



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
NÚCLEO DE DESENVOLVIMENTO AMAZÔNICO EM ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA DE BARRAGEM E GESTÃO AMBIENTAL

GRAZIELLE TIGRE DE SOUZA

**DOSAGEM EXPERIMENTAL DE CONCRETO MASSA COM ADIÇÃO
DE SÍLICA ATIVA APLICADO EM BARRAGEM**

TUCURUÍ – PA
2017

GRAZIELLE TIGRE DE SOUZA

**DOSAGEM EXPERIMENTAL DE CONCRETO MASSA COM ADIÇÃO
DE SÍLICA ATIVA APLICADO EM BARRAGEM**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Barragem e Gestão Ambiental da Universidade Federal do Pará para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia de Barragem e Gestão Ambiental.

Orientadora: Prof.^a Dra. Fernanda Pereira Gouveia

TUCURUÍ – PA

2017

GRAZIELLE TIGRE DE SOUZA

**DOSAGEM EXPERIMENTAL DE CONCRETO MASSA COM ADIÇÃO
DE SÍLICA ATIVA APLICADO EM BARRAGEM**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Barragem e Gestão Ambiental da Universidade Federal do Pará para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia de Barragem e Gestão Ambiental.

Orientadora: Prof.^a Dra. Fernanda Pereira Gouveia

Tucuruí, 10 de Novembro de 2017.

Aprovado por:

Fernanda Pereira Gouveia, Dr.^a em Estruturas e Construção Civil (CAMTUC/UFPA)
(Orientadora)

Karyme do Socorro de Souza Vilhena, Dr.^a em Química (CAMTUC/UFPA)
(Examinador Interno)

Luciana de Nazaré Pinheiro Cordeiro, Dr.^a em Construção Civil (UFPA- Belém)
(Examinador Externo)

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a minha vó Cilênia Tigre (*in memoriam*) por toda contribuição durante sua vida para que eu alcançasse meus objetivos, seus ensinamentos, carinho e amor incomparável, sendo, portanto a principal fonte de inspiração na realização desta dissertação.

AGRADECIMENTOS

À **Deus**, em primeiro lugar, por mais essa conquista na minha vida.

À **Prof.^a Fernanda Gouveia** pela orientação, confiança, paciência constante e colaboração no desenvolvimento deste projeto.

À minha mãe **Guiomar Tigre**, meu exemplo de determinação e coragem. Muito obrigada pelas suas orações, conselhos e pelas palavras de amor e carinho.

À minha vó **Cilênia Tigre** (in memoriam), a quem eu terei saudades eternas, por ser quem sempre contribuiu e incentivou meus estudos e por ter me deixado de herança os melhores ensinamentos e lições de vida.

Ao meu pai **Adeilton Gomes**, meu avô **Eurico** e meus irmãos (**Antônio, Ana Carolina, Gabriela e Andressa**) pelo apoio e incentivo.

Ao meu namorado **Diego Almeida** pelo amor e carinho demonstrado, pela colaboração e paciência durante a realização desta pesquisa.

Aos meus amigos **Davi Barbosa e Jaqueline Pinheiro**, os quais a graduação me deu a oportunidade de conhecer e essa amizade permaneceu durante o mestrado.

As minhas amigas **Jaciara, Jéssica Magda, Gabriela, Rosângela e Aline** por todo o carinho e companheirismo ao longo destes anos.

À família **Bernardo** pelo apoio que sempre demonstraram, em especial a minha amiga **Karen** pela contribuição e presença constante em todos os momentos.

A **Prof.^a Karyme Vilhena** pelo auxílio e confiabilidade no uso dos equipamentos para a realização dos ensaios no Laboratório de Química da UFPA.

À **Francirene** e aos alunos da Faculdade de Engenharia Civil **Cleomar, Isabelle, Marcos, Brenda, Izabela, Raí, Alan e Roberta** pela contribuição no desenvolvimento dos ensaios realizados.

Ao **Eng. Reynaldo Bittencourt** pela contribuição e apoio incondicional na realização deste trabalho, o qual com dedicação e eficiência transmitiu seus conhecimentos e experiências.

À equipe do Laboratório de **FURNAS-GO**, em especial ao Químico **Álvaro** pela realização dos ensaios de RAA.

À empresa **Dow Corning Silício do Brasil** pela doação da sílica ativa utilizada nesta pesquisa, bem como a disponibilidade do Laboratório de Química.

A todos, os meus sinceros votos de agradecimento.

RESUMO

O estudo de dosagem de concreto para uma grande obra, especificamente de barragens se reveste de peculiaridades próprias, por efeito dos grandes volumes envolvidos, intensificando assim o cuidado com o proporcionamento e qualidade dos materiais utilizados. Para estes concretos são, geralmente, utilizadas composições com adições pozolânicas, de maneira a reduzir o calor de hidratação bem como atuar na inibição de reações expansivas do tipo álcali-agregado. Neste sentido, o principal objetivo desta pesquisa concentra-se na elaboração de traços de concreto massa com a substituição de 8% do cimento por sílica ativa, sendo o estudo experimental de dosagem baseado no Método do Módulo de Finura dos Agregados. Com a finalidade de atender a proposta desta pesquisa, a metodologia baseou-se primeiramente na caracterização dos materiais constituintes do concreto (cimento, agregados miúdos e graúdos, assim como a sílica ativa), estudo da dosagem do concreto pelo método do Módulo de Finura dos Agregados (MMF) e posterior análise das propriedades do concreto massa obtidas possibilitando assim elaborar a composição dos concretos conforme requisitos especificados em projeto de estruturas de usinas hidrelétricas. Neste sentido, no que diz respeito à caracterização dos agregados, os resultados demonstraram a viabilidade da utilização destes na produção de concreto massa para barragens. Em relação ao cimento e a sílica ativa as características destes materiais atenderam os requisitos normativos. A dosagem experimental com base no método MMF possibilitou à elaboração dos gráficos de dosagem necessários para a definição da composição de concretos e conseqüentemente a verificação de suas aplicações em barragens, sendo os concretos de classe D adequados ao estudo. Pode-se afirmar, portanto que a abordagem do MMF desenvolvida nesta pesquisa pode ser considerada uma importante contribuição na disseminação da metodologia de dosagem para aplicação em concreto massa em barragens.

Palavras chave: Concreto massa; Dosagem; Módulo de finura; Sílica ativa.

ABSTRACT

The study of concrete dosage for large constructions, specifically of dams, has its own peculiarities due to the large volumes involved, intensifying the care with the supply and quality of materials used for these concretes, compositions with pozzolan additions are generally used in order to reduce the heat of hydration. In this sense, the main objective of this research is the elaboration of a mix design of concrete with the substitution of 8% of the cement per silica fume, the experimental study of the mix design was based on the Method of the Fineness Module of the Aggregates. To meet the proposal of this research, the methodology based primarily on the characterization of concrete constituent materials (fine and coarse aggregates, and silica fume), concrete mix design study by the Method of the Fineness Module (MFM) and subsequent analysis of the properties of the concrete mass obtained, making it possible to elaborate the concrete mix design, according to the requirements specified in the design of hydroelectric power plant structures. In this sense, with regard to the characterization of the aggregates, the results demonstrated the feasibility of the use of these in the production of concrete for dams. In relation to cement and silica fume the characteristics of these materials attend the normative requirements. The experimental dosage based on the MFM method, made it possible to compose the dosage graphs needed to define the mix design of concretes and consequently the verification of their applications in dams. It can be affirmed, thus, that the MMF approach developed in this research can be considered an important contribution, for the dissemination of the dosage methodology for concrete application in dams.

Keywords: Concrete mass, Mix design, Fineness Module, Silica Fume.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Usina Hidrelétrica de Tucuruí.....	22
Figura 2- Localização das usinas hidrelétricas planejadas no PDE 2024.....	24
Figura 3- Evolução da capacidade instalada de hidrelétrica.....	25
Figura 4- Seção transversal esquemática típica- barragem de concreto de gravidade.	27
Figura 5 - a) e b) Usina de Itaipu.....	30
Figura 6- Barragem de Hoover.....	31
Figura 7 - Processo de fabricação do silício metálico.	41
Figura 8 - Fluxograma do esquema produtivo do metacaulim.....	43
Figura 9 - Metacaulim- a) metacaulim de cor branca b) micrografia do material com aumento de 10.000x.....	44
Figura 10- Diagrama de dosagem dos concretos de cimento Portland.....	47
Figura 11 - Fluxograma do programa experimental.....	54
Figura 12 - Cimento utilizado na pesquisa.	56
Figura 13 - Agregados a) Brita 19mm b) Brita 38mm e c) Areia Natural.	57
Figura 14 – a) e b) Sílica Ativa utilizada na pesquisa.	58
Figura 15 - Ensaio de abrasão a) equipamento <i>Los Angeles</i> e b) esferas metálica e amostra de brita.....	62
Figura 16- Frações do agregado imersas na solução de sulfato de sódio.....	64
Figura 17- Erlenmeyers contendo amostra de areia imersa em hidróxido de sódio e solução padrão.	65
Figura 18- Indicação da medição dos grãos do agregado: a) comprimento; b) espessura.	66
Figura 19- Ensaio de RAA a) Tanques de imersão com solução de hidróxido de sódio e b) Dispositivo de medição do comprimento das barras de argamassa.....	68
Figura 20- Barras de argamassa imersas na solução de hidróxido de sódio.....	68
Figura 21 - Fluxograma do Método do Módulo de Finura para dosagem de concreto.	72
Figura 22- Etapas do ensaio de composição ideal dos agregados.	73
Figura 23- Moldagem dos corpos de prova.	77

Figura 24- a) e b) Consistência do concreto pelo abatimento do tronco de cone.....	78
Figura 25 - Determinação da massa específica do concreto no estado fresco.....	79
Figura 26- Sistema para medição do teor de ar incorporado no concreto.	80
Figura 27 – Ensaio de resistência à compressão em prensa universal.....	81
Figura 28- Aspecto da coloração da solução padrão e solução da amostra após 24 horas.....	88
Figura 29- Aspecto dos grãos após os ciclos de umedecimento e secagem.	91
Figura 30 - Aspecto dos concretos produzidos no estudo de dosagem: a)medição do abatimento; b) ausencia de exsudação;c) avaliação da coesão do concreto.	98

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1- Composição ideal do agregado graúdo utilizado.	74
Gráfico 2- Curva Granulométrica da areia natural.	87
Gráfico 3 - Curva granulométrica da brita 19 mm e brita 38 mm.	89
Gráfico 4 - Resultados das expansões dos corpos de prova compostos por areia natural e CPIV e areia natural combinada com CPIV (contendo 8% de sílica ativa).	92
Gráfico 5 - Resultados das expansões dos corpos de prova compostos por brita e CPIV e brita combinada com CPIV (contendo 8% de sílica ativa).	92
Gráfico 6 - Distribuição do tamanho de partículas da amostra de sílica ativa.	93
Gráfico 7- Relação a/c_{eq} em função do % areia.	95
Gráfico 8- Módulo de finura em função do % de areia.	96
Gráfico 9- Resistência à compressão em função da variação do teor de areia e da relação a/c_{eq} na mistura (traço 1:5).	99
Gráfico 10 - Resistência a compressão <i>versus</i> traços unitários <i>versus</i> relação a/c_{eq}	100
Gráfico 11 - Gráficos de dosagem obtidos do estudo de dosagem experimental (MMF).	103

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Barragens na Antiguidade.	20
Tabela 2 - Potências hidrelétricas brasileiras.	22
Tabela 3 - Expansão hidrelétrica entre 2015 e 2024.	23
Tabela 4- Evolução dos consumos de cimento no tempo.....	29
Tabela 5- Teores ideais para concretos com adições minerais.....	38
Tabela 6- Percentual ótimo de pozolana em função do tipo de cimento.....	39
Tabela 7- Características do cimento utilizado na pesquisa.	56
Tabela 8 - Granulometria requerida do material para ensaio.	67
Tabela 9 - Requisitos especificados para as classes de concreto em função da destinação.	69
Tabela 10 - Limites para o ar incorporado e abatimento no tronco de cone.	75
Tabela 11 - Características físicas da areia natural.....	86
Tabela 12 - Características físicas do agregado graúdo.	89
Tabela 13 - Composição química da sílica ativa.	94
Tabela 14- Determinação das porcentagens de areia ótimas para as relações 1:m.	97
Tabela 15- Composição e propriedades - concreto estado fresco e endurecido (traço intermediário).	101
Tabela 16- Composição e propriedades - concreto estado fresco e endurecido.....	102
Tabela 17 - Requisitos especificados para as classes de concreto em função da destinação.	104
Tabela 18 - Dados de composição para os concretos da Classe D.....	106

LISTA DE NOMENCLATURAS E ABREVIATURAS

ABCP	Associação de Concreto Portland
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	<i>American Concrete Institute</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CBDB	Comitê Brasileiro de Barragens
CCR	Concreto Compactado com Rolo
CCV	Concreto Massa Convencional
CPs	Corpos de prova
ICOLD	<i>International Commission on Large Dams</i>
MMF	Método do Módulo de Finura dos Agregados
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
NM	Norma Mercosul
PNSB	Política Nacional de Segurança de Barragens
RAA	Reação Álcali-Agregado
SIN	Sistema Interligado Nacional
SNISB	Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens
UHE	Usina Hidrelétrica

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	15
1.1	JUSTIFICATIVA	16
1.2	OBJETIVOS	19
1.2.1	Objetivo Geral	19
1.2.2	Objetivos específicos	19
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1	BREVE HISTÓRICO DE BARRAGENS E PERSPECTIVAS FUTURAS	20
2.2	BARRAGENS DE CONCRETO	25
2.3	CONCRETO MASSA	27
2.3.1	Definição.....	27
2.3.2	Ensaio das Propriedades Tecnológicas para Concreto Massa.....	32
2.4	ADIÇÕES MINERAIS UTILIZADAS EM CONCRETO	35
2.4.1	Sílica Ativa	40
2.4.2	Cinza Volante	42
2.4.3	Metacaulim	43
2.4.4	Princípio da ação das pozolanas no concreto	44
2.5	MÉTODOS DE DOSAGEM DE CONCRETO	45
2.5.1	Métodos de dosagem	46
2.5.2	Método de dosagem utilizado nesta pesquisa	48
2.5.2.1	<i>Método do Módulo de Finura.....</i>	48
3	PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	54
3.1	MATERIAIS UTILIZADOS.....	55
3.1.1	Cimento.....	55
3.1.2	Agregados	57
3.1.3	Água.....	57
3.1.4	Aditivo Químico	58
3.1.5	Sílica Ativa	58
3.2	MÉTODOS	59

3.2.1	Caracterização dos Agregados.....	59
3.2.1.1	<i>Análise Granulométrica.....</i>	59
3.2.1.2	<i>Determinação da massa específica e absorção.....</i>	59
3.2.1.3	<i>Determinação da massa unitária.....</i>	61
3.2.1.4	<i>Abrasão Los Angeles.....</i>	61
3.2.1.5	<i>Determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis.....</i>	63
3.2.1.6	<i>Sanidade ao ataque por sulfato de sódio.....</i>	64
3.2.1.7	<i>Determinação de impurezas orgânicas.....</i>	64
3.2.1.8	<i>Determinação do índice de forma.....</i>	65
3.2.1.9	<i>Análise da Reação Álcali-Agregado.....</i>	66
3.2.2	Caracterização da Sílica Ativa.....	68
3.3	ESTUDO DE DOSAGEM DO CONCRETO MASSA.....	69
3.3.1	Composição ideal dos agregados.....	73
3.3.2	Procedimento do estudo de dosagem.....	74
3.3.3	Preparação e moldagem dos corpos de prova.....	76
3.4	ENSAIOS DAS PROPRIEDADES TECNOLÓGICAS DO CONCRETO.....	77
3.4.1	Propriedades do concreto no estado fresco.....	78
3.4.1.1	<i>Ensaio de abatimento do tronco de cone (Slump Test).....</i>	78
3.4.1.2	<i>Determinação da massa específica do concreto.....</i>	79
3.4.1.3	<i>Determinação do teor de ar incorporado.....</i>	79
3.4.2	Propriedades do concreto no estado endurecido.....	80
3.4.2.1	<i>Ensaio de resistência à compressão axial.....</i>	80
3.4.3	Composição das dosagens.....	81
3.4.3.1	<i>Gráficos de dosagem.....</i>	83
3.4.3.2	<i>Composição dos concretos.....</i>	83
4	APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	86
4.1	CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS.....	86
4.1.1	Caracterização física do agregado miúdo.....	86
4.1.2	Caracterização física dos agregados graúdos.....	89
4.1.2.1	<i>Avaliação da Reação Álcali-Agregado (RAA).....</i>	91
4.2	CARACTERIZAÇÃO DA SÍLICA ATIVA.....	93
4.3	ESTUDO DE DOSAGEM DO CONCRETO PELO MMF.....	94
4.3.1	Determinação do teor ideal de areia e módulo de finura ideal.....	94

4.3.2	Determinação do módulo de finura ótimo e teor de areia ótimo	96
4.3.3	Propriedades no estado fresco	97
4.3.4	Propriedades no estado endurecido: resistência à compressão	98
4.3.5	Composição dos concretos	100
5	CONCLUSÕES	107
5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	108
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	109

1 INTRODUÇÃO

As barragens destacam-se como elementos fundamentais para que a população tenha acesso aos insumos básicos necessários, uma vez que a demanda por energia, água e outros serviços vêm aumentando em proporção ao crescimento da população. No entanto, apesar dos benefícios referente ao desenvolvimento econômico, por outro lado são estruturas que apresentam um risco potencial elevado, sendo assim necessário atender os requisitos de segurança, incluindo atividades de acompanhamento e observação, através de instrumentação, inspeção visual ou ensaios específicos.

