de acordo com a disponibilidade dos mesmos na região, através de pesquisas de mercado junto às concreteiras de Minas Gerais.

O local onde foram realizados as dosagens e os ensaios foi o Laboratório de Ensaio do Grupo CMP localizada na cidade de Passos-MG.

Buscando gerar uma melhor compreensão dos procedimentos a serem utilizados nesta pesquisa, foi gerado um fluxograma, como pode ser visto na FIG. 10.

Figura 10 – Fluxograma simplificado do projeto de pesquisa



Fonte: O autor (2014)

5.1. Materiais

Os materiais utilizados nesta pesquisa foram adquiridos no mercado sendo escolhidos para a dosagem os de qualidade controlada pois o CAD necessita de uma alta qualidade em seus constituintes para alcançar todos os seus benefícios.

5.1.1. Cimento

Para este trabalho foi utilizado o cimento *Portland* CP V-ARI de alta resistência inicial. Ele possui alta reatividade em pequenas idades em função do grau de moagem a que é submetido. O clínquer é o mesmo utilizado para a fabricação de um cimento convencional, mas permanece no moinho por um tempo mais prolongado. Até os 28 dias, o cimento continua ganhando resistência, alcançando valores mais altos do que os demais, obtendo-se então um maior rendimento do concreto.

O cimento foi fornecido pela Empresa Cimento Nacional em sacos de papel *Kraft* de 40 kg cada, sendo utilizada apenas a quantidade de material necessária para realização do traço utilizado em estudo. A seguir são apresentadas as TAB. 01, TAB. 02 e TAB. 03 que contém, respectivamente, os ensaios mecânicos, físicos e químicos utilizados neste trabalho referentes ao cimento utilizado, sendo os resultados destes ensaios de acordo com a norma NBR 5733:1991.

Tabela 01 – Caracterização mecânica do cimento CP V-ARI MAX

ENSAIOS - ABNT NBR 7215/96	Unidade	Desvio Padrão	Resultado	Exigências
Resistência à compressão – 1 dia	MPa	1,31	29,8	14,0
Resistência à compressão – 3 dias	MPa	1,68	44,2	24,0
Resistência à compressão – 7 dias	MPa	1,73	50,1	34,0
Resistência à compressão – 28 dias	MPa	2,69	58,1	Não aplicável

Fonte: Empresa Cimento Nacional (2014)

Tabela 02 – Caracterização física do cimento CP V-ARI MAX

Ensaio Físicos	Metodologia	Unidade	Resultado	Exigências
Área específica (Blaine)	ABNT NM 76/98	cm ² /g	4653	≥ 3000
Massa específica	ABNT NM 23/01	g/cm ³	3,06	Não aplicável
Índice de finura - #75 µm (nº 200)	ABNT NBR 11579/13	%	0,03	≤ 6,0
Resíduo na peneira #325	ABNT NBR 9202/85	%	0,41	Não aplicável
Água de consistência normal	ABNT NM 43/03	%	31,5	Não aplicável
Início de pega	ABNT NM 65/03	Minutos	120	≥ 60
Fim de pega	ABNT NM 65/03	Minutos	175	≤ 600
Expansibilidade a quente	ABNT NBR 11582/12	mm	0,00	≤ 5,0

Fonte: Empresa Cimento Nacional (2014)

Tabela 03 – Caracterização química do cimento CP V-ARI MAX

Ensaio Físicos	Metodologia	Unidade	Resultado	Exigências
Resíduo Insolúvel - RI	ABNT NM 15/12	%	0,83	≤ 1,0
Perda ao Fogo - PF	ABNT NM 18/12	%	3,80	≤ 4,5
Oxido de Magnésio - MgO	ABNT NM 21/12	%	1,25	≤ 6,5
Trióxido de Enxofre - SO ₃	ABNT NM 16/12	%	2,65	≤ 4,5
Anidrido Carbonico - CO ₂	ABNT NM 20/12	%	2,53	≤ 3,0

Fonte: Empresa Cimento Nacional (2014)

5.1.2. Adição Mineral

Para este estudo foi utilizada uma única adição mineral que é a sílica ativa sendo o constituinte em destaque neste trabalho.

Como já foi apresentada no decorrer desta pesquisa, a adição de sílica ativa gera grandes benefícios ao CAD, porém ela deve representar de 5% a 15% da massa de cimento empregada para se atingir os melhores desempenhos sem ser utilizado o uso excessivo do material em estudo.

A sílica ativa foi fornecida pela Empresa Tecnosil Sílica Ativa, sendo disponibilizada por ela a quantidade de 7 Kg como amostra, sendo utilizada apenas a quantidade de material necessária para realização do traço utilizado em estudo. A seguir são apresentadas as TAB. 04, TAB. 05 e TAB. 06 que contém,

respectivamente, as características físicas e químicas, massa unitária e um comparativo de finura de alguns materiais em relação à sílica ativa. Todos esses resultados estão em conformidade com a NBR 13956-1:2012.

Tabela 04 – Características físicas e químicas da sílica ativa

Características	Valores
Massa específica	2220 Kg/m ³
Teor de SiO ₂	> 85%
Superfície específica (B.E.T)	≅19000 m ² /Kg
Formato da partícula	Esférico
Diâmetro médio da partícula	0,20 µm

Fonte: Empresa Tecnosil Sílica Ativa (2014)

Tabela 05 – Massa unitária da sílica ativa

Formas	Valores
Não densificada	< 350 Kg/m ³
Densificada	> 350 Kg/m ³

Fonte: Empresa Tecnosil Sílica Ativa (2014)

Tabela 06 – Comparativo de finura de alguns materiais

Materiais	Valores
Sílica ativa	≅19000 m ² /Kg
Fumaça de cigarro	≅10000 m ² /Kg
Fly Ash (pozolana)	400 a 700 m ² /Kg
Cimento Portland	300 a 500 m ² /Kg

Fonte: Empresa Tecnosil Sílica Ativa (2014)

5.1.3. Agregados

O agregado graúdo utilizado para este estudo foi à brita de gnaiss, sendo utilizado o material encontrado na região da cidade de Passos, observando-se sempre a qualidade do material e as dimensões fornecidas, sendo que neste trabalho será utilizado a brita 1 (com diâmetro até 19 mm) e brita 0 (com diâmetro até 12,5 mm). O material foi utilizado da mesma forma que é encontrado no mercado

de trabalho, ou seja, sem os procedimentos de lavagem prévia ou ajuste de granulometria, buscando realizar um estudo mais próximo da realidade dos concretos de alto desempenho desenvolvidos nas produtoras de concreto.

Para a brita 0 são apresentadas a seguir as TAB. 07, TAB. 08 e o GRAF. 03, que contém respectivamente: a caracterização do agregado graúdo, o check list da granulometria e a curva granulométrica do agregado e limites granulométricos da graduação 4,75/12,5 mm conforme a NBR 7211:2009.