Em virtude da grande importância destes empreendimentos hidráulicos, é evidente a continuidade dos estudos dos materiais e técnicas aplicadas na construção dos mesmos, buscando também soluções mais sustentáveis possíveis. Assim sendo, Carmo e Portella (2008) ressalta a necessidade de utilizar, em barragens de usinas hidrelétricas, concretos que atendam às especificações técnicas com a obtenção do menor custo e sem comprometimento da qualidade final. Neste intuito, diversas pesquisas experimentais com adições minerais nas dosagens de concreto para estas estruturas vêm sendo desenvolvidas, tais como escória de alto forno, cinza volante, metacaulim, sílica ativa, entre outras.

A necessidade de abastecimento de energia para toda a população brasileira assim como todos os riscos envolvendo os empreendimentos hidráulicos estimulou a necessidade de criação de uma lei de segurança de barragens para que fossem garantidas a manutenção e possível necessidade de contingência de crise ou acidente. Assim sendo foi criada em 2010 a Lei 12.334 que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) e cria o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB).

Neste cenário, a construção de grandes barragens no Brasil aponta uma grande evolução, nos últimos anos. Em virtude da construção destes empreendimentos envolverem uma característica peculiar referente ao grande volume de concreto necessário, verifica-se então a importância do cuidado com a dosagem de concreto nestas grandes obras, devido os problemas técnicos e econômicos envolvidos. Desta maneira, vale destacar a importância da qualidade do concreto aplicado em obras de barragens e de usinas hidrelétricas, o que acarreta na contribuição para o incremento da vida útil dessas obras. Na evolução do concreto para utilização em estruturas de grande porte surgiu o conceito de concreto massa, caracterizado pela exigência de medidas para controlar a geração de calor e a variação de volume decorrente, a fim de minimizar a sua fissuração (MEHTA, MONTEIRO, 1994).

O avanço em relação ao estudo dos métodos de dosagens, no intuito de realizar diversas avaliações e permitir que as misturas produzidas atendessem parâmetros específicos de seu tipo de aplicação, resistência e durabilidade, proporcionou o aprofundamento em referência ao conhecimento sobre o concreto massa e seus materiais constituintes. Esta tendência é estimulada pelo crescente uso de materiais alternativos, adições minerais, aditivos, e vários tipos de cimento, ocasionando assim, o desenvolvimento de estudos específicos para cada tipo de concreto.

Neste contexto, destaca-se a oportunidade de desenvolvimento de pesquisas referentes à utilização da sílica ativa como substituinte parcial do cimento na produção de concreto massa. Com base no exposto, a proposta deste trabalho é aprofundar nos estudos em concreto massivos aplicados em usinas hidrelétricas, com destaque para a dosagem da mistura utilizando o Método do Módulo de Finura dos Agregados constituintes, sendo empregada a sílica ativa como substituição parcial do cimento na composição dos concretos.

1.1 JUSTIFICATIVA

Gambale *et al.* (2015) enfatizam que em obras de Usinas Hidrelétricas existem vários tipos de estruturas típicas, como, por exemplo, o vertedouro, a viga munhão, laje da bacia de dissipação, entre outras, em que o volume utilizado para execução destas estruturas é considerável e possui características do concreto massa, onde as temperaturas geradas atingem valores elevados devido o fenômeno da hidratação do cimento.

Destaca-se a relevância do estudo do concreto massa, uma vez que esta técnica tem sido bastante aplicado no Brasil, principalmente em barragens. Em complementação a esta tendência, a preocupação em torno da segurança de barragens de concreto tem sido um assunto sempre atual e de importância crescente. Uma vez que, apesar da construção de barragens ser uma técnica utilizada desde os primórdios das civilizações, assim como a evolução deste processo no decorrer dos anos, ainda assim existem muitos problemas em construções de barragens, sobretudo em concreto.

Concretos especiais, como o concreto massa, em destaque neste trabalho, em função das características específicas, necessitam de um estudo de dosagem adequado, uma vez que permite a melhor utilização dos recursos empregados no processo de produção e o alcance dos parâmetros característicos de um determinado tipo de concreto, podendo ser estes a diminuição da porosidade e o aumento da resistência mecânica, por exemplo (DE LARRARD *et al.*, 2002 *apud* FARIAS, 2006).

Ao considerar uma das particularidades de estruturas de concreto massivos, referente à utilização de grandes volumes de concreto, em razão da liberação do calor de hidratação dos materiais cimentícios, uma medida comum para minimizar a fissuração do concreto nas primeiras idades é evitar uma exagerada elevação da temperatura na estrutura através de intervenções na composição do material. Com o intuito da minimização do uso de cimento, tem sido empregada nestas situações, a adoção de substituições, como por exemplo, a sílica ativa.

Neste cenário, a utilização de resíduos da fabricação do silício produzidos pela empresa Dow Corning Silício do Brasil, no caso a sílica ativa, apresenta potencial tecnológico de aplicação em materiais à base de cimento, pois de acordo com pesquisas realizadas por Metha e Monteiro (2014) a sílica ativa promove melhorias nas propriedades dos referidos materiais, principalmente resistências elevadas e baixa permeabilidade, devido ao efeito pozolânico que este material desencadeia na mistura.

Vale lembrar que as obras que utilizam concreto massa apresentam, normalmente, um elevado custo e podem causar grandes desastres em caso de ruptura. Desta maneira, verifica-se a necessidade da preocupação com estas estruturas desde a fase de planejamento, projeto e execução, ressaltando a grande importância do estudo dos materiais empregados bem como o proporcionamento e mistura destes materiais, caracterizando um controle tecnológico eficiente.

Neste sentido, considerando a magnitude de um projeto de uma usina hidrelétrica e a necessidade de uma quantidade elevada de materiais, tem-se neste caso a vantagem da utilização da sílica ativa, uma vez que se tem esse insumo em abundância, inserido no mercado regional, proporcionando benefícios para o consumo deste material. Segundo dados fornecidos pela empresa Dow Corning silício do Brasil a produção anual de sílica ativa é de aproximadamente 13.000 toneladas/ano, e o produto é vendido comercialmente em média por R\$650,00/tonelada.

Para exemplificação, se considerada uma obra de uma usina hidrelétrica estimando um volume de dois milhões de metros cúbicos ($2 \times 10^6 \text{ m}^3$) para aplicação nas estruturas constituintes do empreendimento. Em termos práticos, para o consumo de cimento por metro cúbico de concreto utilizado, se adotado 180 kg/m^3 , por exemplo, e considerando uma substituição de 8% de sílica em relação à massa de cimento, isso resultaria em um consumo de sílica ativa igual a 9 kg/m^3 de concreto, logo, o consumo de sílica então, seria bastante expressivo.

É importante enfatizar também que em virtude da vasta quantidade de rios e lagos inseridos em seu território, o Brasil se destaca por apresentar um parque gerador de energia elétrica constituído por um número considerável de usinas hidrelétricas, sendo estas de pequeno, médio e grande porte, as quais promovem a geração de energia através do potencial da água. Neste cenário, é importante destacar a previsão de construção de algumas barragens no cenário brasileiro, principalmente na região norte. Desta maneira, considerando o potencial hídrico da região Amazônica e as propostas de implantação de usinas hidrelétricas na região, percebe-se a importância desta pesquisa para a aplicação nestes futuros empreendimentos a serem implantados.

Propõe-se, portanto, desenvolver os estudos de uma temática que é importante e necessária no cotidiano de grandes obras procurando desencadear o interesse de outros pesquisadores na área. Embora sejam encontrados na literatura trabalhos referente à dosagem de concreto massa, muitas informações são restritas e pouco divulgadas no âmbito das pesquisas científicas. Referente à escolha do método de dosagem a ser empregado, no caso o Método do Módulo de Finura, justifica-se por este ser o mais aplicável à construção de barragens no Brasil por profissionais da área. Este método consiste basicamente em determinar um conjunto de misturas com diferentes módulos de finura, para então escolher a mistura que de o máximo de resistência e seja trabalhável de acordo com as especificações de projeto requeridas.

Sabendo-se da importância e da utilização do concreto massa nos dias atuais, procurou-se então, desenvolver uma pesquisa de interesse acadêmico e da indústria, enfatizando o caráter do mestrado, sendo este com foco profissional, com a abrangência dos estudos e aplicações futuras do concreto massa. O presente trabalho surge de modo a contribuir com a discussão acerca do método de dosagem pelo Método de Finura dos Agregados para construção de barragens, bem como a influência da substituição parcial do cimento pela sílica ativa nas propriedades do concreto.

O tema deste trabalho, portanto, traz a proposta de um estudo que envolve a linha de pesquisa referente à Segurança de barragens, especificamente em relação aos materiais empregados na construção de barragens priorizando a segurança destas estruturas.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 OBJETIVO GERAL

Realizar estudo de dosagem para definir traços de concreto massa aplicáveis em barragens de usinas hidrelétricas, com base no método do Módulo de Finura dos Agregados (MMF), tendo como substituição parcial ao cimento a sílica ativa produzida na região, oriunda da fabricação de silício metálico (empresa Dow Corning Silício do Brasil, município de Breu Branco-PA).

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para o alcance dos objetivos gerais pretende-se desenvolver os seguintes objetivos específicos:

Avaliar a existência de reatividade álcali-agregado (RAA) da brita e da areia utilizadas no presente estudo em combinação com CPIV (cimento mais utilizado na região de Tucuruí) e em relação ao CPIV com adição de 8% de sílica ativa.

Realizar a caracterização físico-química do cimento, dos agregados e da sílica ativa utilizados na produção dos traços do concreto massa.

Realizar estudo de dosagem experimental de concreto massa pelo Método do Módulo de Finura dos Agregados (MMF) com substituição parcial do cimento pela sílica ativa no teor de 8% em massa (teor usualmente utilizado em concretos massivos).

Elaborar tabela de composição de traços de concreto massa com base no método de MMF analisando as possibilidades de aplicações em concretos de usinas hidrelétricas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 BREVE HISTÓRICO DE BARRAGENS E PERSPECTIVAS FUTURAS

Desde o início da história da Humanidade, as barragens foram fundamentais ao desenvolvimento. A sua construção devia-se, sobretudo, à escassez de água no período seco e à conseqüente necessidade de armazenamento de água, feito em barragens executadas em bases empíricas. Algumas das barragens mais antigas de que se tem conhecimento situavam-se, por exemplo, no Egito, Médio Oriente e Índia (Comitê Brasileiro de Barragens - CBDB, 2011).

As primeiras barragens de terra foram construídas em 2000 a.C.; e a barragem de Sayamaike, uma das mais antigas do Japão, foi construída no início do século VII e, após várias modificações e um aumento de sua altura, continua em uso até hoje (*INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS - ICOLD*, 2008). Pode-se observar na Tabela 1 algumas barragens da pré-história e suas respectivas finalidades.

Tabela 1- Barragens na Antiguidade.

Ano	Local	Nome	Tipo	Finalidade
3600 A.C	Jordânia	Jawa	Gravidade	Abastecimento
2600 A.C	Egito	El-Kafara	Aterro	Controle de Cheias
700 A.C	Iraque	Kisiri	Gravidade	Irrigação
275 A.C	Sudão	Musawwarat	Aterro	Abastecimento

Fonte: Adaptado de MARTINS, 2016.

Mello (2011) destaca que a mais antiga barragem que se tem notícia em território brasileiro foi construída onde hoje é área urbana do Recife, PE, possivelmente no final do Século XVI, antes mesmo da invasão holandesa. Atualmente conhecida como açude Apipucos, aparece em um mapa holandês de 1577. Sabe-se que a estrutura da barragem original foi alargada e reforçada para permitir a construção de uma importante via de acesso ao centro do Recife.

Referente às primeiras barragens para produção de energia elétrica, Mello (2011) destaca que no final do século XIX começaram a serem implantadas pequenas usinas para suprimento de cargas modestas e localizadas, todas com barragens de dimensões discretas. A primeira usina, inicialmente denominada Parnaíba e depois Edgard de Souza, entrou em

operação em 1901, no rio Tietê, para suprimento da energia elétrica à cidade de São Paulo. Esta usina, quando inaugurada, tinha 2 MW instalados.

Os registros das primeiras barragens do Brasil são esparsos e sem divulgação, o que dificulta o retrospecto histórico dessas estruturas. Registros destacam que a primeira usina hidrelétrica instalada no país foi a de Ribeirão do Inferno, em Minas Gerais, em 1884 (Comitê Brasileiro de Grandes Barragens-CBDB, 1989).

Marques Filho e Isaia (2011) evidenciam que a utilização do concreto como material de construção de barragens de aproveitamentos hidráulicos ocorre a mais de 120 anos. Porém, vale ressaltar que, no período anterior a 1900, o concreto utilizado em barragens não era controlado. O primeiro controle tecnológico registrado foi feito pelos EUA na barragem de *Crystal Spring*, na Califórnia, concluída em 1890. Posteriormente, o controle do concreto e o conceito de concreto massa foi se aprimorando nas barragens *Elephant Butte*, *Arrowrock Dam* (1915), *Big Dalton Dam* (1920), *Theodore Roosevelt Dam* (ACI 207.1R, 1997).

O período correspondente de 1930 a 1970 houve um grande desenvolvimento na construção de barragens em concreto massa. Em 1930 foi organizado o ACI 207 que trata das informações e propriedades do concreto massa. A construção da *Hoover Dam* nos EUA nessa época contribuiu para a evolução, devido ao seu tamanho, exigiu uma análise mais minuciosa dos materiais e técnicas construtivas, além de terem sido instalados tubos de pós-resfriamento do concreto. O uso de material pozolânico pode ser associado à construção de *Big Dalton Dam* e *Bonneville Dam* -1938. Após 1970 foi desenvolvido o CCR e suas técnicas são aprimoradas até hoje (ACI 207.1R, 1997).

A partir dos anos 70 a construção de hidrelétricas no Brasil cresceu consideravelmente, e há ainda grande perspectiva de crescimento. Algumas ganham destaque no âmbito nacional, como é o caso de Itaipu, FURNAS, Xingó, Sobradinho, Paulo Afonso, Tucuruí, Belo Monte, Santo Antônio, Complexo Tapajós. A Figura 1 mostra a Usina Hidrelétrica de Tucuruí em operação.