Tabela 07 – Caracterização do agregado graúdo (brita 0)

Amostra	1	2	1	2	Média	Porcentagem retida e acumulada
Massa inicial (g)	2500,30	2500,30	Porcentagem retida individual			
Peneiras (mm)	Massa retida individual (g)					
25,0	0,00	0,00	0,0	0,0	0,0	0
19,0	0,00	0,00	0,0	0,0	0,0	0
12,5	0,71	0,71	0,0	0,0	0,0	0
9,5	8,89	8,89	0,4	0,4	0,4	0
6,3	1196,20	1196,20	47,9	47,9	47,9	48
4,8	1132,6	1132,6	45,3	45,3	45,3	94
2,4	5,45	5,45	0,2	0,2	0,2	94
1,2	26,30	26,30	1,1	1,1	1,1	95
0,6	0,00	0,00	0,0	0,0	0,0	95
0,3	0,00	0,00	0,0	0,0	0,0	95
0,15	0,00	0,00	0,0	0,0	0,0	95
Fundo	128,33	128,33	5,1	5,1	5,1	100
Massa final (g)	2498,48	2498,48	Dimensão máxima característica (mm)			9,5
Diferença (%)	0,07	0,07	Módulo de finura			5,67

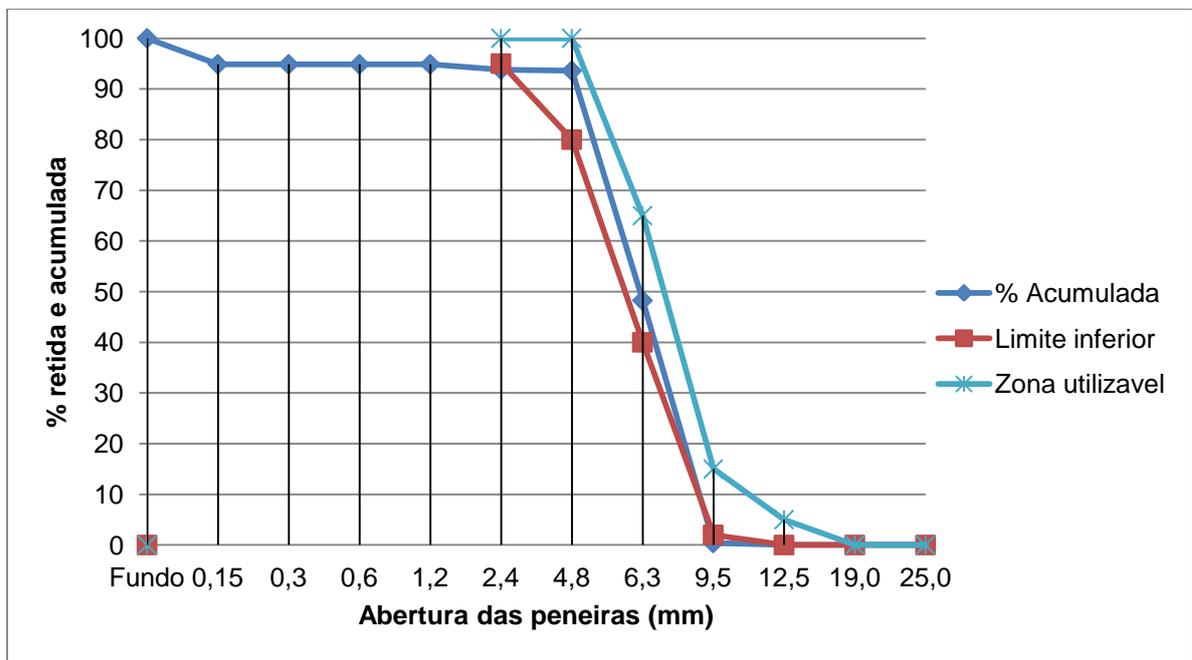
Fonte: Laboratório de Ensaios do Grupo CMP de Passos-MG (2014)

Tabela 08 – *Check list* da granulometria agregado graúdo (brita 0)

Peneiras (mm)	Limites de Graduação para grãos de 4,75 á 12,5 mm		Check List da Granulometria
	Limite inferior	Limite superior	
25,0	0	0	OK
19,0	0	0	OK
12,5	0	5	OK
9,5	2	15	OK
6,3	40	65	OK
4,8	80	100	OK
2,4	95	100	OK

Fonte: Laboratório de Ensaios do Grupo CMP de Passos-MG (2014)

Gráfico 03 – Curva granulométrica do agregado e limites granulométricos da graduação 4,75/12,5 mm conforme a NBR 7211:2009



Fonte: Laboratório de Ensaios do Grupo CMP de Passos-MG (2014)

Para a brita 1 são apresentadas a seguir as TAB. 09, TAB. 10 e o GRAF. 04, que contém respectivamente: a caracterização do agregado graúdo, o check list da granulometria e a curva granulométrica do agregado e limites granulométricos da graduação 9,5/25 mm conforme a NBR 7211:2009.

Tabela 09 – Caracterização do agregado graúdo (brita 1)

Amostra	1	2	1	2	Média	Porcentagem retida e acumulada
Massa inicial (g)	2500	2500	Porcentagem retida individual			
Peneiras (mm)	Massa retida individual (g)					
25,0	0,00	0,00	0,0	0,0	0,0	0
19,0	32,20	32,20	1,3	1,3	1,3	1
12,5	1661,30	1661,30	66,5	66,5	66,5	68
9,5	631,10	631,10	25,3	25,3	25,3	93
6,3	161,30	161,30	6,5	6,5	6,5	99
4,8	3,45	3,45	0,1	0,1	0,1	100
2,4	1,19	1,19	0,0	0,0	0,0	100
1,2	0,00	0,00	0,0	0,0	0,0	100
0,6	0,00	0,00	0,0	0,0	0,0	100
0,3	0,00	0,00	0,0	0,0	0,0	100
0,15	0,00	0,00	0,0	0,0	0,0	100
Fundo	8,83	8,83	0,4	0,4	0,4	100
Massa final (g)	2499,37	2499,37	Dimensão máxima característica (mm)			19
Diferença (%)	0,03	0,03	Módulo de finura			6,92

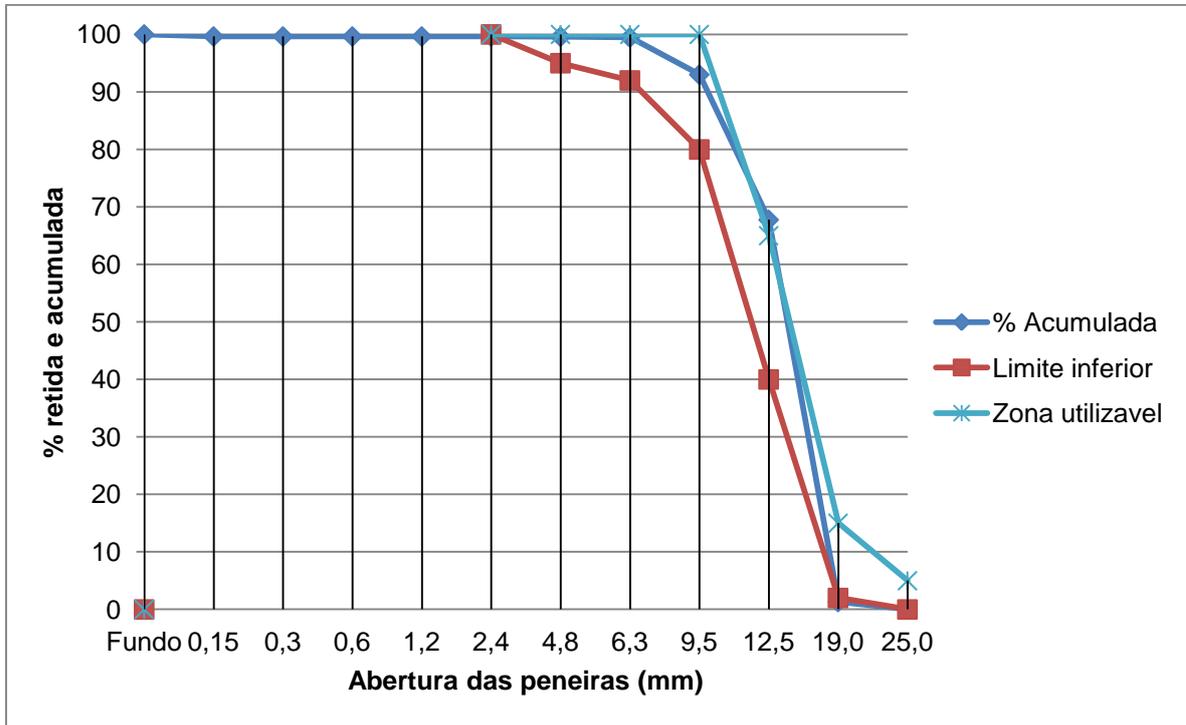
Fonte: Laboratório de Ensaios do Grupo CMP de Passos-MG (2014)

Tabela 10 – Check list da granulometria agregado graúdo (brita 1)

Peneiras (mm)	Limites de Graduação para grãos de 9,5 á 25 mm		Check List da Granulometria
	Limite inferior	Limite superior	
25,0	0	5	OK
19,0	2	15	OK
12,5	40	65	OK
9,5	80	100	OK
6,3	92	100	OK
4,8	95	100	OK
2,4	100	100	OK

Fonte: Laboratório de Ensaios do Grupo CMP de Passos-MG (2014)

Gráfico 04 – Curva granulométrica do agregado e limites granulométricos da graduação 4,75/12,5 mm conforme a NBR 7211:2009



Fonte: Laboratório de Ensaio do Grupo CMP de Passos-MG (2014)

O agregado miúdo utilizado para este estudo foi a areia natural, sendo utilizado o material encontrado na região da cidade de Passos, sendo observada sempre a qualidade do material e sua granulometria.

Para a areia são apresentadas a seguir as TAB. 11, TAB. 12 e o GRAF. 05, que contém respectivamente: a caracterização do agregado graúdo, o check list da granulometria e a curva granulométrica do agregado e limites granulométricos da graduação 4,75/12,5 mm conforme a NBR 7211:2009.

Tabela 11 – Caracterização do agregado miúdo (areia)

Amostra	1	2	1	2	Média	Porcentagem retida e acumulada
Massa inicial (g)	500	500	Porcentagem retida individual			
Peneiras (mm)	Massa retida individual (g)		Porcentagem retida individual			
9,5	0,00	0,00	0,0	0,0	0,0	0
6,3	1,80	1,80	0,4	0,4	0,4	0
4,8	4,38	4,38	0,9	0,9	0,9	1
2,4	14,20	14,20	2,8	2,8	2,8	4
1,2	60,26	60,26	12,1	12,1	12,1	16
0,6	116,67	116,67	23,4	23,4	23,4	39
0,3	228,13	228,13	45,6	45,6	45,6	85
0,15	66,67	66,67	13,3	13,3	13,3	98
Fundo	7,73	7,73	1,5	1,5	1,5	100
Massa final (g)	499,94	499,94	Dimensão máxima característica (mm)			2,4
Diferença (%)	0,00	0,00	Módulo de finura			2,45

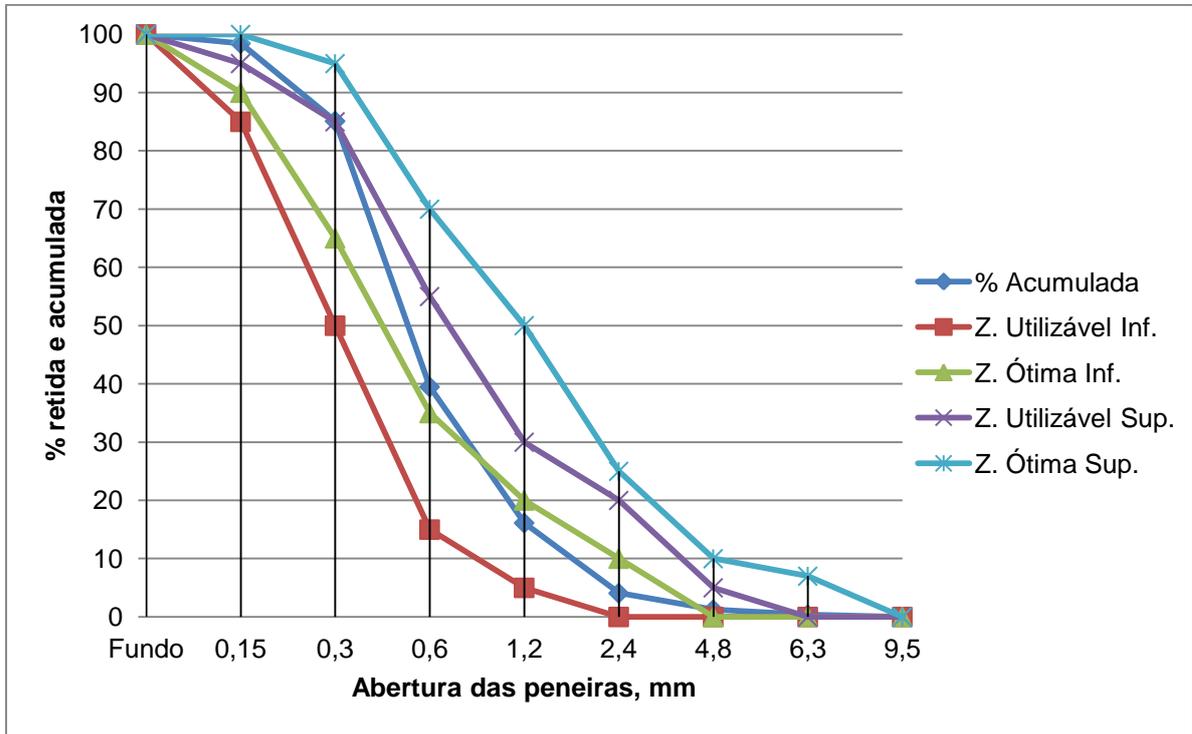
Fonte: Laboratório de Ensaios do Grupo CMP de Passos-MG (2014)

Tabela 12 – *Check list* da granulometria do agregado miúdo (areia)

Peneiras (mm)	Limites de Graduação para grãos de 0,15 á 9,5 mm				Check List da Granulometria
	Limite inferior		Limite superior		
	Zona Utilizável	Zona Ótima	Zona Utilizável	Zona Ótima	
9,5	0	0	0	0	OK
6,3	0	0	0	7	OK
4,8	0	0	5	10	OK
2,4	0	10	20	25	OK
1,2	5	20	30	50	OK
0,6	15	35	55	70	OK
0,3	50	65	85	95	OK
0,15	85	90	95	100	OK
Fundo	100	100	100	100	OK

Fonte: Laboratório de Ensaios do Grupo CMP de Passos-MG (2014)

Gráfico 05 – Curva granulométrica do agregado e limites granulométricos da graduação 0,15/9,5 mm conforme a NBR 7211:2009



Fonte: Laboratório de Ensaios do Grupo CMP de Passos-MG (2014)

5.1.4. Aditivo Superplastificante

O aditivo superplastificante a ser empregado neste estudo será o PLASTOL® 4100 da empresa Viapol de São Paulo. Ele é composto por policarboxilatos de altíssimo desempenho que possuem grande poder de dispersão, gerando também um forte aumento na trabalhabilidade não alterando significativamente as características originais de pega do concreto.

Outro fator relevante ao se escolher um aditivo superplastificante é que ele deve ser estudado também em função de sua compatibilidade com o cimento, seu tempo de ação e o grau de elevação de trabalhabilidade no concreto em relação aos materiais utilizados.

O PLASTOL® 4100 é recomendado para fabricação de concretos de alto desempenho e outros tipos de concreto. Ele atua também na separação estérica e no processo de hidratação do cimento e é isento de cloretos. O produto é compatível com todos os tipos de cimento portland, atendendo requisitos das normas brasileiras

NBR 11768 (tipo SP) e ASTM C494 (tipo F). As características técnicas são dispostas a seguir pela TAB. 13 segundo a empresa Viapol.

Tabela 13 – Características técnicas do superplastificante PLASTOL® 4100

Ação principal:	Aditivo superplastificante tipo II- SP II N (hiperplastificante)
Ação secundária:	Redutor de água de amassamento (A/C)
Composição:	Solução de policarboxilatos em meio aquoso
Aspecto:	Líquido
Cor:	Levemente amarelada
Massa específica:	$\cong 1,1 \text{ g/cm}^3$
Teor de cloretos:	Não contém cloretos

Fonte: Empresa Viapol (2014)

A dosagem recomendada pelo fabricante do produto PLASTOL® 4100 é de 0,4% a 1,6% sobre o peso do cimento (0,4 a 1,6 kg para cada 100 kg de cimento portland). É recomendado que se adicione o produto preferencialmente após o final da mistura dos componentes do concreto ou diluído na segunda adição de água de amassamento. Nunca deve ser adicionado ao cimento ou agregado seco.