Figura 1 – Usina Hidrelétrica de Tucuruí.

Fonte: Albuquerque, 2017.

O CBDB (2016) mostrou na Revista brasileira de Engenharia de Barragens, os maiores empreendimentos geradores de energia elétrica no Brasil em 2016, conforme demonstrado na Tabela 2.

Tabela 2 - Potências hidrelétricas brasileiras.

Posição da Hidrelétrica	1ª - Itaipu	2ª - Tucuruí	3ª - Jirau	4ª - Santo Antônio	5ª - Xingó
Geração Média Mensal em MWh	8.906,05	4.040,05	1.293,93	1.268,67	1.126,01

Fonte: CBDB, 2016.

Vale ressaltar que na Tabela 2 não está inserida a Usina Hidrelétrica de Belo Monte, a qual entrou em operação em abril de 2016, sendo considerada a maior usina genuinamente brasileira. Destaca-se que esta é uma barragem de gravidade sendo utilizado dentre outros tipos, concreto massa nas estruturas constituintes, em cuja construção estão previstos para serem utilizados, quando da sua conclusão, mais de 3 milhões de metros cúbicos de concreto (BANDEIRA *et al.*, 2017).

O Complexo Hidrelétrico de Belo Monte está sendo construído no rio Xingu, nos municípios de Altamira e Vitória do Xingu, no Estado do Pará. Menezes *et al.* (2017) ressaltam que, após a conclusão da construção, prevista para 2020, o sistema terá uma capacidade nominal instalada de 11.233,1 MW e será a quarta maior hidrelétrica do mundo

em capacidade instalada, com 24 unidades geradoras, sendo 6 do tipo Bulbo com 233,1 MW, no sítio Pimental e 18 unidades do tipo Francis com 11.000 MW, no sítio Belo Monte.

O Ministério de Minas e Energia divulgou em 2015 o plano de expansão de energia hidrelétrica no Brasil até 2024. Os projetos hidrelétricos que constam neste Plano somam 28.349 MW. Na Tabela 3 observa-se a perspectiva de construção/ampliação de Usinas Hidrelétricas (UHE) em todo o Brasil.

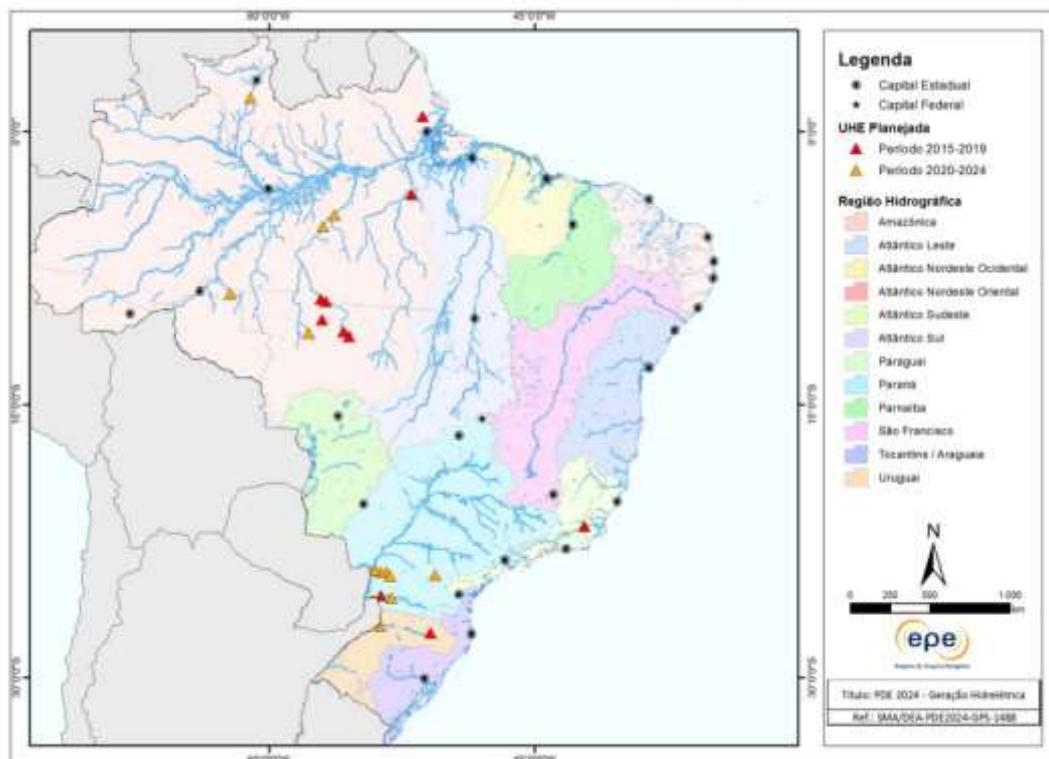
Tabela 3 - Expansão hidrelétrica entre 2015 e 2024.

Entrada em operação/ ano	Projeto	Rio	Potência (MW)	UF
2015	UHE Teles Pires	Teles Pires	1.820	PA
2016'	UHE Belo Monte	Xingu	11.233	PA
	UHE Colider	Teles Pires	300	MT
	UHE Salto Apiacás	Apiacás	45	MT
	UHE São Roque	Canoas	135	SC
2017	UHE Cachoeira Caldeirão	Araguari	219	AP
	UHE Baixo Iguaçu	Iguaçu	350	PR
2018	UHE São Manoel	Teles Pires	700	PA
	UHE Sinop	Teles Pires	400	MT
2019	UHE Itaocara I	Paraíba do Sul	150	RJ
2021	UHE São Luiz do Tapajós	Tapajós	8.040	PA
	UHE Tabajara	Jiparaná	350	RO
	UHE Apertados	Piquiri	139	PR
2022	UHE Foz Piquiri	Piquiri	93	PR
	UHE Telêmaco Borba	Tibagi	118	PR
	UHE Ercilândia	Piquiri	87	PR
2023	UHE Comissário	Piquiri	140	PR
	UHE Paranhos	Chopim	67	PR
	UHE Jatobá	Tapajós	2.338	PA
2024	UHE Castanheira	Arinos	192	MT
	UHE Bem Querer	Branco	708	RR
	UHE Itapiranga	Uruguai	725	SC/RS
		TOTAL	28349	

Fonte: Adaptado do Ministério de Minas e Energia, 2015.

Na Figura 2 observa-se a distribuição espacial das UHEs por região hidrográfica e período de entrada em operação. Nota-se, portanto, que a região Amazônica, onde se localiza grande parte do potencial hidrelétrico brasileiro ainda não explorado, é a que concentra a expansão hidrelétrica, tanto em número de projetos quanto, e principalmente, em termos de potência instalada, 93% (MME, 2015).

Figura 2- Localização das usinas hidrelétricas planejadas no PDE 2024.

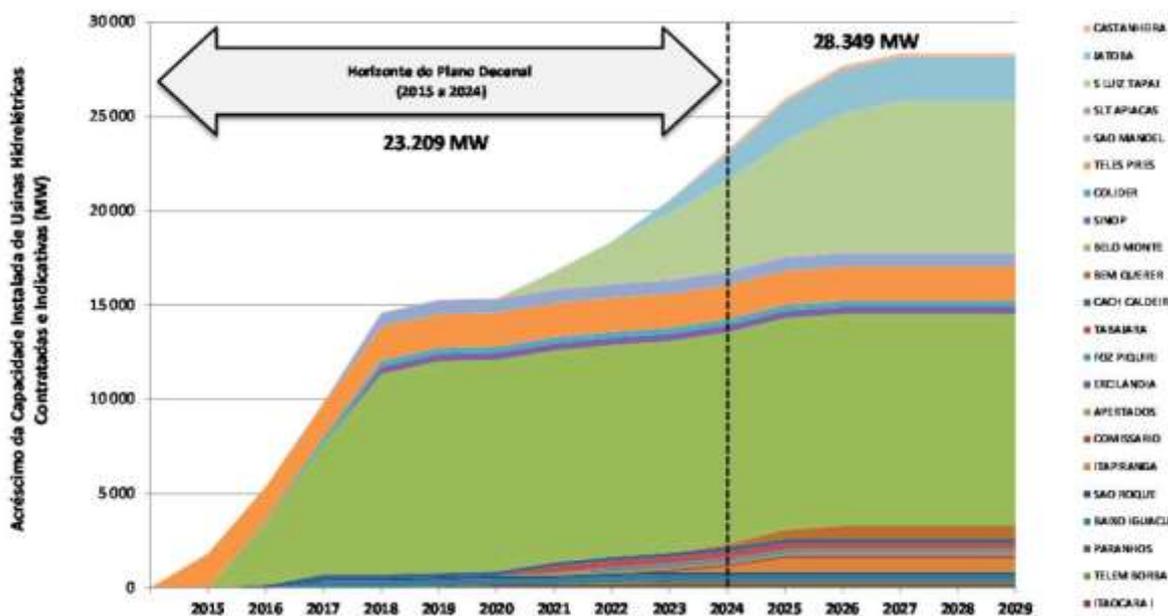


Fonte: Ministério de Minas e Energia, 2015.

Os projetos hidrelétricos que constam no Plano somam 28.349 MW. No entanto, devido ao longo período de motorização de alguns empreendimentos de grande porte, esta capacidade total deverá estar disponível para atendimento ao Sistema Interligado Nacional (SIN), apenas no ano de 2027. Como mostra a Figura 3, a viabilização desses empreendimentos acrescentará 23.209 MW até dezembro de 2024, cerca de 82% da sua capacidade instalada total.

Na Figura 3, é possível verificar também, que até 2030, a expansão das UHEs será ainda maior. Diante disso, confirma-se a necessidade de ampliação de estudos e conhecimentos no âmbito da construção de grandes barragens, que ainda tem muita capacidade de exploração.

Figura 3- Evolução da capacidade instalada de hidrelétrica.



Fonte: Ministério de Minas e Energia, 2015.

2.2 BARRAGENS DE CONCRETO

A Lei 12.334 (2010) define barragem como qualquer estrutura em um curso permanente ou temporário de água para fins de contenção ou acumulação de substâncias líquidas ou de misturas de líquidos e sólidos, compreendendo o barramento e as estruturas associadas. Esta pode ser destinada: a geração de energia, a irrigação, a navegação, ao abastecimento urbano e industrial, a piscicultura, a recreação, ao controle de cheias, a regularização de vazão, dentre outros objetivos. Neste sentido, Souza (2013) caracteriza barragem sendo toda a unidade que é composta por:

- a) corpo da barragem;
- b) bacia da represa;
- c) terrenos de fundação;
- d) estruturas anexas: vertedouros, tomada d'água, galerias, túneis, casa de força, descarga de fundo, etc;
- e) instrumentos de escutação: piezômetros, medidores de recalque, células de tensão total, etc;
- f) instalações de comunicação e manutenção.

Os principais tipos de barragens normalmente utilizados considerando o material utilizado são: barragem de terra, barragem de enrocamento e barragem de concreto. Para escolha do tipo de barragem a ser construída, diversos aspectos devem ser considerados para

que se opte pela configuração de barragem mais adequada para a região onde esta será inserida. Dentre estes fatores destaca-se a geologia e a sismicidade locais, a disponibilidade e custos dos materiais no local das obras assim como prazo de construção e regime hidrológico (SOUZA, 2013).

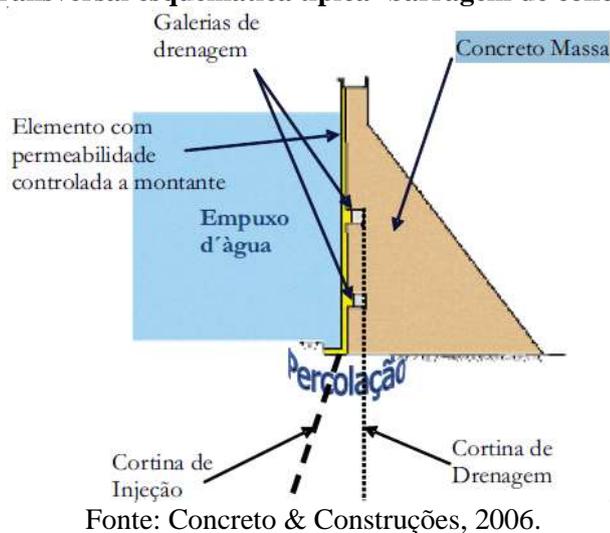
As barragens de concreto são estruturas projetadas com o objetivo primordial de contenção de grandes massas de água. O projeto civil das barragens de concreto é multidisciplinar, envolvendo diversas áreas: a hidrologia, a hidráulica, a mecânica das rochas e a engenharia de estruturas (GUTSTEIN, 2011).

Segundo Marques Filho e Isaia (2011) após as aplicações iniciais de concreto como material de construção nos empreendimentos hidráulicos, o conhecimento crescente levou aos estudos sobre a moagem dos cimentos, o controle dos produtos do clínquer, o efeito da petrografia e a granulometria dos agregados e sobre os processos de cura.

Marques e Carvalho (2013) ressaltam que as barragens de concreto adotam cinco tipos de soluções básicas: barragens de concreto a gravidade, a gravidade aliviada, arco-gravidade, em arco e em contrafortes. Em relação às barragens de gravidade de concreto, Gutstein (2011) destaca os dois sistemas construtivos atualmente adotados no Brasil, na execução destas obras, que são aqueles que empregam concreto massa convencional (CCV) e concreto compactado com rolo (CCR). Em ambos os processos construtivos é importante o controle de qualidade do concreto, para garantir que as especificações de projeto sejam atendidas.

Barros *et al.*, (2011) enfatizam que as barragens à gravidade têm sua estabilidade garantida principalmente pelos esforços de gravidade, ou seja, seu peso próprio. Desta maneira, o perfil de uma barragem à gravidade é essencialmente triangular, para assegurar a estabilidade e a fim de evitar a sobrecarga da barragem ou a sua fundação. A Figura 4 mostra uma seção transversal típica de uma barragem à gravidade.

Figura 4- Seção transversal esquemática típica- barragem de concreto de gravidade.



Referente ao Concreto Compactado com Rolo, segundo Donadon (2015), utilizava-se inicialmente para aterro, sub-base e construção de pavimentos de concreto, porém cada vez mais o CCR passou a ser usado para construir barragens gravidade. A técnica do CCR é uma evolução natural do concreto convencional, com peculiaridade de uso intensivo de equipamentos tipicamente empregados em obras de terra/enrocamento, buscando obter um máximo desempenho no quesito velocidade de lançamento. Associado a isso estão os custos baixos e os teores de cimento relativamente pequenos para diminuição dos efeitos das variações volumétricas de origem termogênica do concreto.

2.3 CONCRETO MASSA

2.3.1 Definição

O concreto massa é definido como um grande volume de concreto que apresenta dimensões grandes o suficiente para que algumas medidas sejam tomadas para reduzir a temperatura interna dessa estrutura, ou seja, para reduzir o gradiente térmico entre as partes interna e externa do concreto (American Concrete Institute – ACI 116R, 2005). Similarmente, Kuperman (2005) destaca a definição de concreto massa como aquele que, ao ser aplicado numa estrutura, requer a tomada de precauções que evitem fissurações derivadas de seu comportamento térmico.

Neville (2016) ressalta que, o termo “concreto massa” aplicado anteriormente somente a concretos de grandes dimensões, como barragens de gravidade, no entanto,

atualmente, os aspectos tecnológicos do concreto massa são relevantes para qualquer elemento de concreto com dimensões tais que o comportamento térmico possa resultar em fissuração, caso não sejam tomadas medidas apropriadas.

Assim como o concreto convencional, o concreto massa é composto de cimento, agregados e água, além de, em muitos casos, pozolana e outras adições. A dosagem tem como objetivo ou foco a seleção e a quantificação destes materiais de modo a proporcionar economia e redução do calor de hidratação, sem desconsiderar a obtenção de uma adequada trabalhabilidade, resistência, durabilidade e impermeabilidade que respeitem o propósito da estrutura na qual será aplicado. Por outro lado, Watanabe (2008) destaca alguns cuidados que precisam ser obedecidos quanto à utilização de concretos massivos referentes às variações ambientais, as alturas de camadas de concretagem, as velocidades e temperaturas de lançamento e o espaçamento das juntas de contração entre blocos de barragens.