5.1.5. Água de Amassamento

A água utilizada tem procedência de um poço artesiano que pertence ao Grupo CMP de Passos-MG. A proporção de água em relação ao cimento (relação a/c) foi de 0,33.

A seguir são apresentadas as TAB. 14 e TAB. 15, que apresentam respectivamente os parâmetros utilizados para a análise da água e os resultados após a realização dos testes para obtenção destes parâmetros. O método utilizado para realização dessa caracterização da água foi o *Standart Methots for the Examination of Water & Wastewater*.

Tabela 14 – Parâmetros utilizados para a análise da água

Parâmetros	Unidade	Método	Limite de quantificação	Valor máximo permitido
Bactérias Heterotróficas	UFC	PCA	1	500
Coliformes totais	NMP/100 ml	Substrato Cromogênio	P/A	Ausência em 95%
Escheríchia Coli	NMP/100 ml	Substrato Cromogênio	P/A	Ausência total
Salmonella sp	P/A	MC Agar	P/A	Ausência total
Cor	uh Pt/Co	Fotométrico	0,1	15,0
pH	-	SM 4500 H ⁺ B	0,01	6,00 – 9,50
Turbidez	NTU	SM 2130B	0,01	5,00
Alcalinidade	mg/L	Titulométrico H ₂ SO ₄	0,1	-
Acidez	mg/L	Titulométrico NaOH	0,01	-

FONTE: SAAE (Serviço Autônomo de Água e Esgoto) de Formiga-MG (2014)

Tabela 15 – Resultados dos testes de acordo com os parâmetros apresentados anteriormente para a análise da água

Parâmetros	Unidade	Quantificação da Amostra
Bactérias Heterotróficas	UFC	< 2
Coliformes totais	NMP/100 ml	Ausência
Escheríchia Coli	NMP/100 ml	Ausência
Salmonella sp	P/A	Ausência
Cor	uh Pt/Co	0,6
pH	-	7,23
Turbidez	NTU	0,36
Alcalinidade	mg/L	75,0
Acidez	mg/L	6,8

FONTE: SAAE (Serviço Autônomo de Água e Esgoto) de Formiga-MG (2014)

Ao comparar os resultados com os valores limites dos parâmetros utilizados para análise da água, verifica-se que todos os parâmetros analisados encontram-se de acordo com os limites estabelecidos pela Portaria N^o 2914 de 12 de dezembro de 2011.

5.2. Métodos

Serão demonstrados a seguir os métodos utilizados para dar seguimento a esse estudo, partindo primeiramente do proporcionamento dos materiais e a descrição de como foi a produção e o preparo dos corpos de prova.

5.2.1. Proporcionamento dos Materiais

Para realização do proporcionamento dos materiais foram utilizados os Métodos de O'Reilly e IBRACON em conjunto, sendo desta união utilizado o traço 1:3 sendo melhor detalhado desta forma de acordo com Tutikian, Isaia e Helene (2011): 1:0,6:0,96:0,79:0,65 (c:af:am:b0:b1).

Porém, para este estudo foram feitas algumas modificações. A primeira delas foi somar os valores de areia fina e média, mas mantendo a granulometria necessária para realização do CAD, sendo o traço detalhado desta forma: 1:1,56:0,79:0,65 (c:a:b0:b1). A segunda foi realizar a adição de sílica ativa em diferentes teores, sendo este o passo principal para constituição do trabalho. O traço unitário e a densidade de cada material são expostos a seguir pela TAB. 16.

Tabela 16 – Traço unitário e densidade de cada material

Material	Traço Unitário	Densidade (g/cm ³)
Cimento	1	3
Areia	1,56	2,64
Brita 0	0,79	2,94
Brita 1	0,65	2,94
Água	0,33	0,99
Sílica	0,05 – 0,10 – 0,15	2,66
Aditivo Superplastificante	0,008 – 0,014	1,10

Fonte: O autor (2014)

Antes de realizar o traço, foram fixados alguns parâmetros necessários para obtenção do CAD necessários, sendo eles dispostos a seguir:

- Abatimento resultante do *slump teste*: ≥ 150 mm;
- Aditivo mineral: adição de três diferentes teores de sílica ativa sobre a massa de cimento, com base nas informações contidas neste trabalho, sendo eles: 5%, 10% e 15%;
 - Aditivo superplastificante: acrescentado à mistura de acordo com suas instruções de uso, sendo adotada a dosagem de 0,8% sobre o peso do cimento;
 - Relação a/c adotada: 0,33;
 - Faixa de resistência à compressão axial aos 7 dias: > 65 MPa;
 - Faixa de resistência à tração por compressão diametral aos 7 dias: 5 à 10% do valor encontrado da compressão axial;

A quantidade de cada material a ser utilizada foi obtida com base no traço unitário disposto anteriormente multiplicado pelo fator resultante com base na massa de cimento, encontrado através de fórmulas de volume e transformação de unidades, conforme é demonstrado a seguir:

- Calcula-se o volume do corpo de prova utilizado (o corpo de prova utilizado tem dimensões 100 mm de base por 200mm de altura):

$$V_1 = \pi r^2 h$$

$$V_1 = \pi \times 0,05^2 \times 0,2$$

$$V_1 = 1,570796327 \times 10^{-3} \text{ m}^3$$

- Multiplica-se o volume do corpo de prova pela quantidade destes a serem utilizadas (no caso, 8 corpos de prova para cada dosagem) :

$$V_8 = V_1 \times 8$$

$$V_8 = 1,570796327 \times 10^{-3} \times 8$$

$$V_8 = 0,01256637 \text{ m}^3$$

- Encontra-se a massa do volume encontrado para 8 corpos de prova em quilogramas (foi utilizada a regra de três, sabendo-se que 1 m^3 de concreto pesa 2400 Kg) e acrescenta-se um valor de 2,5% na massa final encontrada para prevenir eventuais perdas durante a mistura:

$$\begin{aligned} 1 \text{ m}^3 &\rightarrow 2400 \text{ Kg} \\ 0,01256637 \text{ m}^3 &\rightarrow x \text{ Kg} \end{aligned}$$

$$x = 30,15928948 \text{ Kg}$$

$$x = 30,15928948 \text{ Kg} + 2,5\% \text{ (taxa de segurança)} = 30,91327172 \text{ Kg} \cong 30,91 \text{ Kg}$$

➤ Divide-se a massa do volume encontrado para preencher os 8 corpos de prova pela parte do traço 1:3 referente aos agregados (a parte do traço referente aos agregados é o número 3) encontrando-se então o valor de cimento a ser utilizado para essa dosagem:

$$\frac{30,91 \text{ Kg}}{3} = 10,30333333 \cong 10,303 \text{ Kg de cimento}$$

As dosagens para cada lote foram realizadas no Laboratório de Ensaios da CMP de Passos-MG. Os laboratoristas responsáveis realizaram os ensaios necessários de cada material e ajudaram a escolher a melhor taxa de segurança para evitar que ocorra a falta de material para preenchimento dos corpos de prova e também para que não ocorra desperdício.

Com a quantidade de cimento a ser utilizada para uma dosagem (foi calculado anteriormente o valor de 10,303 Kg, porém no momento do ensaio foi utilizado o valor de 10,301 Kg, sendo essa pequena diferença pertinente por estar dentro da taxa de segurança), basta apenas multiplicar o valor encontrado pela parte do traço unitário de cada elemento, conforme é apresentado na TAB. 17 a seguir.

Porém, antes de dar seguimento ao processo de dosagem, deve-se lembrar de que alguns materiais possuem uma porcentagem significativa de umidade em sua constituição, sendo que após se multiplicar o valor encontrado anteriormente de 10,301 Kg de cimento pelo traço unitário, deve-se abater essa umidade no valor de água e somar este valor ao peso dos materiais em destaque. Neste caso, a empresa que realizou a dosagem abatendo a umidade da areia que foi de 2%, na quantidade de água e a somou à massa correspondente ao total da porção de areia disponível,

conforme percebe-se na TAB. 17 e é detalhado pelas equações e suas resoluções a seguir.

Tabela 17 – Traço unitário, traço final com e sem umidade descontada dos materiais para a dosagem do lote W1

Material	Traço Unitário	Traço Final com Umidade	Traço Final sem Umidade
Cimento	1	10,301	10,301
Areia	1,56	16,070	16,391
Brita 0	0,79	8,138	8,138
Brita 1	0,65	6,696	6,696
Água	0,33	3,399	3,331
Sílica	0,05	0,515	0,515
Aditivo Superplastificante	0,008	0,08241	0,08241

Fonte: O autor (2014)

$$\gamma = \frac{\gamma_d}{1 + \frac{w}{100}}$$

$$16,070 = \frac{\gamma_d}{1 + \frac{2}{100}}$$

$$\gamma_d = 16,391 \text{ Kg}$$

$$V_w \text{ utilizado} = 3,399 - (3,399 \times w)$$

$$V_w \text{ utilizado} = 3,399 - (3,399 \times 0,02)$$

$$V_w \text{ utilizado} = 3,331 \text{ l} = 3,331 \text{ Kg}$$

Ao final da realização da mistura dos elementos do lote W1, foi constatado que não seria possível utilizar a mistura por não ter sido suficiente a quantidade de água ou superplastificante presente na mistura. O laboratorista disse que uma

solução mais eficiente seria aumentar a relação a/c nesse lote e que não adiantaria adicionar mais superplastificante à mistura para este lote por o material ter perdido a trabalhabilidade. Outro fator que contribuiu para esse problema foi não ter realizado um ensaio prévio para determinar a dosagem ideal do superplastificante, que podia variar de 0,4% a 1,6%, segundo o fabricante.

Após acrescentar um valor de 0,5 Kg de água ao valor antes calculado de 3,331 Kg de água a ser utilizada inicialmente, conseguiu-se aproveitar a mistura, porém a relação a/c foi alterada, chegando a aproximadamente 0,37. A TAB. 18 apresenta os valores utilizados dos materiais para o primeiro lote

Tabela 18 – Traço unitário, traço final com e sem umidade descontada dos materiais para a dosagem do lote W1 já corrigido pela adição de água

Material	Traço Unitário	Traço Final com Umidade	Traço Final sem Umidade
Cimento	1	10,301	10,301
Areia	1,56	16,070	16,391
Brita 0	0,79	8,138	8,138
Brita 1	0,65	6,696	6,696
Água	0,37	3,399	3,811
Sílica	0,05	0,515	0,515
Aditivo Superplastificante	0,008	0,08241	0,08241

Fonte: O autor (2014)

Foram realizadas três dosagens, tendo como variação os teores de sílica ativa. Como foram realizadas três dosagens, cada mistura gerada pela betoneira produzia 8 corpos de prova. Para a melhor compreensão, a TAB. 19 apresenta as quantidades dos materiais utilizados em cada dosagem, sendo também demonstradas as quantidades de água, sílica ativa e aditivo superplastificante que foram utilizadas.

Tabela 19 – Proporção dos materiais em massa por dosagem

Material	Traço Unitário	Dosagem 1/ Lote W1 (Kg)	Dosagem 2/ Lote W2 (Kg)	Dosagem 3/ Lote W3 (Kg)
Cimento	1	10,301	10,301	10,301
Areia (diâmetro $\leq 4,8$ mm)	1,56	16,391	16,391	16,391
Brita 0	0,79	8,138	8,138	8,138
Brita 1	0,65	6,696	6,696	6,696
Aditivo superplastificante	0,008-0,014	0,08241 (0,8%)	0,14421 (1,4%)	0,14421 (1,4%)
Sílica ativa	0,05-0,10- 0,15	0,515 (5%)	1,030 (10%)	1,545 (15%)
Água (relação a/c)	0,33-0,37	3,811 (a/c=0,37)	3,331 (a/c=0,33)	3,331 (a/c=0,33)

Fonte: O autor (2014)

5.2.2. Produção e Preparo dos Corpos de prova

Para realização da mistura dos concretos do experimento, foi utilizada uma betoneira de eixo inclinado, com capacidade para 120 litros. (FIG. 11). Antes de serem realizadas as dosagens, foi inserida água e brita na betoneira. Depois ela foi ligada para misturar e lavar o seu interior, buscando evitar que a água da mistura que seria inserida depois, fosse absorvida pelas paredes internas, que anteriormente se encontravam secas e com resíduos de misturas anteriores.

Figura 11 – Betoneira de eixo inclinado com capacidade de 120 litros



Fonte: O autor (2014)

A ordem de colocação dos materiais na betoneira em movimento foi mantida constante para todas as misturas, sendo sua sequência descrita da seguinte forma:

1. 100% da brita mais 25% da água;
2. 100% do cimento e 100% da sílica ativa (previamente misturados);
3. Mistura por 1 minuto;
4. 75% da água;
5. 100% da areia;
6. Mistura por 2 minutos;
7. 100% do aditivo superplastificante;
8. Mistura por 5 minutos.

Após a realização do traço de cada lote, foi realizado o ensaio de consistência pelo abatimento do tronco de cone (*slump test*) segundo a NBR NM 67: 1998 para cada lote de dosagens. A FIG. 12 demonstra o início do ensaio, sendo efetuado o preenchimento do tronco de cone com concreto, para posterior realização do *slump test*.

Figura 12 – Preenchimento do tronco de cone para realização do *slump test*



Fonte: O autor (2014)

Realizado o *slump test* e observando que seus resultados estão dentro das condições impostas anteriormente (≥ 150 mm), partiu-se para a transferência da massa de concreto para 8 fôrmas metálicas com dimensões de 100 x 200 mm. (FIG. 13). O processo de moldagem dos 8 corpos de prova de cada lote nas fôrmas foram realizados de acordo com a NBR 5738:2003.

Figura 13 – O concreto após ser colocado nas fôrmas



Fonte: O autor (2014)

Após a moldagem dos corpos de prova de cada lote, eles foram levados e mantidos no ambiente de laboratório por 24 horas. Passado esse período, os corpos de prova foram retirados das fôrmas e foram identificados na face lateral, e em sua face superior foi escrita a data prevista para realização dos ensaios conforme apresenta a FIG. 14. Em seguida eles foram colocados em um tanque com água conforme mostra a FIG. 15, e lá permaneceram até a data de realização dos ensaios, sendo retirados do tanque pela parte da manhã do dia e realizados os ensaios à tarde.

Figura 14 – Identificação dos corpos de prova



Fonte: O autor (2014)

Figura 15 – Tanque com água onde são mantidos os corpos de prova após suas retiradas das fôrmas



Fonte: O autor (2014)

Neste período de espera para realização dos ensaios, os corpos de prova destinados ao ensaio de compressão axial passaram por um processo de capeamento utilizando o enxofre como material. Deve-se lembrar de que o capeamento é utilizado para regularizar a superfície de contato do corpo de prova

com a prensa que realiza o ensaio. A FIG. 16 mostra o enxofre em estado físico-sólido e a FIG. 17 mostra os corpos de prova já com o capeamento de enxofre. Ressalta-se que o enxofre foi derretido para realização do capeamento por funcionários do laboratório da CMP de Passos devidamente treinados e protegidos por seus EPI's.

Figura 16 – Recipiente com enxofre sólido para capeamento



Fonte: O autor (2014)

Figura 17 – Corpos de prova capeados com enxofre



Fonte: O autor (2014)

Para realização do ensaio de resistência à tração por compressão diametral, foram utilizadas duas tiras de chapa dura de madeira sem imperfeições, tudo conforme a norma NBR 7222:2011 que foi consultada para execução do ensaio.