No Brasil, as primeiras obras de concreto massa desenvolveram-se no início do século XX, quando várias barragens de concreto à gravidade foram construídas, destinadas tanto ao abastecimento de água quanto à geração de energia elétrica. Watanabe (2008) destaca as principais barragens construídas neste período: Lages (1907), Ingá (1916), Jaguari (1917), Ilha dos Pombos (1924), Alberto Torres (1924), Rasgão (1925), Cubatão (1926), Paraguaçu (1930), Pedro Beicht (1932), Gafanhoto (1946), Areal (1949), Macabu (1950) e Santa Cecília (1953).

Neste cenário, a evolução da tecnologia de concreto aplicada aos empreendimentos hidráulicos teve grande impulso a partir do final da década de 50, coincidindo com o esforço de industrialização do país. Um marco importante do desenvolvimento técnico do concreto massa foi a construção da Usina Hidrelétrica Ilha Solteira (MARQUES FILHO; ISAIA, 2011).

A evolução da tecnologia de concreto aplicada às barragens de concreto e estruturas complementares levou a diminuição contínua dos consumos de cimento, com o desenvolvimento de critérios de dosagem e de controle de qualidade efetivos, conforme apresentado na Tabela 4, resultando no conceito de concreto massa (MARQUES FILHO, 2011).

Tabela 4- Evolução dos consumos de cimento no tempo.

Data	Aproveitamento	Consumo de cimento (kg/m³)
1900-1930	Média de várias obras	350
1936	Norris Dam (EUA)	225
1940	Hiwasee Dam (EUA)	168
1954	Pine Flat Dam (EUA)	130
1970	Ilha Solteira (Brasil)	100
1978	Água Vermelha	90

Fonte: Marques Filho, 2011.

Destacam-se, portanto, características particulares do concreto massa expressos por FURNAS (1997) referente aos teores de cimento muito reduzidos como 100 kg/m³, assim como a utilização de agregados de grandes dimensões, sendo adotados D_{máx} de até 152 mm ou 100mm. Nos concretos com agregados de 19mm e 38 mm, o agregado total varia entre 60% e 73% do volume absoluto da mistura, e para os concretos com agregados de 76 mm e 152 mm tal volume cresce para 75% a 85%. Evidencia-se, portanto, a necessidade de realização dos ensaios de controle de qualidade desses materiais.

Muitas obras utilizam o concreto massa em suas estruturas. Devido estas estruturas apresentar grandes dimensões e grandes volumes de concreto, quanto a estas características, tornam-se preocupantes devido à probabilidade do surgimento de patologias, tais como fissurações e trincas. As estruturas com grande quantidade de concreto produzem uma elevação da temperatura interna do corpo, devido à liberação do calor de hidratação dos materiais cimentícios.

Segundo o International Commission on Large Dams (2009) o concreto massa difere do concreto estrutural na medida em que é colocado em seções de espessura onde o calor de hidratação dissipa lentamente e o gradiente térmico pode induzir aberturas no concreto.

Sabe-se que a reação da água com o cimento, que resulta na formação dos silicatos de cálcio hidratados (CSH) é exotérmica, ou seja, libera calor. Portanto, quando a temperatura do concreto se diferencia da temperatura na superfície do elemento estrutural a probabilidade de ocorrer uma fissura devido ao efeito térmico é muito grande. Isso ocorre porque conforme o concreto começa a esfriar e endurecer, ele passa por um processo natural de retração. Com isso criam-se condições para que surjam tensões de tração que, se forem inferiores à resistência do material, poderão provocar fissuras (THOMAZ, 2013).

Diante disso, nos concretos para barragem, são geralmente utilizadas composições com adições pozolânicas, de maneira a reduzir o calor de hidratação. As barragens são projetadas recorrendo a definições geométricas que permitam a minimização das tensões de tração, uma vez que a resistência do concreto à tração é muito reduzida.

As obras de concreto massa são muito importantes, onerosas e conseqüentemente despertam um interesse com relação a segurança, eficácia e eficiência estrutural. Dentre estas obras, tem-se as barragens de gravidade, fundações, pontes, entre outras. A Figura 5 mostra uma vista geral da barragem de Itaipu, construída em parte em concreto massa. Para construção da barragem de Itaipu foram consumidos 12,3 milhões de metros cúbicos de concreto (ITAIPU, 2017).

Figura 5 - a) e b) Usina de Itaipu.



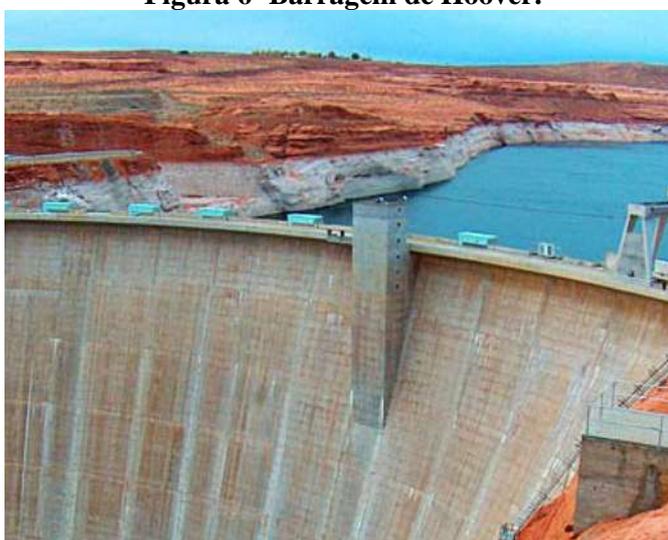
Fonte: Albuquerque, 2017.

Em virtude da característica peculiar do concreto massa, referente ao calor de hidratação, usualmente, o controle das variações volumétricas pode ser feito através do controle da temperatura de lançamento, cura com pós-refrigeração, dosagens adequadas, limitação da altura das camadas e de seus intervalos de lançamento, e pelo dimensionamento de juntas de contração, que são complementadas por dispositivos de vedação e quando necessário chavetas ou almofadas (MARQUES FILHO, 2005).

Neste sentido, vale ressaltar a existência de duas práticas de construção usadas no controle no controle do aumento da temperatura em estruturas de concreto massa: a pré-refrigeração ou pré-resfriamento e a pós-refrigeração ou pós-resfriamento. Em relação ao pós-resfriamento, a principal técnica é a circulação de água fria através de tubos de aço com paredes finas embutidos previamente no concreto, tipicamente os tubos tem 25 mm de diâmetro e 1,5 mm de espessura, o espaçamento entre os tubos e as espessuras das camadas variam para limitar a temperatura máxima a um nível projetado (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Destaca-se que o primeiro maior uso da pós-refrigeração do concreto em obra foi na construção da barragem de Hoover, nos anos de 1930. A pós-refrigeração teve como objetivo contrair os pilares de concreto que compunham a barragem a um volume estável, além de controlar o aumento de temperatura. O resfriamento foi conseguido com a circulação de água fria em tubos de aço com paredes finas mergulhados no concreto. A barragem de Hoover (1935), nos Estados Unidos (**Figura 6**), possui 2,4 milhões de metros cúbicos de concreto. A mesma foi inaugurada na era das Barragens e utilizou cimento Portland ASTM Tipo IV, de baixo calor de hidratação com teor de cimento de 233 kg/m^3 (WATANABE, 2008).

Figura 6- Barragem de Hoover.



Fonte: Watanabe, 2008.

Watanabe (2008) destaca ainda que a técnica referente à pré-refrigeração consiste na refrigeração dos agregados graúdos, uso de água gelada e gelo na fabricação do concreto. Caso necessário, pode-se ainda utilizar o resfriamento do concreto pronto por meio de nitrogênio líquido. De modo geral, quanto mais baixa a temperatura do concreto ao passar da fase plástica para a fase elástica, menor a tendência de fissuração. Um dos principais benefícios da pré-refrigeração do concreto massa é a possibilidade de redução de cerca de 0,3% no consumo de cimento para cada grau centígrado de redução da temperatura de lançamento do concreto.

Quanto ao primeiro uso de pré-refrigeração dos materiais do concreto para reduzir a temperatura do concreto massa, o mesmo foi realizado durante a construção da barragem de Norfolk, na década de 40. Uma parte da água de amassamento sob a forma de gelo foi introduzida no concreto atingindo a temperatura de aproximadamente 6°C no estado fresco.

Mais tarde, combinações de gelo picado, água de amassamento gelada e agregados resfriados foram utilizados na construção de diversas barragens do tipo gravidade (60 a 150 m de altura), para obter temperaturas de lançamento da ordem de 4,5°C. No Brasil, a prática de pré-refrigeração foi utilizada nas Usinas de Ilha Solteira (7°C), Água Vermelha (7°C), Capivara (10°C), São Simão (15°C), Itaipu (7°C), Tucuruí (12°C), Porto Primavera (11°C), Lajeado (18°C), Peixe Angical (16°C), entre outras (WATANABE, 2008).

Diante do exposto, percebe-se que são imprescindíveis os cuidados a serem adotados na utilização de concreto massa, para que o mesmo apresente a trabalhabilidade e a resistência exigida, buscando diminuir a geração de calor de hidratação para evitar fissurações futuras.

Destaca-se também que, apesar da ampla experiência na construção de barragens, no Brasil não se tem uma norma que regule a construção de barragens de concreto ou uma norma específica para concreto massa. Dessa maneira, as construções baseiam-se em experiências de outras construções de barragens, estudos acadêmicos, normas de outros países ou avaliação por empresas.

Neste âmbito, a empresa de FURNAS também é referência no país em relação a esses estudos, através de ensaios laboratoriais e de campo e do vasto conhecimento de sua equipe. Porém, há ainda a necessidade de mais pesquisas na área, de forma que futuramente se possa obter uma norma para subsidiar os profissionais e pesquisadores da área.

2.3.2 Ensaios das propriedades tecnológicas para concreto massa

A construção de Usinas Hidrelétricas e barragens demandam cuidados especiais com a durabilidade. Essas estruturas complexas requerem exigências específicas quando se trata das propriedades do concreto: alta trabalhabilidade, baixo consumo de cimento, controle rigoroso do tempo de trabalhabilidade e domínio do início e fim de pega, para possibilitar maior eficiência e produtividade na utilização de fôrmas deslizantes, são alguns exemplos (MC BAUCHEMIE, 2013).

Os ensaios necessários para avaliação das propriedades do concreto massa são os mesmos recomendados aos concretos convencionais, tendo ainda que realizar a verificação no comportamento destes materiais quanto a possibilidade de expansões advindas de agregados reativos, bem como o comportamento em relação a elevação de temperaturas.

Desta maneira, visando uma aproximação com os procedimentos de campo, sabe-se que todo início de concretagem em usinas hidrelétricas é precedido por estudos de caracterização de materiais constituintes e de concretos. Tendo como exigência para os

agregados escolhidos para o estudo de dosagens como fase inicial deste processo, a caracterização integral, através dos seguintes ensaios: massa específica e absorção; granulometria; sanidade ao ataque por sulfato de sódio; reatividade com os álcalis; abrasão *Los Angeles*; teor de argila; determinação de impurezas orgânicas e índice de forma (ANDRADE, 1981).

Quando da aplicação de agregados em concretos massivos, deve-se verificar a possibilidade de ocorrência das chamadas RAA (reação álcali-agregado), ou seja, a possível reação dos agregados com os álcalis presentes nos cimentos, o que promove a expansão do concreto e perda de vida útil dos elementos.

Segundo a norma ABNT NBR 15577-1:2008 a reação álcali-agregado (RAA) é considerada uma reação química entre alguns constituintes presentes em certo tipos de agregados e componentes alcalinos que estão dissolvidos na solução dos poros do concreto. Sua ocorrência está condicionada à presença simultânea de três fatores: agregado potencialmente reativo, umidade e álcalis.

Pan *et al.* (2012) destaca a definição de RAA sendo uma reação química originada a partir da junção dos álcalis do cimento e certos tipos de minerais reativos presentes nos agregados. Enfatizando que, essa reação pode ou não resultar em um gel expansivo, o qual ao se dispor nos vazios do concreto e na superfície do agregado em contato com a pasta de cimento pode resultar em fissuras generalizadas e desta forma comprometer a qualidade da estrutura.

A norma ABNT NBR 15577-1:2008 define três importantes tipos de reação álcali-agregado: reação álcali-sílica, reação álcali-silicato e reação álcali-carbonato. Dentre os tipos existentes de RAA, a mais ocorrente no Brasil é a reação álcali-silicato, que acontece entre os álcalis disponíveis na solução dos poros do concreto e alguns tipos de silicatos presentes em certas rochas (SILVA E KUPERMAN, 2008). Quando existe potencial para a reatividade, são testadas as substituições parciais do cimento por material pozolânico. Normalmente, há atenuação da RAA com esta substituição.

Alguns autores afirmam que a reação álcali-agregado (RAA) é um dos fenômenos patológicos mais importantes que interferem na durabilidade do concreto de estruturas hidráulicas. Desta maneira, incluem-se as estruturas em concreto de uma barragem, as quais estão submetidas a ambientes consideravelmente agressivos, visto que a maioria destas estruturas irá desempenhar a sua função em condições submersas.

Krivenko *et al.* (2013) destacam que as primeiras observações de reatividade dos álcalis contidos em alguns constituintes minerais remontam a 1916 quando um geólogo

chamado E.A. Stephenson informou sobre uma reação entre feldspato e carbonato de sódio que resultou na formação de um gel. A degradação do concreto como resultado dessa reação entre os álcalis contidos no cimento e algumas rochas moídas foi observada pela primeira vez nos EUA. Em 1922, ocorreu uma deterioração semelhante na Estação Hidrelétrica New River (Virginia, EUA) 10 anos depois de ter sido erguida.

Neste contexto, Hasparyk *et al.* (2009) ressaltam que, apesar desta reação ter sido descoberta há mais de 60 anos, ainda há grande dificuldade em controlar o efeito deletério deste fenômeno nas estruturas de concreto já existente. Sanchez (2008) destaca a influencia da reação nas propriedades do concreto, sendo que as expansões provocadas pela RAA podem comprometer a estrutura seriamente, tanto do ponto de vista de estabilidade (ELU), quanto de utilização e durabilidade (ELS). Tendo também uma significativa perda em termos de módulo de elasticidade.

Em relação à elevação da temperatura, Coelho (2016) resalta que, devido à baixa condutividade térmica do concreto, grandes volumes de concreto funcionarão como um corpo adiabático, ou seja, com dificuldade de dissipação do calor. Portanto, para as estruturas de grandes volumes de concreto são desenvolvidos estudos de comportamento térmico-tensional, com o objetivo de evitar a ocorrência de fissuras devido à retração de volume quando o concreto inicia o resfriamento, tendendo a equilibrar sua temperatura com a temperatura ambiente.

Neste sentido, o estudo da evolução da temperatura em estruturas massivas de concreto, decorrente do calor liberado pela reação exotérmica da hidratação do cimento, só é possível através do conhecimento da elevação adiabática da temperatura do concreto. Esse calor, embora possa ser medido por ensaios com o próprio cimento na pasta pura ou em argamassa, só pode ser conhecido com exatidão através da curva de elevação adiabática da temperatura do concreto, medida em um calorímetro adiabático, determinado pela ABNT NBR 12819:1993.

Vários estudos são desenvolvidos com o objetivo de estudar a elevação da temperatura do concreto massa. Neste âmbito, Gambale *et al.*, (2009) afirmaram que o efeito da temperatura interna é mais controlável, uma vez que depende quase exclusivamente da definição do traço de concreto e condições de lançamento *in loco*. Isso facilita a predição do efeito dando maior confiabilidade, apesar de que esse efeito pode ocorrer em conjunto com o efeito externo.