Sendo realizados todos esses procedimentos citados anteriormente, pode-se partir para execução dos ensaios. A seguir, a TAB. 20 apresenta as datas de execução dos traços e suas datas previstas para realização dos ensaios.

Tabela 20 – Datas de realização das dosagens e ensaios de cada lote

Dosagens/Lotes	Data da Execução da Dosagem	Data da Execução dos Ensaios no Laboratório da Concreteira CMP de Passos-MG e no da faculdade FESP de Passos-MG
Dosagem 1/ Lote W1	30/09/2014	07/10/2014
Dosagem 2/ Lote W2	30/09/2014	07/10/2014
Dosagem 3/ Lote W3	30/09/2014	07/10/2014

Fonte: O autor (2014)

Cabe ressaltar que foram realizados os mesmos ensaios de compressão e tração nos corpos de prova em locais diferentes para procurar confirmar os resultados.

6. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados alcançados dos ensaios realizados neste trabalho, sendo eles:

- *Slump test*;
- Resistência à compressão axial;
- Resistência à tração por compressão diametral.

6.1. *Slump Test*

O primeiro parâmetro a ser avaliado conforme foi fixado no capítulo de materiais e métodos deste trabalho é o abatimento depois de realizado o *slump test*. A TAB. 21 apresenta os resultados do *slump test*, podendo-se observar que o valor fixado como abatimento mínimo de 150 mm ou maior foi alcançado. Essa condição é necessária para que se obtenha uma boa trabalhabilidade do concreto durante e após sua dosagem, sendo um fator determinante para sua utilidade e cura.

Tabela 21 – Resultados da medição do abatimento do concreto pelo ensaio *slump test*

Dosagens/Lotes	Relação a/c	Abatimento (mm)
Dosagem 1/ Lote W1	0,37	235
Dosagem 2/ Lote W2	0,33	230
Dosagem 3/ Lote W3	0,33	260

Fonte: O autor (2014)

A FIG. 18 demonstra como foi medido o abatimento do concreto após ser retirado o cone. Para realização do *slump test* foi seguida a norma NBR NM 67.

Figura 18 – Medição do abatimento do concreto



Fonte: O autor (2014)

6.2. Resistência à Compressão Axial

Ao chegar à data prevista para realização do ensaio, os corpos de prova foram encaminhados para perto das prensas hidráulicas onde seriam realizados os ensaios. O ensaio de compressão axial foi realizado na prensa hidráulica da fabricante Solotest na CMP de Passos, que aparece na FIG. 19, e por outra prensa da fabricante Forney na faculdade FESP (Fundação de Ensino Superior de Passos) representada pela FIG. 20.

Figura 19 – Prensa hidráulica da fabricante Solotest para realização do ensaio de compressão axial



Fonte: O autor (2014)

Figura 20 – Prensa hidráulica da fabricante Forney para realização do ensaio de compressão axial e também o de tração por compressão diametral



Fonte: O autor (2014)

Para calcular a resistência à compressão resistida pelos corpos de prova, foi consultada e seguida a norma NBR 5739:2007. Nela foi utilizada principalmente a equação a seguir, que foi utilizada para realização do cálculo de resistência à compressão:

$$f_c = \frac{4F}{\pi \times D^2}$$

Onde:

f_c é a resistência à compressão, em megapascals (MPa);

F é a força máxima alcançada, em newtons (N);

D é o diâmetro do corpo de prova, em milímetros (mm).

Também foi realizada a avaliação estatística de desempenho dos ensaios conforme a NBR 5739:2007, calculando-se a média entre os valores encontrados para cada lote, o desvio-padrão e o coeficiente de variação. A seguir é apresentada uma primeira equação que foi utilizada para realização do cálculo do desvio-padrão e uma segunda equação para o cálculo do coeficiente de variação.

$$S_e = \sqrt{\frac{\sum(f_{cc1} - f_{cm})^2}{n - 1}}$$

Onde:

S_e é o desvio padrão;

f_{cc1} é o valor de cada resultado obtido no ensaio;

f_{cm} é o valor da média dos resultados;

n é o numero de ensaios.

$$cv_e = \frac{S_e}{f_{cm}} \times 100$$

Onde:

cv_e é o coeficiente de variação;

S_e é o desvio padrão;

f_{cm} é o valor da média dos resultados;

A TAB. 22 apresenta a seguir os resultados obtidos na realização dos ensaios de compressão axial aos 7 dias. Deve-se ressaltar que os valores da força aplicada pelas prensas eram disponibilizados em kilograma-força (Kgf), sendo que para utilizá-la nas equações citadas anteriormente, necessitou-se realizar a transformação dos valores para N (Newton), multiplicando os valores em Kgf pela aceleração da gravidade (a), sendo utilizado o valor de $9,81m/s^2$.

Tabela 22 – Resultados obtidos na realização dos ensaios de compressão axial aos 7 dias

Dosagens/Lotes	Corpo de prova	Carga Máxima Aplicada (Kgf)	Resistência à Compressão Axial f_{c7} (MPa)
Dosagem 1/ Lote W1	W1A	58090	72,557
	W1B	63130	78,852
	W1C	62750	78,378
	W1D	59000	73,694
	Média		75,870
	Desvio Padrão		3,209
	Coefficiente de Variação		4,229%
Dosagem 2/ Lote W2	W2A	63380	79,165
	W2B	64140	80,114
	W2C	61000	76,192
	W2D	63000	78,690
	Média		78,540
	Desvio Padrão		1,674
	Coefficiente de Variação		2,131%
Dosagem 3/ Lote W3	W3A	66890	83,549
	W3B	61360	76,642
	W3C	68000	84,935
	W3D	65000	81,188
	Média		81,578
	Desvio Padrão		3,636
	Coefficiente de Variação		4,457

Fonte: O autor (2014)

Conforme a NBR 5739:2007, para realizar a avaliação da eficiência dos ensaios, foi utilizada como referência a TAB. 23, que apresenta os níveis de avaliação determinados pelo coeficiente da variação.

Tabela 23 – Avaliação do ensaio através do coeficiente de variação dentro do ensaio

Coeficiente de Variação (cv_e)				
Nível 1 (Excelente)	Nível 2 (Muito bom)	Nível 3 (Bom)	Nível 4 (Razoável)	Nível 5 (Deficiente)
$cv_e \leq 3,0$	$3,0 < cv_e \leq 4,0$	$4,0 < cv_e \leq 5,0$	$5,0 < cv_e \leq 6,0$	$cv_e > 6,0$

Fonte: NBR 5739 (2007)

Comparando os resultados alcançados com os valores tabelados do coeficiente de variação conforme aparece na TAB. 23 apresentada anteriormente, percebe-se que os ensaios foram satisfatórios encontrando-se no nível 3 (bom) para os lotes W1 e W3 e nível 1 (excelente) para o lote W2.

Também se deve lembrar que a relação a/c do lote W1 foi de 0,37, sendo diferente da dos lotes W2 e W3, que é de 0,33, sendo este detalhe apresentado anteriormente. Porém mesmo fugindo do parâmetro inicial de se ter alterado apenas os teores de sílica, os resultados ainda foram satisfatórios e proporcionais aos esperados.

A seguir a FIG. 21 apresenta uma imagem realizada durante o processo de execução do ensaio de compressão axial e a FIG. 22 demonstra um corpo de prova após a realização deste ensaio.

Figura 21 – Realização do ensaio de compressão axial



Fonte: O autor (2014)

Figura 22 – Corpo de prova após realização do ensaio de compressão axial



Fonte: O autor (2014)

Percebeu-se certa variação entre os resultados obtidos dentro de um mesmo lote, como mostra a TAB. 16 apresentada anteriormente. Acredita-se que essas oscilações se devem a alguns fatos ocorridos durante a realização do trabalho, sendo eles:

- Ao realizar as camadas de concreto dentro da forma, utilizou-se o adensamento manual, sendo a realização deste talvez não tão eficaz quanto se tivesse utilizado o adensamento mecânico;
- O capeamento ter sido realizado com enxofre reutilizado, ou seja, este já foi empregado mais de uma vez para capeamento.

De acordo com os resultados obtidos sobre a resistência do concreto a compressão axial, observa-se a influência da adição de sílica ativa no concreto de alto desempenho. Estes resultados comparados com os estudos de Tutikian¹⁰ (2007 apud TUTIKIAN; ISAIA; HELENE, 2011), que propôs realizar os Métodos de O'Reilly

¹⁰ TUTIKIAN, B. F. **Proposição de um método de dosagem experimental para concretos auto-adensáveis**. Porto Alegre: UFRGS, 2007. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS, PortoAlegre, 2007.

e IBRACON em conjunto, demonstram que a resistência por ele atingida com o mesmo traço (aproximadamente 65 MPa aos 7 dias) foi superada com a adição dos teores de 5%, 10% e 15% de sílica ativa.

Percebeu-se através da TAB. 16 apresentada anteriormente, que a resistência à compressão axial foi aumentando proporcionalmente à medida que se aumentava o teor de sílica. Ao observar os resultados do lote W3 com adição de 15% de sílica ativa, percebe-se que ele foi o teor que mais aumentou significativamente à resistência do concreto à compressão axial.

6.3. Resistência à Tração por Compressão Diametral

Ao chegar à data prevista para realização do ensaio, os corpos de prova foram encaminhados para perto das prensas hidráulicas onde seriam realizados os ensaios.

O ensaio de tração por compressão diametral foi realizado na prensa hidráulica da fabricante Solocap na CMP de Passos que aparece na FIG. 23 e também foi realizado na prensa hidráulica da fabricante Forney na faculdade FESP, apresentada anteriormente na FIG. 20 na apresentação e análise dos resultados de resistência à compressão axial.

Figura 23 – Prensa hidráulica da fabricante Solocap para realização do ensaio de tração por compressão diametral



Fonte: O autor (2014)

Para calcular a resistência indireta à tração por compressão diametral resistida pelos corpos de prova, foi consultada e seguida a norma NBR 7222:2011. Nela foram adotadas principalmente as equações a seguir, que foram utilizadas para realização do cálculo de resistência indireta à tração por compressão diametral e posteriormente a resistência direta a tração:

$$f_{ct,sp} = \frac{2F}{\pi \times D \times l}$$

Onde:

$f_{ct,sp}$ é a resistência à tração por compressão diametral, em megapascals (MPa);

F é a força máxima alcançada, em newtons (N);

D é o diâmetro do corpo de prova, em milímetros (mm);

l é o comprimento do corpo de prova, expresso em milímetros (mm).

$$f_{ct} = 0,9 \times f_{ct,sp}$$

Onde:

f_{ct} é a resistência direta a tração.

A TAB. 24 apresenta a seguir os resultados obtidos na realização dos ensaios de tração por compressão diametral aos 7 dias. Deve-se ressaltar que os valores da força aplicada pelas prensas eram disponibilizados em kilograma-força (Kgf), sendo que para utilizá-la nas equações citadas anteriormente, necessitou-se realizar a transformação dos valores para N (Newton), multiplicando os valores em Kgf pela aceleração da gravidade (a), sendo utilizado o valor de $9,81\text{m/s}^2$.

Tabela 24 – Resultados obtidos na realização dos ensaios de tração por compressão diametral aos 7 dias

Dosagens/Lotes	Corpo de prova	Carga Máxima Aplicada (Kgf)	Resistência Indireta à Tração por Compressão Diametral $f_{ct,sp7}$ (MPa)	Resistência Direta à Tração f_{ct7} (MPa)
Dosagem 1/ Lote W1	W1E	16320	5,096	4,586
	W1F	16768	5,236	4,712
	W1G	17750	5,543	4,989
	W1H	14000	4,372	3,935
	Média			4,555
	Desvio Padrão			0,447
	Coeficiente de Variação			9,813%
Dosagem 2/ Lote W2	W2E	16482	5,147	4,632
	W2F	20884	6,521	5,869
	W2G	17250	5,387	4,848
	W2H	20150	6,292	5,663
	Média			5,253
	Desvio Padrão			0,605
	Coeficiente de Variação			11,517%
Dosagem 3/ Lote W3	W3E	20129	6,286	5,657
	W3F	18990	5,930	5,337
	W3G	15250	4,762	4,286
	W3H	17000	5,308	4,777
	Média			5,014
	Desvio Padrão			0,607
	Coeficiente de Variação			12,106%

Fonte: O autor (2014)

Ao observar a tabela anterior, percebe-se que se teve uma pequena variação nos valores encontrados de resistência direta à tração entre amostra do mesmo lote. Acredita-se que essas oscilações se devem a alguns fatos ocorridos durante a realização do trabalho, sendo eles:

- Ao realizar as camadas de concreto dentro da forma, utilizou-se o adensamento manual, sendo a realização deste talvez não tão eficaz quanto se tivesse utilizado o adensamento mecânico;
- Pode ter ocorrido o mau posicionamento dos corpos de prova entre as pequenas chapas de madeira, ou também o possível mau posicionamento dos mesmos fora do centro de aplicação de força da prensa hidráulica.

A seguir a FIG. 24 apresenta uma imagem realizada durante o processo de execução do ensaio de tração por compressão diametral e a FIG. 25 demonstra um corpo de prova após a realização deste ensaio.

Figura 24 - Realização do ensaio de tração por compressão diametral



Fonte: O autor (2014)

Figura 25 – Corpo de prova após realização do ensaio de tração por compressão diametral



Fonte: O autor (2014)

Mas mesmo com essas pequenas variações, foram obtidos resultados relativamente ótimos, por serem previstos valores de resistência à tração aos 28 dias cerca de 5 a 10% dos valores encontrados para a resistência à compressão. A TAB. 25 apresenta os valores médios de resistência à tração e compressão dos concretos de cada lote e a razão entre eles descrita em porcentagem.

Tabela 25 – Razão entre resistência à tração e a resistência à compressão

Dosagens/Lotes	Resistência Direta à Tração f_{ct7} (MPa)	Resistência à Compressão Axial f_{c7} (MPa)	Razão (%)
Dosagem 1/ Lote W1	4,555	75,870	6,004
Dosagem 2/ Lote W2	5,253	78,540	6,688
Dosagem 3/ Lote W3	5,014	81,578	6,146

Fonte: O autor (2014)

Percebe-se que essa resistência à tração no CAD é um valor superior e mais considerável em relação ao concreto convencional. Acredita-se que esses valores foram alcançados devido à adição de sílica ativa a mistura, que tem a capacidade de preencher os vazios da zona de transição entre o material cimentício/agregado, ao mesmo tempo consegue reagir com a água e a portlandita disponível, gerando assim um aumento da resistência do concreto (TÉCHNE, 2002).

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve como principal objetivo verificar a influência da adição de sílica ativa ao concreto de alto desempenho, utilizando um mesmo traço já estudado, variando apenas o teor de sílica (5%, 10%, 15%) ativa em diferentes lotes. Para avaliar esta influência, foram estudadas algumas propriedades mecânicas do CAD, sendo as principais: resistência à compressão axial e resistência à tração por compressão diametral.

Após a obtenção dos resultados procurou-se estabelecer correlações entre as propriedades mecânicas estudadas e os resultados, buscando demonstrar aos interessados pela geração do CAD sobre as principais vantagens e ganhos que um concreto de alto desempenho pode ter ao ser adicionado certos teores de sílica ativa.

As conclusões apresentadas a seguir podem servir como base para melhor compreensão dos resultados e comportamentos do CAD sendo produzido com proporções diferentes de sílica ativa.