Na busca em minimizar o risco do surgimento de fissuras de origem térmica, Albuquerque (2009), introduziu borracha de pneu no concreto massa em busca de melhores

propriedades termomecânicas do concreto. Tydlitát *et al* (2014) observaram que quanto maior a relação a/c, maior o calor de hidratação, o que pode ser explicado devido a maior presença de água hidratar mais rapidamente os compostos de cimento, liberando maior quantidade de calor.

FURNAS (1997) ressalta que ao se iniciar o estudo de dosagens há que se ter em mente que o concreto a ser dosado deverá estar em conformidade com os requisitos especificados para o projeto em estudo. Geralmente, as grandes obras incorporam os seguintes parâmetros para o concreto: resistência; dimensão máxima característica do agregado graúdo ($D_{máx}$); relação a/c; consistência e ar incorporado. Desta maneira verifica-se a necessidade de um adequado estudo das propriedades tecnológicas em concreto massa. Em resumo têm-se apresentados no Quadro 1 os ensaios recomendados a serem executados.

Quadro 1 – Ensaios tecnológicos para concreto de barragens.

Caracterização dos Agregados	Análise Granulométrica
	Determinação da absorção
	Determinação do Teor de Argila e materiais friáveis
	Ensaio de Abrasão
	Avaliação da durabilidade dos agregados
	Determinação da massa específica e massa unitária
	Determinação do Índice de forma
	Ensaio de RAA
Propriedades Tecnológicas do Concreto	Ensaio de consistência
	Ensaio de massa específica e teor de ar incorporado
	Resistência a Compressão
	Módulo de Elasticidade
	Resistência à tração
	Elevação Adiabática
	Durabilidade (Permeabilidade)

Fonte: Próprio Autor.

2.4 ADIÇÕES MINERAIS UTILIZADAS EM CONCRETO

As adições minerais são materiais inorgânicos, finamente divididos, de natureza sílico aluminosa que ao serem adicionados ao concreto promovem melhorias no desempenho desse material no que tange suas propriedades mecânicas e durabilidade (LOTHIA; JOSHI,

1996 *apud* SILVA, 2015). Estes materiais são utilizados de duas formas geralmente: em substituição de parte do cimento; ou como adição em diferentes percentuais em relação à massa do cimento.

São utilizados em grandes quantidades com a finalidade de reduzir custos, bem como melhorar as propriedades do concreto no estado fresco e endurecido como sua trabalhabilidade, resistência mecânica, à fissuração térmica, à expansão álcali-agregado e ao ataque por sulfatos (GOMES; BARROS, 2009).

Segundo Carmo e Portella (2008) as adições minerais podem ser classificadas em função da sua composição química e mineralógica, em:

- a) **Escória granulada de alto-forno:** pertencente ao grupo dos silicatos vítreos contendo, principalmente, cálcio, magnésio, alumínio e sílica, com tamanhos médios de partículas menores do que 45 μm e finura Blaine de 500 m^2/kg ;
- b) **Cimentante e pozolânico** ou cinzas volantes, o qual contém alto teor de óxido de cálcio ($\text{CaO} > 10\%$); 10% a 15% da distribuição média do tamanho de partículas maior do que 45 μm e finura *Blaine* compreendida entre 300 m^2/kg e 400 m^2/kg . É constituída, na sua maior parte, por silicatos vítreos contendo, principalmente, cálcio, magnésio, alumínio e álcalis. A pequena quantidade de matéria cristalina presente consiste, geralmente, de quartzo e aluminatos de cálcio do tipo $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ ou C_3A . Podem estar presentes cal livre (CaO) e periclásio (MgO);
- c) **Pozolanas comuns**, normalmente, constituídas por cinzas volantes de baixo teor de cálcio ($\text{CaO} < 10\%$) e, por materiais naturais, com teores entre 15% e 30% de partículas com diâmetro médio $>45 \mu\text{m}$ e finura *Blaine* entre 250 m^2/kg e 350 m^2/kg . São, também, silicatos vítreos de alumínio, ferro e álcalis. A pequena quantidade de matéria cristalina presente consiste, geralmente, de quartzo, mulita, silimanita, hematita e magnetita. A maior parte das partículas são esferas sólidas com textura rugosa e diâmetro médio da ordem de 20 μm ;
- d) **Altamente pozolânicas**, tendo como representantes atuais: (a) sílica ativa, na forma amorfa e com diâmetro médio de partículas entre 0,1 μm e 5,5 μm ; (b) cinza de casca de arroz produzida por combustão controlada, com diâmetro médio de partículas da ordem de 1,5 μm e superfície específica de 16.800 m^2/kg .

De acordo com a ABNT NBR 12653:2014 tem-se a definição de pozolana como todo material silicoso ou sílico-aluminoso, que apresenta poder aglomerante quando na presença de umidade em temperaturas próximas à ambiente, reagindo quimicamente com o hidróxido de cálcio produzido na hidratação do cimento.

No Brasil, o primeiro registro de utilização de pozolana foi durante a construção de barragens, onde foram utilizadas cinzas volantes provenientes das termelétricas de Charqueadas e Candiota, localizadas no estado do Rio Grande do Sul (PRISZKULNIK, 1981 *apud* COSTA, 2015).

Considerando a possibilidade de obtenção de menores consumos de cimento faz com que a adoção de pozolanas seja extremamente vantajosa em casos onde haja a utilização de estruturas maciças de concreto como, por exemplo, em barragens.

Alguns estudos em âmbito internacional vêm sendo pesquisados em relação a utilização de adições minerais em concreto massa. Alhozaimy *et al.* (2015) verificaram a influência de diferentes escórias de rochas pulverizadas sobre a redução do calor de hidratação, e observaram que foram tão eficazes quanto as cinzas volantes e argilas calcinadas na redução do calor de hidratação e da temperatura de pico. Han *et al.* (2014) analisaram o calor de hidratação para o concreto com e sem adições minerais. O estudo mostrou que o concreto sem adições apresentou o maior calor de hidratação.

Cordeiro *et al.* (2007) simularam a construção de uma barragem de gravidade utilizando concretos feitos de cimento puro e cimento misturado com dois resíduos agroindustriais: cinzas de bagaço de cana-de-açúcar e cinzas de casca de arroz. Os resultados indicam a redução térmica do concreto e a redução das emissões de CO₂ na atmosfera causadas pela produção de cimento, já que há redução deste.

Neste sentido, considerando os diversos fatores (ecológicos, econômicos e técnicos), atualmente procura-se aumentar o consumo de adições minerais no concreto, tendo como principal fonte, de acordo com MEHTA e RAMACHANDRAN (1984), pozolanas provenientes de resíduos industriais, como a sílica ativa oriunda da indústria metalúrgica, a cinza volante e escória de alto forno, subproduto das usinas termoelétricas e as agrícolas, como a cinza de casca de arroz.

Sendo que a indústria metalúrgica é historicamente um setor que produz volumes consideráveis de resíduos sólidos inerentes aos seus processos de fabricação e, em termos de potencial poluidor é uma fonte bastante representativa como causadora de impacto ambiental. Mohammed *et al.* (2012) consideram os benefícios da utilizações destes subprodutos industriais, em caráter tecnológico, considerando a melhoria das propriedades do concreto convencional. Assim como no aspecto ambiental, na busca pela redução da quantidade de aglomerantes hidráulicos utilizados, proporcionando uma destinação final adequada para estes subprodutos.

Em relação à utilização de adições minerais, a prática brasileira de construção de barragens admite a substituição parcial de cimento por material pozolânico, adicionado diretamente à betoneira da central de concretagem. Porém, esse procedimento somente é tecnicamente viável quando há controle rigoroso dos materiais utilizados e da mistura dos mesmos, caso contrário, a qualidade do produto final pode ficar comprometida (KUPERMAN, 2005).

A proporção para a substituição do cimento por adições varia conforme o tipo de adição a ser adotada. Furquim (2006) destaca que os experimentos realizados diversos pesquisadores indicam os valores mais usados para cada adição, conforme apresentado na Tabela 5.

Tabela 5- Teores ideais para concretos com adições minerais.

Adição Mineral	Teor Ideal (%)
Sílica ativa	5 a 20
Escória de Alto-Forno	55 a 70
Cinzas Volantes	25 a 60
Cinzas de Casca de Arroz	15 a 50
Fíller Calcário	10 a 50

Fonte: Adaptado de Hoppe Filho, 2002 *apud* Furquim, 2006.

Rocha (2017) destaca também que é imprescindível considerar o tipo de cimento quando se estiver utilizando pozolana na formulação do concreto. Sendo o cimento utilizado nesta pesquisa CPIV, este é caracterizado pozolânico, com 15% a 50% de pozolana, 0% a 5% de fíler calcário. Em relação ao percentual ideal em função do tipo de pozolana para cada tipo de cimento e finalidade, considerando que quanto mais pozolana o cimento já tiver, menor poderá ser o percentual de adição para se conseguir alcançar os parâmetros desejados visando prolongar ao máximo a vida-útil da estrutura.

Neste aspecto, Rocha (2017) considera os teores ótimos mostrados na Tabela 6. Destacando que estes percentuais considerados ótimos, os quais o máximo de desempenho (durabilidade e resistência mecânica) aos 28 dias de idade, em traços de concreto típicos do mercado brasileiro; o percentual ótimo dependerá também de variáveis tais como os tipos de aditivos plastificantes, agregados e do fabricante de cimento, bem como condições ambientais, plasticidade e forma de lançamento do concreto, podendo variar para mais ou para menos em relação às faixas indicadas na tabela.

Tabela 6- Percentual ótimo de pozolana em função do tipo de cimento.

TIPO	CP I, CP II F, CP V ARI, CP B	CP II E, CP II Z, CP V ARI RS	CP III	CP IV
Metacaulim	3% a 15%	3% a 12%	4% a 7%	4% a 7%
Sílica Ativa	3% a 10%	3% a 10%	4% a 7%	4% a 7%
Cinza Volante	15% a 30%	10% a 20%	N. A.	N. A.
Argila Calcinada	15% a 40%	10% a 20%	N. A.	N. A.
Escória De Alto Forno	20% a 50%	15% a 30%	N. A.	N. A.

N.A. => Não Aconselhável, pelo fato do cimento já conter grande quantidade de pozolana na sua composição.

Fonte: Rocha, 2017.

Carmo e Portella (2008) realizaram o estudo comparativo do desempenho mecânico da sílica ativa e do metacaulim como adições químicas minerais em estruturas de concreto. Neste trabalho os autores adotaram 8% em peso de metacaulim e de sílica ativa em relação à massa de cimento. Sendo observados que esta proporção foi suficiente para inibir as reações álcali- agregado do concreto. Observaram também que ambas as adições proporcionou ganhos em termos de resistência e de custo nas primeiras idades (90 dias).

Especificamente em relação ao emprego em barragens, Bandeira *et al.* (2017) afirmam que, na fase de construção da UHE de Belo Monte, fez-se a reposição parcial em teores de 8 % a 10% de cimento por sílica ativa, que proporciona um aumento de resistência de aproximadamente 25%, alcançando os 40 MPa especificados para serem atingidos aos 28 dias de idade.

De acordo com Bandeira *et al.* (2017) após a constatação do potencial reativo, verificado através dos ensaios de reatividade álcali-agregado, foi especificada, então, a obrigatoriedade de reposição parcial do cimento por material pozolânico no canteiro para inibir reações expansivas. Os teores utilizados foram definidos por meio de ensaios laboratoriais. Esta solução também contribuiu para a redução da geração de calor durante a fase de hidratação do aglomerante, reduzindo a probabilidade de fissurações de origem térmica.

Rocha (2017) também destaca algumas obras de construção de barragens que foram utilizadas pozolana na composição dos concretos. Na Usina Hidrelétrica Teles Pires, localizada em Alta Floresta (MT), com período de construção de 2012 até o presente momento teve-se a adoção de metacaulim com um percentual médio de 7% sobre a quantidade de cimento, tendo como principais motivos de uso a mitigação do RAA e a redução do calor de hidratação do concreto. A Usina Hidrelétrica Pinalito, construída entre 2004 a 2008 na República Dominicana, foi utilizado metacaulim com percentual médio de 7,5% sobre a quantidade de cimento, com objetivo de inibir a reação álcali-agregado bem como a redução da permeabilidade e o aumento da resistência à erosão.

2.4.1 Sílica Ativa

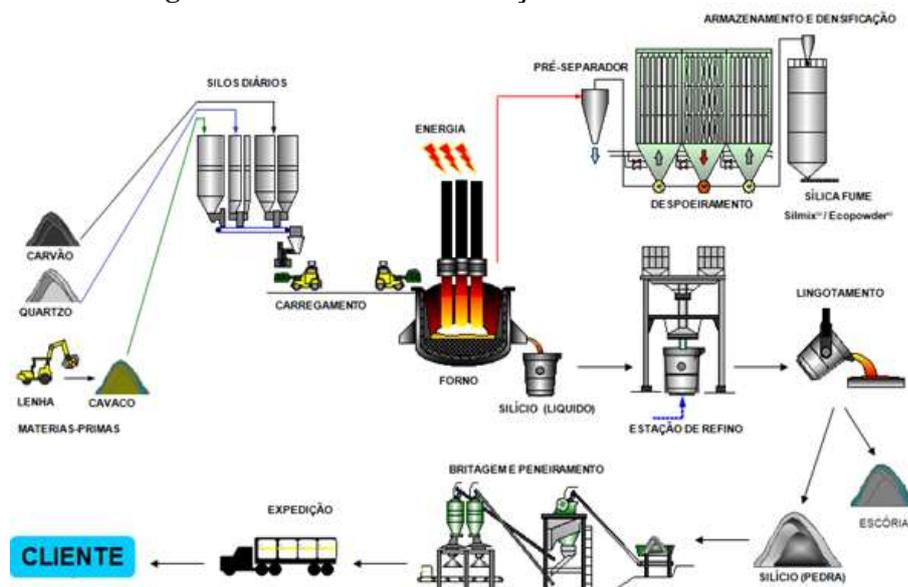
Sílica ativa, microssílica, fumo de sílica condensada, sílica volatizada ou simplesmente fumo de sílica são alguns nomes dados a esta adição mineral, sendo sílica ativa o mais usual no meio técnico. A sílica ativa é um produto resultante do processo de fabricação de ferrosilício ou de silício metálico.

A fabricação do silício metálico é realizada por meio da fusão redutora de quartzo (minério de silício), carvão vegetal e cavaco (madeira) em fornos elétricos de redução do tipo arco submerso. A planta operante de silício metálico no Pará é a Dow Corning Silício do Brasil, que passou a ser do grupo Dow Corning Corporation em 2009. Antes em 1988, era da Camargo Corrêa e posteriormente, em 2007 da Globe Specialty Metais. De acordo com dados fornecidos pela empresa, a produção anual de silício metálico é de aproximadamente 40.000 toneladas, possuindo o sistema de captação de sílica ativa que apresenta como nomes comerciais Silmix® e EcoPowder® com uma produção de 13.000 t/ano.

Ao examinar o processo de produção do silício metálico da empresa Dow Corning Silício do Brasil (Figura 7) observa-se que após a etapa de queima das matérias primas (carvão, quartzo e cavaco), partículas grosseiras compostas por um material de cor cinza, de

origem vegetal e mineral são emitidas e retidas em um *ciclone pré-separador*. Em seguida, este material passa por um sistema denominado de *despoeiramento*, constituído por filtros de manga, dando origem ao resíduo, *silica fume* (também conhecido por sílica ativa).

Figura 7 - Processo de fabricação do silício metálico.



Fonte: Dow Corning Silício do Brasil, 2015.

Esse material consiste de partículas de sílica amorfa esféricas e finamente divididas com diâmetro médio de 0.1 μm . A atuação química deste material ocorre pela reação pozolânica. De acordo com Almeida *et al.* (2006) a sílica ativa consiste num material altamente pozolânico, capaz de reagir com o hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) para a formação de silicato de cálcio hidratado (C-SH), responsável pela resistência da pasta de cimento hidratado.

A sílica ativa é caracterizada como umas das adições minerais de maior reatividade, graças ao tamanho extremamente pequeno de suas partículas e à sua natureza amorfa. Suas partículas são esféricas, de diâmetro cem vezes menor que o do cimento. Por terem uma área específica elevada e granulometria mais fina que os cimentos, as partículas da sílica ativa densificam a zona de transição por ação física e química, gerando uma microestrutura mais densa e homogênea, com reduzido volume de vazios (FONSECA, 2010).

É importante destacar que existem diferentes tipos de sílica ativa com relação à composição química, cor, distribuição granulométrica, entre outras características. Esta variação existe em função do tipo de liga produzida, tipo de forno, composição química e dosagem das matérias-primas. A ANBT NBR 13956:2012 classifica a sílica ativa em três

tipos: sílica ativa não densificada ou no estado natural, sílica ativa densificada e sílica ativa na forma de dispersão aquosa.

A sílica ativa no estado natural é proveniente diretamente do filtro do coletor. Sua massa específica aparente no estado solto deve variar entre 150 kg/m³ a 350 kg/m³. A sílica ativa densificada é submetida a beneficiamento por aglomeração das partículas. Sua massa específica no estado solto deve ser superior a 350 kg/m³ a 700kg/m³. A sílica ativa na forma de dispersão aquosa é um material com teor de sólidos na dispersão aquosa de 50% em massa.

A utilização de sílica ativa no concreto foi adotado em algumas obras de barragens construídas no Brasil nos últimos anos, em virtude das melhorias propiciadas ao concreto pela adição deste material, especialmente no que se refere à resistência, compacidade e melhoria das características da interface pasta-agregado (PIMENTA, 2007).

De acordo com Pimenta *et al.*, (2007) o emprego da sílica ativa na composição do concreto possibilita o aumento considerável da sua resistência à penetração de agentes agressivos. Em termos relativos, a influência da sílica ativa na permeabilidade do concreto é muito maior do que na sua resistência à compressão.

2.4.2 Cinza Volante

A ABNT NBR 12653:2014 caracteriza as cinzas volantes como materiais finamente divididos oriundos da combustão de carvão pulverizado ou granulado que apresentam características pozolânicas.

A combustão do carvão pulverizado, geralmente para a produção de energia elétrica, ocorre em altas temperaturas, entre 1.200 °C e 1.600 °C, num ambiente gasoso oxidante, sendo o tempo de permanência das partículas em chama oxidante, em média, de dois segundos, condição suficiente para a fusão total ou parcial da matéria mineral. Nesse processo, formam-se dois tipos de cinzas: cinza pesada e cinza volante (SILVA *et al.*, 1999). As cinzas volantes são as cinzas de granulometria mais fina, arrastadas pelos gases de combustão das fornalhas da caldeira e abatidas pelos precipitadores eletrostáticos ou filtros de manga. As cinzas pesadas são formadas pelo material fundido que se deposita e se aglomera no fundo das fornalhas.

De acordo com Mehta e Monteiro (2008), a mineralogia das cinzas é diversificada, pois varia de acordo com a composição do carvão, ambiente de armazenamento e condições de calcinação. A finura da cinza volante é o principal fator que afeta sua qualidade, podendo

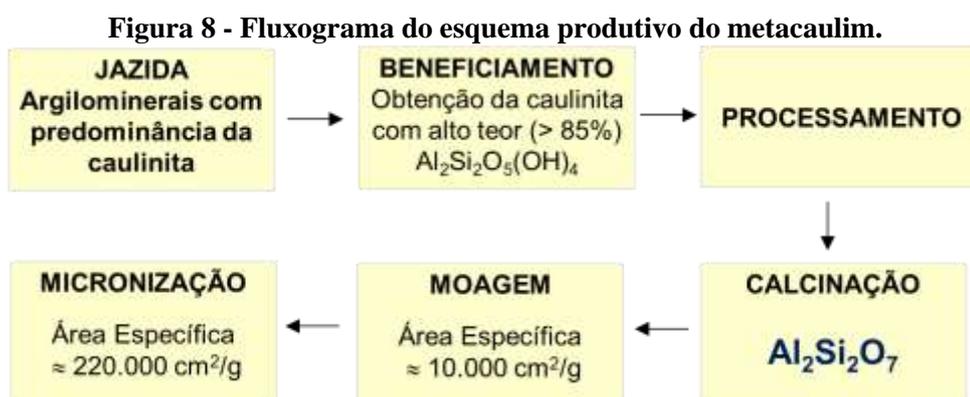
contribuir para a resistência, pela redução direta de água, incremento do volume na pasta de mistura e atividade pozolânica (CANON, 1968 *apud* COSTA, 2015).

A substituição de cimento por cinza volante, no concreto, afeta diversos aspectos das suas propriedades. Como parte dos materiais componentes do concreto, a cinza volante age, em parte, como um agregado fino e, parte, como um componente reativo, devido às reações pozolânicas. Isso influencia as propriedades reológicas do concreto no estado fresco, na elevação de temperatura, na resistência, porosidade, na durabilidade no estado endurecido e no custo e consumo energético do produto final (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

2.4.3 Metacaulim

Rocha (2017) destaca que o metacaulim classificado como uma pozolana de alta reatividade, em fase amorfa (vítrea), reage com hidróxido de cálcio presente nas pastas de Cimento Portland, formando compostos quimicamente estáveis e mecanicamente mais resistentes. Apresenta-se nas colorações branca, cinza-claro, bege, laranja ou vermelho (ou mistura entre estas). Este produto obedece às especificações da ABNT NBR 15.894:2010.

Segundo Rezende *et al.*(2012), o metacaulim é o material pozolânico resultante da calcinação de argilas cauliniticas submetidas a temperaturas que oscilam aproximadamente entre 500 °C e 800 °C dependendo do tipo de argila a ser utilizada. Sua influência nas propriedades mecânicas do concreto depende, além da sua pureza e reatividade, do teor de cimento no concreto e do intervalo e tipo de cura, por isto é necessário fazer uma extensa análise experimental da influência de todas as variáveis envolvidas nos estudos de aplicação desse material pozolânico. A Figura 8 mostra o esquema produtivo do metacaulim, enquanto na **Figura 9** tem-se o aspecto deste material na coloração branca e a micrografia deste material.



Fonte: Rocha, 2017.

Figura 9 - Metacaulim- a) metacaulim de cor branca b) micrografia do material com aumento de 10.000x.



Fonte: Rocha, 2017

2.4.4 PRINCÍPIO DA AÇÃO DAS POZOLANAS NO CONCRETO

Em relação à ação química, as pozolanas reagem com o hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2), CH, produzido durante a hidratação do cimento Portland. Como resultado, tem-se a produção de fases químicas com maior estabilidade e poder aglomerante, sendo os principais responsáveis pela resistência das pastas de cimento hidratadas (CARMO; PORTELLA, 2008).

De acordo com Metha e Monteiro (1994) a atividade pozolânica tem origem na instabilidade termodinâmica existente quando estes materiais entram em contato com a água saturada de CH, haja vista que a sílica e a alumina existentes na pozolana pertencem a estruturas facilmente deslocáveis (estruturas amorfas ou desordenadas).

O uso de pozolanas, mesmo em pequenas quantidades, é capaz de consumir quase que completamente o CH produzido na hidratação do cimento Portland comum. A transformação do CH em silicato de cálcio hidratado (CSH) faz com que o concreto se torne mais resistente ao ataque ácido e ao ataque por sulfatos. Contudo, é interessante ressaltar que o CSH formado na reação pozolânica tende a apresentar menor densidade que o CSH formado na hidratação do cimento (METHA; MONTEIRO, 1994).

Carmo e Portella (2008) afirmam que as adições de pozolanas tipo sílica ativa e sílica obtida da calcinação da casca de arroz em proporções de até 30% resultaram, normalmente, na diminuição do pH médio do eletrólito do concreto.

2.5 MÉTODOS DE DOSAGEM DE CONCRETO

Conforme definição preconizada por Tutikian e Helene (2011) o estudo de dosagem dos concretos de cimento Portland refere-se aos procedimentos necessários à obtenção da melhor proporção entre os materiais constitutivos do concreto, também conhecido por traço. Sendo que, um estudo de dosagem deve ser realizado visando obter a mistura ideal e mais econômica, numa determinada região e com os materiais ali disponíveis, para atender uma série de requisitos.

No contexto histórico, Helene e Terzian (1992) destacam que em 1944 foi publicado nos Estados Unidos o primeiro documento normativo consensual sobre a dosagem dos concretos, pois até então só se dispunha de propostas individuais de pesquisadores referentes às suas observações experimentais e tentativas teóricas de generalização. Trata-se do texto elaborado pelo “Committee 613” instalado em 1936 sob a coordenação de Robert F. Blanks do “Bureau of Reclamation USA”, publicado pelo “American Concrete Institute –ACI, após oito anos de intensas discussões.

Em 1958, na Alemanha, Kurt Waltz publicou as recomendações para dosagem e fabricação de concreto com propriedades específicas, introduzindo uma proposta para curvas de referência da correlação da resistência à compressão dos concretos com a resistência dos cimentos, que seria adotada, posteriormente, por volta de 1970, nas normas alemãs DIN 1945 – Dimensionamento e Execução das Construções de Concreto e Concreto Armado e DIN 1164 – Cimentos, conhecidas posteriormente como curvas de Walt (HELENE; TERZIAN, 1992).

Tutikian e Helene (2011) destacam que, apesar dos métodos de dosagem diferir entre si, certas atividades são comuns a todos, como, por exemplo, o cálculo da resistência média de dosagem, a correlação da resistência à compressão com a relação água/cimento para determinado tipo e classe de cimento, sempre e quando um estudo de dosagem tiver por objetivo a obtenção de uma resistência especificada, sem descuidar da economia e da sustentabilidade que sempre devem nortear um estudo de dosagem contemporâneo.

Todo processo de tecnologia de materiais envolvendo o concreto passa inicialmente pela escolha dos materiais que o comporão. Em obras de grande porte, faz-se necessário a adaptação e escolha dos materiais. Neste aspecto, o estudo de dosagem para concreto massa, se torna particularmente complexo, face as dificuldades de se avaliar em laboratório, as condições de manuseio e de comportamento das misturas estudadas.

É importante enfatizar, portanto, que existem diversos métodos de dosagem de concretos de cimento Portland, cada um com uma característica específica, sendo os mesmos apresentados a seguir.

2.5.1 MÉTODOS DE DOSAGEM

➤ **Método da American Concrete Institute – ACI (1984):** conhecido por ACI 211.1-91 atualizado em 2009, este método denominado *Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete* considera tabelas e gráficos elaborados a partir de valores médios de resultados experimentais. Portanto, na prescrição da 211.1-91 há também um apêndice que fornece informações sobre a dosagem de concreto massa.

Tal método foi desenvolvido de maneira a fornecer um baixo teor de areia para misturas plásticas, que além do benefício econômico, permite ao operador identificar se a mistura estiver pouco ou muito argamassada, apenas visualmente. Caso haja necessidade de correção do traço, uma vez que a mistura esteja pouco argamassada, deve-se acrescentar mais areia à mistura, mantendo-se constante a relação a/c.

➤ **Método da Associação de Concreto Portland – ABCP (1984):** criado pela Associação Brasileira de Cimento Portland por meio de experimentos. Este método, baseado no texto da ACI 211.1-81, constitui-se uma adaptação do método americano às condições brasileiras. Desta forma, o método que considera tabelas e gráficos elaborados a partir de valores médios dos resultados experimentais, constitui-se uma ferramenta para a dosagem de concretos convencionais.

➤ **Método de De Larrard (1990):** Trata-se de um método para composição, em princípio, de qualquer tipo de concreto, de resistência normal, de alto desempenho, com pós-reativos, jateado, autoadensável, compactado a rolo e de diferentes densidades. Este é considerado um método de difícil aplicação por depender de programas computacionais e ensaios de viscosidade com viscosímetros e reômetros de difícil obtenção. A determinação do pacote granular é através da clássica forma de objetivar a combinação dos agregados de forma que minimize a porosidade, diminuindo o consumo de pasta na mistura. A contribuição deste método francês é obter a máxima compactação com recursos computacionais, em princípio, válida para quaisquer forma e tamanho de partículas de agregados;

➤ **Método de Vitervo O'Reilly (1998) :** Trata-se de um método para composição, em princípio, de qualquer tipo de concreto, principalmente concretos correntes e concretos de alta

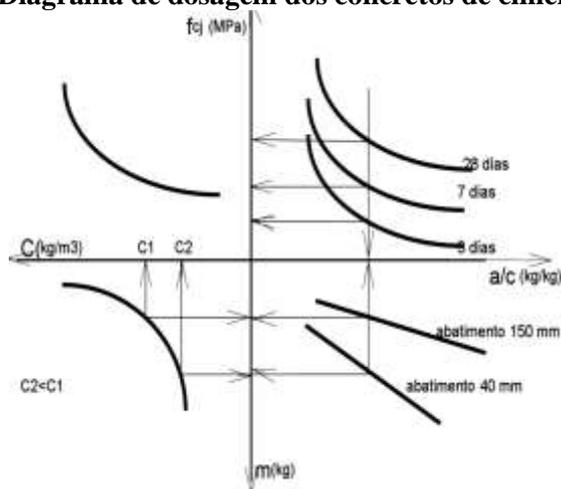
resistência. O método tem forte base experimental e está focado na economia de cimento. O princípio em muito se assemelha ao de De Larrard e também se baseia no empacotamento de partículas, visando à máxima compactidade possível e à diminuição do consumo de cimento para otimização da mistura granular seca, recuperando muito das ideias dos métodos de granulométrica descontínua.

➤ **Método IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas)/IBRACON (1992):** Desenvolvido por pesquisadores de Instituto de Tecnologia do Estado de São Paulo- IPT e da escola politécnica da USP e vem sendo tradicionalmente aplicado no país, desde de a década de 70. Ora chamado método EPUSP, ora IPT/EPUSP, ora método Helene e Terzian (1992), por ser nacionalmente conhecido e por ter contado ao longo do tempo com a colaboração de diversos pesquisadores para o seu aprimoramento foi recentemente, nomeado como método IBRACON, Instituto Brasileiro de Concreto.

Este método prevê um ajuste experimental das proporções entre os materiais constituintes do concreto, com base na busca de um conteúdo ideal de argamassa seca (α), através de um traço intermediário (1:m) dos demais previstos (1:m-1; 1m+1, etc) que contenham ou estejam próximos ao traço resposta pretendido.

Após os devidos cálculos é gerado o diagrama de dosagem (Figura 10), no qual o primeiro quadrante no sentido horário relaciona resistência com relação água cimento, o segundo relação de massa com a consistência do concreto e por fim o terceiro nos dá o consumo do cimento.

Figura 10- Diagrama de dosagem dos concretos de cimento Portland.



Fonte: Isaía, 2011.

Neste cenário é importante destacar as leis clássicas da tecnologia do concreto. Nessa abordagem, têm sido adotados como leis de comportamento os seguintes modelos que governam a interação das principais variáveis envolvidas:

- Modelo de Powers (1966) ou Lei de Abrams (1918): “a resistência de um concreto, numa determinada idade (f_{cj}), é inversamente proporcional à relação água cimento (a/c)”, expresso na Equação 1.

$$f_{cj} = \frac{k_1}{k_2^{a/c}} \quad (1)$$

- Ley de Lyse (1932): “fixados o cimento e agregados, a consistência do concreto fresco depende preponderantemente da quantidade de água por m^3 de concreto” e pode ser simplificada, expressa através da Equação 2.

$$m = k_3 + k_4 \times a/c \quad (2)$$

- Lei de Prizskulnik & Kirilos (1974): “o consumo de cimento por m^3 de concreto varia na proporção inversa da relação em massa seca de agregados/cimento (m)”, conforme Equação 3.

$$C = \frac{1000}{k_5 + k_6 \times m} \quad (3)$$

Onde:

f_{cj} é a resistência à compressão do concreto para a idade de j dias (Mpa);

m é a relação em massa seca de agregados/cimento (kg/kg);

a/c é a relação em massa de água/cimento (kg/kg);

C é o consumo de cimento por m^3 de concreto adensado (kg/ m^3);

k_1, k_2, k_3, k_4, k_5 e k_6 são constantes particulares de cada conjunto de mesmos materiais.