7.1. Conclusões

Levando-se em consideração as condições de ensaio, os materiais e métodos utilizados e os resultados alcançados para os ensaios mecânicos os comparando com os estudos dispostos no referencial teórico pode-se chegar às seguintes conclusões:

- Pequenas relações de a/c na mistura para geração de um CAD com sílica ativa necessitam também de um bom superplastificante, além de que se deve testar previamente o traço para avaliação da melhor proporção do superplastificante;
- O ganho de resistência à compressão axial é evidentemente significativo, sendo a adição de sílica que se obteve o melhor resultado foi a de 15% em relação à massa de cimento;
- O ganho de resistência à tração por compressão diametral é evidentemente significativo sendo que na adição de sílica que se obteve o melhor

resultado foi a de 10% em relação à massa de cimento. Porém, todos os resultados superaram as expectativas para um curto período de 7 dias para realização do ensaio, observando-se que as razões alcançadas ficaram acima de 6% em relação à resistência à compressão axial;

➤ Seria possível alcançar valores mais altos de resistência sendo realizada uma melhor seleção dos materiais constituintes. Outros fatores que poderiam ser melhorados seriam o preparo, moldagem e cura dos corpos de prova;

➤ Resumindo, a adição de sílica ativa é benéfica e recomendável na realização de um CAD. Deve-se realizar uma pré-dosagem dos elementos do traço a serem utilizados, pois a obtenção dos resultados pretendidos depende diretamente da relação a/c e do tipo e quantidade de superplastificante a ser utilizado.

7.2. Sugestões para Trabalhos Futuros

➤ Realizar o ensaio de módulo de elasticidade para verificar se a adição de sílica ativa no CAD interfere nos seus resultados;

➤ Realizar dosagens com teores de sílica ativa diferentes, principalmente utilizando os valores de 8% e 20%, sendo o primeiro valor visto por muitos estudiosos como o ideal e o segundo valor considerado um desperdício;

➤ Pesquisar sobre o custo entre a produção de um CAD que alcança determinada resistência com sílica ativa e de outro CAD sem sílica, mas que alcança a mesma resistência;

➤ Pesquisar sobre a possibilidade da utilização de outros aditivos para obtenção de resultados ainda melhores para um concreto de alto desempenho;

➤ Utilização da sílica proveniente do processamento do bagaço da cana-de-açúcar e da casca de arroz buscando compará-las em suas ações sobre o CAD;

➤ Realizar um estudo comparativo entre a carbonatação de um concreto comum e de um concreto de alto desempenho.

REFERÊNCIAS

- AITCIN, P. **Concreto de Alto Desempenho**. São Paulo: PINI, 2000. 668 p.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 363R-92**: State-of-the-art report on highstrength concrete. ACI, Detroit (USA), 2001.
- ANDRADE, T; HELENE, P. Concreto de Cimento Portland. In: ISAIA, G. (Ed). **Materiais de Construção Civil**: e princípios de Ciência e Engenharia de Materiais. São Paulo: IBRACON, 2010. cap. 29, p. 905-944.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Concreto de Alto Desempenho**. São Paulo: ABCP, 1999. 1 CD-ROM..
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5733**: Cimento Portland de alta resistência inicial. Rio de Janeiro, 1991.
- _____. **NBR 5738**: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2003.
- _____. **NBR 5739**: Concreto - Ensaios de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.
- _____. **NBR 7211**: Agregados para concreto - Especificação. Rio de Janeiro, 2009.
- _____. **NBR 7222**: Concreto e argamassa — Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011.
- _____. **NBR 11768**: Aditivos químicos para concreto de cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro, 2011.
- _____. **NBR 13956-1**: Sílica ativa para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta. Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro, 2012.
- _____. **NBR NM 45**: Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.
- _____. **NBR NM 52**: Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.
- _____. **NBR NM 53**: Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009.
- _____. **NBR NM 67**: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.

BARATA, M. **Concreto de alto desempenho no estado do Pará**: Estudo de viabilidade técnica e econômica de produção de concreto de alto desempenho com os materiais disponíveis em Belém e através do emprego de adições de sílica ativa e metacaulim. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 1998.

BAUER, L. **Materiais de Construção**. 5ª. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011, 488 p.

BERTOLINI, L. **Materiais de Construção**: patologia, reabilitação, prevenção. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

BRASIL. Ministério da Saúde. **Portaria nº 2914**, de 12 de dezembro de 2011. Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Disponível em: http://site.sabesp.com.br/uploads/file/asabesp_doctos/kit_arsesp_portaria2914.pdf. Acesso em: 17 de outubro de 2014.

CIMENTO NACIONAL, site. **CP V-ARI MAX**. Disponível em: <<http://www.cimentonacional.com.br/produtos/cimento-nacional/cp-v-ari-max>>. Acesso em: 17 de outubro de 2014.

CORDEIRO, G. **Utilização de cinzas ultrafinas do bagaço de cana-deaçúcar e da casca de arroz como aditivos minerais em concreto**. Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, 2006.

EVANGELISTA, A.C.J. **Produção e Preparo de Concretos leves de alta resistência**. 1996. 141 p Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)-Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1996.

FUSCO, P. **Tecnologia do Concreto Estrutural**: tópicos aplicados. São Paulo: PINI, 2008. 179 p.

GUIMARÃES, A. T. C.; RECENA, F. A. P. PEREIRA, F. M. Produtos de Cimento Portland. In: ISAIA, G. (Ed). **Materiais de Construção Civil**: e princípios de Ciência e Engenharia de Materiais. São Paulo: IBRACON, 2007. cap. 30, p. 945-982.

GUTIÉRREZ, P; CÁNOVAS, M. High-performace Concrete: requirements for constituent materials and mix proportioning. **ACI Materials Journal**, Detroid, v.93, n.3, p.233-241,1996.

HOUSTON, D. Rice Hulls. **Rice Chemistry and Technology**. Am. ASS. Cereal Chem, Ins. St. Paul, Minesota, USA, 1972.

ISAIA, G. **Efeitos de misturas binárias e ternárias de pozolanas em concreto de elevado desempenho**: um estudo de durabilidade com vistas a corrosão da armadura. 1995. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, 1995.

JORGE, M; ASCOLI, C; CARASEK, H. **Durabilidade do concreto**. World TecNet: Tecnologia do concreto nº 00049, UFG Disponível em <<http://www.cesec.ufpr.br/~wtecnet>>. Acesso em: 19 de mai. 2014.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto**: microestrutura, propriedades e materiais. São Paulo: Pini, 2008.

MEHTA, P. Rice Husk Ash: A Unique Supplementary Cementing Material. **Advances in Concrete Technology**, Ottawa: Canmet, p. 407-431, 1992.

NEVILLE, A. **Propriedades do Concreto**. trad. Salvador E. Giammusso, São Paulo: PINI, 1997.

PRICE, B. **Advanced Concrete Technology**. Amsterdam/Boston: Elsevier Butterworth Heinemann, 2003.

RIBEIRO, C.; PINTO, J.; STALING, T. **Materiais de Construção Civil**. 3ª. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2011. 112 p.

TÉCHNE, revista mensal de engenharia civil. São Paulo: PINI, n. 63, p. 36-43, junho, 2002.

VIAPOL, site. **Aditivos**: concreto e argamassa. Disponível em: <http://www.viapol.com.br/produtos_desc.php?menu=aditivos&codigo_item=297>. Acesso em: 17 de outubro de 2014.

TECNOSIL, site. **Produtos**: catálogo sílica ativa. Disponível em: <<http://www.tecnosilbr.com.br/wp-content/themes/tecnosilbr/download/catalogo-silica-ativa.pdf>>. Acesso em: 26 de setembro de 2014.

TECNOSIL, site. **Produtos**. Disponível em: <<http://www.tecnosilbr.com.br/produtos/>>. Acesso em: 08 de outubro de 2014.

TUTIKIAN, B. F.; ISAIA, G. C.; HELENE, P. Concreto de Alto e Ultra-Alto Desempenho. In: ISAIA, G. (Ed). **Concreto**: ciência e tecnologia. São Paulo: IBRACON, 2011. cap. 36.