2.5.2 Método de dosagem utilizado nesta pesquisa

2.5.2.1 Método do Módulo de Finura

A partir de 1965 ocorreu grande desenvolvimento com o início da construção das grandes barragens brasileiras, no domínio da tecnologia do concreto massa. Os engenheiros

Walton Pacelli de Andrade e Rubens Bittencourt, junto com outros pesquisadores do Laboratório de FURNAS, podem ser considerados os pioneiros no Brasil ao apresentarem, em julho de 1981, um método de dosagem para concreto massa (TUTIKIAN; HELENE, 2011).

Desde então, o Método do Módulo de Finura tem sido usado na maioria das usinas hidrelétricas do mundo. Sendo caracterizado pela não utilização de dados previamente tabelados e representando considerável economia no consumo de aglomerante.

Este método se utiliza, como nos concretos convencionais, da Lei de Lyse que dita, independentemente de diferentes porcentagens individuais para cada peneira, concretos com o mesmo módulo de finura da combinação de agregados apresentam consistência e, por conseguinte, trabalhabilidade substancialmente semelhantes.

De acordo com a ABNT NBR 248:2003 o módulo de finura faz parte dos ensaios de granulometria (é igual à soma das porcentagens retidas acumuladas das peneiras da série normal dividida por 100) e está intimamente ligada à superfície específica, a superfície exposta dos agregados, que necessita de recobrimento por pasta.

As dosagens são estudadas para atender a certo abatimento (*slump*) e certa incorporação de ar. Os estudos resultam em curva de tendência e, destas curvas, são definidas as dosagens utilizadas na obra. Sabe-se que neste método preocupa-se com a mistura mais econômica e que seja ao mesmo tempo trabalhável. Desta maneira, procura minimizar a quantidade de argamassa no concreto através da diminuição dos vazios do esqueleto granular dos agregados graúdos, e algumas curvas de distribuição granulométricas tem sido propostas (MARQUES FILHO; 2011):

a) Graduações geométricas

Denominam-se graduações geométricas ou graduação ideal a curva granulométrica contínua, em que as porcentagens retidas em dimensões sucessivas do conjunto normal de peneiras mantêm uma progressão geométrica entre si. Cada graduação geométrica é definida pelo termo de progressão, e para exemplificar, uma graduação de setenta por cento significa qualquer da série normal reterá 70% da massa retida na peneira imediatamente superior.

A variação contínua da granulometria cria um esqueleto granular com menor suscetibilidade à segregação, gerando certa capacidade de suporte dos grãos maiores pelos imediatamente inferiores sucessivamente. Como as graduações geométricas são progressões geométricas, o manuseio analítico se torna simples, obtendo-se analiticamente seu módulo de finura. Pode-se definir as graduações geométricas e suas relações nas Equações 4 e 5.

$$\beta = \frac{100(1-\alpha)}{1-\alpha^n} \quad (4)$$

Onde:

α é a razão da graduação geométrica;

β é a porcentagem retida na primeira peneira (material que passa na peneira correspondente a $D_{\text{máx}}$ e retida na imediatamente inferior);

n é o número de peneiras da série normal a partir da que define $D_{\text{máx}}$.

$$\text{M.F} = \frac{\beta}{1-\beta} \left[n + \frac{\alpha^n - 1}{1-\alpha} \right] \quad (5)$$

b) Curvas de Referência de Talbot-Richard

As curvas de Talbot-Richard fornecem curvas granulométricas que procuram a obtenção do índice de vazios mínimo de um pacote de agregados. A Equação 6 apresenta a porcentagem acumulada passante em cada peneira gerando a curva de Talbot-Richard para agregados graúdos, com dimensões em polegadas.

$$p = \frac{d^x - 0,1875^x}{D_{\text{máx}}^x - 0,1875^x} \quad (6)$$

Onde:

p é a porcentagem acumulada que passa na peneira de malha d ;

d é a abertura da malha da peneira considerada (polegadas);

x é o expoente que indica se o agregado é natural ou artificial, assumindo o valor 0,5 para agregado britado e 0,8 para agregado natural;

$D_{\text{máx}}$ é a Dimensão Máxima Característica do Agregado (mm).

Quando o agregado miúdo é considerado juntamente com o agregado graúdo a Equação 6 passa a assumir a forma contida na Equação 7.

$$p = \frac{d^x - 0,00293^x}{D_{\text{máx}}^x - 0,00293^x} \quad (7)$$

c) Curvas de Referência do ACI Committee 207

O ACI fornece curvas de referência para granulometria dos agregados visando minimizar os vazios, conforme Equação 8.

$$p = \left(\frac{d}{D_{m\acute{a}x}} \right)^x \times 100 \quad (8)$$

Onde:

p é a porcentagem acumulada que passa na peneira de malha d;

d é a abertura da malha da peneira considerada (polegadas);

x é o expoente que indica se o agregado é natural ou artificial, assumindo o valor 0,5 para agregado britado e 0,8 para agregado natural;

$D_{m\acute{a}x}$ é a Dimensão Máxima Característica do Agregado (mm).

d) Curvas Granulométricas Cúbicas

Os trabalhos pioneiros de Fuller e Bolomey para a determinação de curvas granulométricas ideais, procurando a maior massa unitária compactada dos agregados, levaram a curvas granulométricas exponenciais, que quando calibradas forneceram subsídios para vários processos de dosagem. A curva granulométrica cúbica caracteriza-se como a proposta de curva mais utilizada como guia para a dosagem de CCR. Para obtenção desta curva deve ser utilizada a Equação 9.

$$p = 1 - \left(\frac{d}{D_{m\acute{a}x}} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (9)$$

Onde:

p é a porcentagem acumulada que passa na peneira de malha d;

d é a abertura da malha da peneira considerada (mm);

$D_{m\acute{a}x}$ é a Dimensão Máxima Característica do Agregado (mm).

Diante do exposto referente à graduação geométrica, vale ressaltar que atualmente este parâmetro não é muito usado, sendo justificada a utilização quando empregado agregados graúdos com grandes dimensões, como por exemplo, $D_{m\acute{a}x}$ 152 mm. Ainda neste aspecto,

vale ressaltar que atualmente algumas obras de barragens adotam a composição ideal dos agregados graúdos de acordo com o recomendado por Helene e Terzian (1992). Este método tem a característica de ser prático e simples, cuja finalidade é buscar o melhor empacotamento entre as partículas mediante a determinação da composição ideal entre elas.

Helene e Terzian (1992) indicam para a determinação adequada da mistura entre duas faixas granulométricas de pedras britadas, que sejam obedecidas as recomendações prescritas na ABNT NBR 7810: 1983 que descreve a determinação da massa unitária dos agregados em estado compactado seco. A determinação da massa unitária deve ser feita individualmente em cada mistura de agregados, contendo diferentes teores de cada fração.

Em relação ao desenvolvimento das dosagens experimentais, estas devem estar em conformidade com os requisitos especificados de incorporação de ar e abatimento e, quando isso não ocorre, são necessários ajustes. Diante disso, existem basicamente duas formas de ajuste das dosagens experimentais. A primeira forma de ajuste baseia-se no método de dosagem do IPT, sendo realizado o proporcionamento da água da dosagem até que a faixa de abatimento do tronco de cone estabelecida seja alcançada, que pode resultar em excesso ou deficiência na medida do abatimento do concreto e na necessidade de nova tentativa. Este procedimento exige experiência visual para acerto do abatimento e o valor de m sempre permanece constante.

O segundo procedimento, sugerido por Campitelli (2004) é a correção da consistência (abatimento) por meio da relação água/materiais secos e da coesão (teor de argamassa) da dosagem. Neste procedimento, a composição da dosagem (cim:areia:brita:água) é expressa pela Equação 10.

$$1 : \left(\frac{k \times x}{H} - 1 \right) : \left(\frac{x}{H} \times (100 - k) \right) : x \quad (10)$$

Onde:

k é o teor de argamassa seca;

x é a relação água/cimento equivalente;

H é a relação água/materiais secos.

O ajuste do abatimento é feita pela fórmula de Popovics adaptada por Campitelli (2004), variando a relação H , conforme Equação 11.

$$H_2 = H_1 \times \left(\frac{S_2}{S_1} \right)^{0,1} \quad (11)$$

Onde:

H2 é a relação água/materiais secos a determinar (%);

H1 é a relação água/materiais secos atual (%);

S2 é o abatimento desejado (mm);

S1 é o abatimento obtido (mm).

O ajuste da coesão é feito aumentando ou diminuindo o valor de k, que representa a argamassa seca, caso o concreto da dosagem experimental tenha se apresentado pouco ou muito argamassado. Este tipo de ajuste da dosagem pode resultar em alteração do valor da massa do agregado total (m). Dessa forma, um valor inicial 5 para m pode ser alterado para 5,139 após os ajustes da trabalhabilidade.

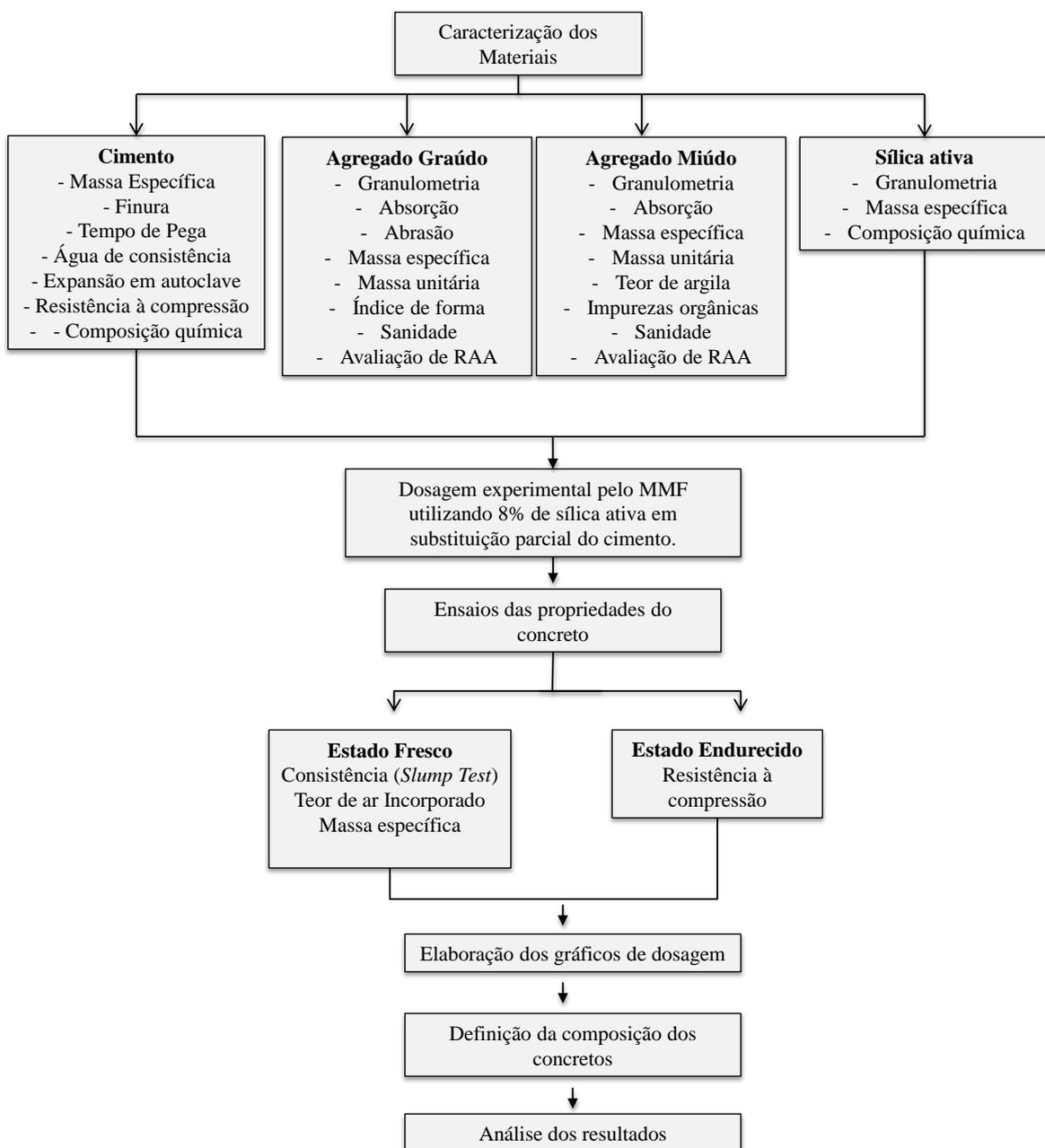
Neste sentido, a principal adaptação proposta por Campitelli refere-se ao procedimento de ajuste de consistência e de coesão em laboratório, demonstrando eficiência para a obtenção de um traço inicial o mais próximo possível do traço final, o que reduz sensivelmente as operações de ajuste, onde neste procedimento, a utilização da ficha de ajuste se mostra interessante e fácil, possibilitando o mínimo consumo de materiais e rapidez de operações.

Quanto ao Método do Módulo de Finura dos Agregados, a ser utilizado nesta pesquisa, cabe enfatizar que este é o método de dosagens para concreto massa consagrado no meio técnico. O qual foi utilizado com êxito na construção de inúmeras barragens no Brasil, tais como, Itaipu, Tucuruí, Serra da Mesa, Corumbá I, Lajeado, Itapebi, Cana Brava, Salto Caxias, Santa Clara, dentre outros (CARMO, 2006).

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental está subdividido basicamente em duas macro etapas, sendo estas: a) caracterização dos agregados e da adição mineral; b) dosagem experimental do concreto pelo MMF MF utilizando 8% de sílica ativa em substituição parcial do cimento, conforme apresentado no fluxograma da Figura 11.

Figura 11 - Fluxograma do programa experimental.



Fonte: Próprio Autor.

Desta maneira tem-se a seguinte descrição do programa experimental do presente estudo:

1ª etapa: Caracterização dos agregados (graúdo e miúdo), compreendendo: distribuição granulométrica, módulo de finura, massa específica, massa unitária, absorção de água e reação álcali- agregado (RAA) e caracterização da sílica ativa, por meio de análise granulométrica, massa específica e caracterização química e informações técnicas do cimento utilizado;

2ª etapa: Estudo de dosagem do concreto conforme o método do Módulo de Finura dos Agregados, contendo 8% de substituição de sílica ativa ao cimento e definição dos traços teóricos obtidos na dosagem a partir das especificações de projeto, atendendo os requisitos das estruturas.

Destaca-se nestes procedimentos, o estudo do comportamento dos concretos no estado fresco para a análise das características que influenciam nos parâmetros de aplicação, bem como o estudo das propriedades mecânicas dos concretos no estado endurecido.

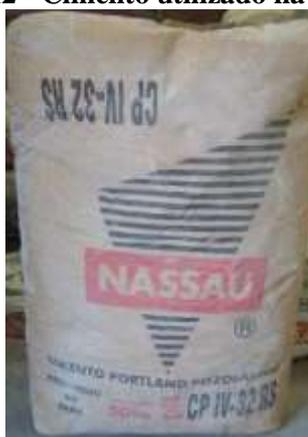
O programa experimental da pesquisa foi desenvolvido no Laboratório de Engenharia Civil – LEC do Campus Universitário de Tucuruí – CAMTUC/ UFPA, com exceção da análise físico-química da sílica ativa executados no Laboratório de Química da Dow Corning Silício do Brasil e os ensaios de RAA, realizados no Laboratório de FURNAS em Aparecida de Goiânia/GO.

3.1 MATERIAIS UTILIZADOS

3.1.1 Cimento

Para o estudo de dosagens foi utilizado o cimento Portland pozolânico – CPIV-32 RS, da marca NASSAU (Figura 12). Neste processo obedeceu-se o critério em adotar o mesmo cimento, homogeneizado e proveniente do mesmo lote para a produção dos concretos. As características físicas, químicas e mecânicas do cimento empregado, estão apresentadas na **Tabela 7**, de acordo com os resultados obtidos dos ensaios realizados pelo Laboratório de FURNAS, relacionando-os conforme as exigências da ABNT NBR 5733:1991.

Figura 12 - Cimento utilizado na pesquisa.



Fonte: Próprio Autor.

Tabela 7- Características do cimento utilizado na pesquisa.

Tipo de material		Cimento CP IV	Limites Norma NBR 5736/91	
Propriedades determinadas				
Massa Específica (g/cm^3)		2,94	---	
Finura	Retido na #200(%)	1,1	$\leq 8,0$	
Tempo de Pega	Início (h:min)	03:00	$\geq 1:00$	
	Fim (h:min)	04:50	$\leq 12:00$	
Água de Consistência- Pasta (%)		35,4	---	
Expansão em Autoclave- Norma ASTM C-151 (%)		-0,02	$\leq 0,8$	
Resistência à Compressão (MPa)	3 dias	26,4	$\geq 10,0$	
	7 dias	34,4	$\geq 20,0$	
	28 dias	48,6	$\geq 32,0$ e $\leq 49,0$	
Componentes Químicos(%)	Perda ao fogo		6,01	$\leq 4,5$
	Álcalis Totais	Óxido de sódio	0,05	---
		Óxido de potássio	0,15	---
		Equiv.alcalino	0,15	---
	Álcalis Solúveis em Água	Óxido de sódio	0,01	---
		Óxido de potássio	0,06	---
		Equiv.alcalino	0,05	---

Fonte: Adaptado de FURNAS, 2017.

A escolha deste material cimentício para a produção dos concretos baseia-se principalmente quanto à preferência pelos cimentos que apresentam menor calor de hidratação (CP IV - Pozolânico) ou de escória de alto forno (CP III – Alto forno) para produção concreto massa, conforme Metha e Monteiro (2011), uma vez que os cimentos Portland mais grossos, que contêm relativamente menos C_3A (aluminato tricálcico) e C_3S (silicato tricálcico) apresentam menor calor de hidratação em relação aos que contem mais C_3S e C_3A .

A escolha do cimento CPIV justifica-se também por ser comumente encontrado na região, uma vez que a sua fábrica está situada no município de Capanema/PA, o que viabiliza o escoamento do material e o seu consequente consumo no mercado local.

3.1.2 Agregados

Sabe-se que, a faixa granulométricas dos agregados graúdos utilizados em obras de barragens é uma particularidade, sendo utilizadas geralmente as seguintes dimensões máximas características: 19 mm, 38 mm, 76 mm e 150 mm. Neste aspecto, as graduações a serem utilizadas nesta pesquisa correspondem a 19 mm e 38 mm. Estes agregados, conforme a caracterização realizada por *Bandeira et al.*(2005) são oriundos de rochas do grupo dos metassedimentos. Sendo estes materiais proveniente das escavações obrigatórias para implantação das estruturas de concreto e processado no sistema de britagem das obras da UHE Tucuruí.

Como agregado miúdo tem-se a areia natural extraída do leito do rio Tocantins, localizado à sua margem esquerda, a qual foi utilizada na construção da segunda etapa da UHE Tucuruí, mantida no estoque denominado Maracanã. Os agregados utilizados no desenvolvimento da pesquisa são mostrados na Figura 13.

Figura 13 - Agregados a) Brita 19mm b) Brita 38mm e c) Areia Natural.



Fonte: Próprio Autor.

3.1.3 Água

Utilizou-se para a realização dos ensaios e produção dos concretos, água potável proveniente da rede de abastecimento da Vila Permanente, fornecida pela Eletrobras/Eletronorte. Para a preparação dos reagentes necessários para os ensaios foi utilizada água destilada do Laboratório de Química da Universidade Federal do Pará Campus Tucuruí.

3.1.4 Aditivo Químico

Segundo a ABNT NBR 11768:2011 aditivo incorporador de ar é um produto que permite incorporar, durante o amassamento do concreto, uma quantidade controlada de pequenas bolhas de ar, uniformemente distribuídas, que permanecem no estado endurecido.

O aditivo incorporador de ar empregado na dosagem experimental refere-se ao produto MasterAir® 901 da marca BASF. Esta escolha foi feita por se tratar de um aditivo normalmente utilizado em concreto massa de barragens, buscando garantir boa trabalhabilidade e reduzir quantidade de água e cimento na mistura.

O produto é caracterizado quimicamente por uma dispersão aquosa a base de ácidos resínicos e ácidos de colofónia, fumáricos e sais de sódio. Este produto é um líquido de cor castanho avermelhado, com um valor de pH de aproximadamente 11,8 e massa específica entre 1,010 e 1,015 g/cm³. De acordo com as prescrições do fabricante, devem ser utilizados nas dosagens de 0,05 a 1,0% em relação ao peso do cimento. Neste caso, utilizou-se a proporção de 0,05% para as dosagens dos concretos da presente pesquisa.

3.1.5 Sílica Ativa

A sílica ativa empregada neste estudo (Figura 14) é proveniente da empresa Dow Corning Silício do Brasil Ltda., como subproduto gerado do processo de fabricação do silício metálico. Este produto apresenta alguns sinônimos: sílica fume, microssílica, sílica amorfa, pó de dióxido de silício, sílica volatilizada. Quanto à classificação da ABNT NBR 13956:2012 a sílica ativa utilizada no estudo é do tipo não-densificada.

Figura 14 – a) e b) Sílica Ativa utilizada na pesquisa.



Fonte: Próprio Autor.

3.2 MÉTODOS

3.2.1 Caracterização dos Agregados

Nota-se a elevada importância e necessidade da caracterização dos agregados para controle de qualidade e viabilização da aplicação para concretos de barragens. Uma vez que o comportamento do concreto é largamente influenciado pelo agregado, quer pela sua textura, composição mineralógica, qualidade, quantidade e dimensão máxima.

Os ensaios de caracterização física dos agregados empregados para a produção dos concretos baseiam-se nas normas vigentes. Assim, as amostras separadas para os ensaios devem ser coletadas obedecendo aos critérios da ABNT NBR NM 26:2009, o qual descreve este processo. Posteriormente, estas amostras são misturadas e quarteadas visando atender as especificações da ABNT NBR NM 27:2001, que prescreve a redução de amostra de campo de agregados para ensaio de laboratório.

3.2.1.1 *Análise Granulométrica*

A análise granulométrica do agregado miúdo é de grande importância para as misturas cimentícias, uma vez que influencia de maneira abrangente suas propriedades. Este parâmetro consiste na determinação das dimensões das partículas e das proporções relativas em que elas se encontram na composição. As amostras de areia e brita foram caracterizadas quanto à distribuição granulométrica, através de ensaios de peneiramento conforme ABNT NBR NM 248:2003.

Após preparo das amostras, sendo realizado o quarteamento, realizou-se o peneiramento das amostras utilizando o agitador mecânico promovendo a separação do material de acordo com o tamanho das partículas. Através dos resultados obtidos, após pesagem do material retido em cada peneira, determinou-se então, o módulo de finura e o diâmetro máximo do agregado.

3.2.1.2 *Determinação da massa específica e absorção*

Para efeitos de dosagem, é necessário que se conheça o espaço ocupado pelas partículas do agregado, incluindo os poros existentes dentro das partículas. Portanto, é de suma importância determinar a massa específica aparente do agregado seco, que pode ser definida como a relação da massa de um agregado seco e seu volume, incluindo os poros

permeáveis como parte do agregado. Em relação à absorção, esta representa o aumento da massa do agregado devido ao preenchimento de seus poros permeáveis por água.

Para a realização dos ensaios de massa específica da brita foi obedecida as recomendações da ABNT NBR NM 53: 2009. Após realizar os procedimentos descritos nesta norma, com a determinação das massas do agregado seco, saturado e submerso, e cálculo da massa específica referente a estas condições, fez-se por fim, o cálculo da massa específica aparente através da Equação 12.

$$d_a = \frac{m}{m_s - m_a} \quad (12)$$

Onde:

d_a é a massa específica aparente do agregado seco (g/cm^3);

m_s é a massa ao ar da amostra na condição saturada superfície seca (g);

m_a é a massa em água da amostra na condição saturada superfície seca (g);

m é a massa ao ar da amostra seca (g).

Para a areia realizou-se o ensaio de acordo com a ABNT NBR NM 52:2009, obedecendo todas as etapas desde a preparação das amostras até o procedimento do ensaio. Após a realização do procedimento estabelecido, calculou-se a massa específica de acordo com a Equação 13:

$$d_3 = \frac{m}{(V - V_a) - \frac{m_s - m}{\rho_a}} \quad (13)$$

Onde:

d_3 é a massa específica do agregado (g/cm^3);

m é a massa da amostra seca em estufa (g);

V é o volume do frasco (cm^3);

V_a é o volume de água adicionado ao frasco (cm^3);

m_s é a massa da amostra na condição saturada superfície seca (g);

ρ_a é a massa específica da água (g/cm^3).

Simultaneamente aos ensaios de massa específica, os ensaios de absorção de água pelos agregados foram executados, sendo adotados os procedimentos prescritos na ABNT NBR NM 30:2001 para o agregado miúdo, e a ABNT NBR NM 53:2009 no que diz respeito ao agregado graúdo. Por meio da Equação 14 obteve-se a absorção de água.

$$A = \frac{m_s - m}{m} \times 100 \quad (14)$$

Onde:

A é a porcentagem de água (%)

m_s é a massa da amostra saturada superfície seca (g);

m_l é a massa da amostra seca em estufa (g);

3.2.1.3 Determinação da massa unitária

A massa unitária pode ser definida como a massa das partículas dos agregados por unidade de volume unitário, incluindo o volume aparente dos grãos e dos vazios no interior dos grãos. Esta propriedade é muito importante na dosagem, pois para se quantificar o agregado em volume, é preciso conhecer a quantidade de material que preenche um recipiente com capacidade igual à unidade de volume. Os ensaios para determinação da massa unitária, foram determinados de acordo com a ABNT NBR NM 45:2006, tanto para a areia quanto para a brita.

Cada amostra analisada foi transferida para o recipiente com auxílio de uma pá metálica, fazendo-se o lançamento a uma altura de queda padrão. Após rasar o recipiente com o material, fez-se a pesagem do conjunto, obtendo-se o valor da massa unitária através da Equação 15.

$$\rho_{ap} = \frac{m_{ar} - m_r}{V} \quad (15)$$

Onde:

ρ_{ap} é a massa unitária do agregado (kg/m^3);

m_{ar} é a massa do recipiente mais o agregado (kg);

m_r é a massa do recipiente vazio (kg);

V = volume do recipiente (m^3).

3.2.1.4 Abrasão Los Angeles

A abrasão consiste em um dos mecanismos através dos quais ocorre o desgaste dos agregados. Neste aspecto, o ensaio de abrasão, estabelecido pela ABNT NBR NM 51:2001

apresenta como objetivo a avaliação do desgaste das partículas do agregado graúdo sob impactos de cargas mecânicas e atrito.

Para este ensaio as amostras previamente preparadas devem ser colocadas no equipamento *Los Angeles* juntamente com uma carga abrasiva, devendo o tambor girar a uma velocidade compreendida entre 30 e 33 rpm (rotações por minuto), submetidas a 500 ou 1000 revoluções no interior do equipamento, de acordo com a classificação prescrita na norma, velocidade compreendida entre 30 rpm e 33 rpm. A máquina, as esferas e a amostra para ensaio estão apresentadas na Figura 15.

Figura 15 - Ensaio de abrasão a) equipamento *Los Angeles* e b) esferas metálica e amostra de brita.



Fonte: Próprio Autor.

Este desgaste é mensurado, comparando o estado inicial da amostra (massa de ensaio) com seu estado final (soma da perda de massa ocorrida nas partículas da amostra ensaiada), conforme a Equação 16, sendo o valor dado em porcentagem.

$$P = \left(\frac{M - M_1}{M} \right) \times 100 \quad (16)$$

Onde:

P é a abrasão *Los Angeles* (%);

M é a massa total da amostra seca (g);

M₁ é a massa da amostra lavada e seca, após o ensaio, retida na peneira de 1,7mm (g).

3.2.1.5 Determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis

No ensaio de teor de argila em torrões e materiais friáveis, adotou-se os parâmetros estabelecidos pela ABNT NBR 7218:2010. Esta metodologia permite inferir sobre a qualidade de um agregado, com relação à contaminação com grãos pouco resistente, influenciando assim na resistência do concreto.

Considera-se os intervalos granulométricos e a massa mínima de amostra descrita na norma. Desta maneira, realizou-se o peneiramento do material seco sucessivamente por meio das peneiras prescritas e determinada a massa das frações retidas (m_i). Logo após, foram espalhadas as frações retidas em bandejas de modo a formar uma camada fina, sendo verificada a possível presença de argila em torrões. Ao identificar as partículas com aparência de torrões de argila ou materiais friáveis foram pressionadas entre os dedos, de modo a desfazê-las.

Ao finalizar o peneiramento e determinação das massas retidas de cada fração (m_f), calculou-se a porcentagem de material destorrado de cada fração pela Equação 17

$$M_d = \left(\frac{m_i - m_f}{m_i} \right) \times 100 \quad (17)$$

Onde:

M_d é o teor de argila em torrões e materiais friáveis de cada fração (%);

m_i é a massa inicial do intervalo granulométrico (g);

m_f é a massa após peneiramento via úmida (g);

Vale ressaltar ainda que a ABNT NBR 7218:2010 recomenda o cálculo do teor parcial de argila em torrões e materiais friáveis e posteriormente o cálculo do índice total através do somatório dos teores parciais encontrados.

3.2.1.6 Sanidade ao ataque por sulfato de sódio

O objetivo deste ensaio é determinar a resistência à desintegração dos agregados à ação do tempo, pelo ataque de soluções saturadas de sulfato de sódio.

A sanidade dos agregados é prescrito pelo método ASTM C 88:2005, que descreve um procedimento padronizado para a determinação direta da resistência do agregado a desintegração pela exposição a cinco ciclos de umedecimento e secagem. Sendo que para o ciclo de umedecimento é usada solução saturada de sulfato de sódio (Figura 16) ou solução de magnésio. Para caracterização da amostra, além da análise quantitativa em relação à porcentagem de perda do material, é realizado em caráter qualitativo a observação do efeito da ação do sulfato de sódio e a natureza da ação.

Figura 16- Frações do agregado imersas na solução de sulfato de sódio.



Fonte: Próprio Autor.

3.2.1.7 Determinação de impurezas orgânicas

Para a produção de concretos, é importante verificar a presença de impurezas orgânicas no agregado miúdo, uma vez que estas impurezas podem prejudicar as reações químicas de hidratação do cimento, podendo interferir também na resistência do concreto. Desta maneira o ensaio prescrito na norma ABNT NBR 49:2001 tem por finalidade detectar a presença de impurezas orgânicas da areia a ser utilizada.

Para realização do ensaio foram utilizados 200g de amostra de areia, solução de hidróxido de sódio a 3% e solução de ácido tânico a 2%. Sendo adicionada a amostra de areia num frasco de erlenmeyer juntamente com a solução de hidróxido de sódio, simultaneamente fez-se a preparação da solução padrão de ácido tânico.

O ensaio consiste em realizar uma comparação das intensidades de cores entre a solução padrão e a solução filtrada que continha a amostra, ambas deixadas em repouso por 24h. Observa-se na **Figura 17** a amostra de areia imersa na solução de hidróxido de sódio (à esquerda) e a solução padrão (à direita).

Figura 17- Erlenmeyers contendo amostra de areia imersa em hidróxido de sódio e solução padrão.



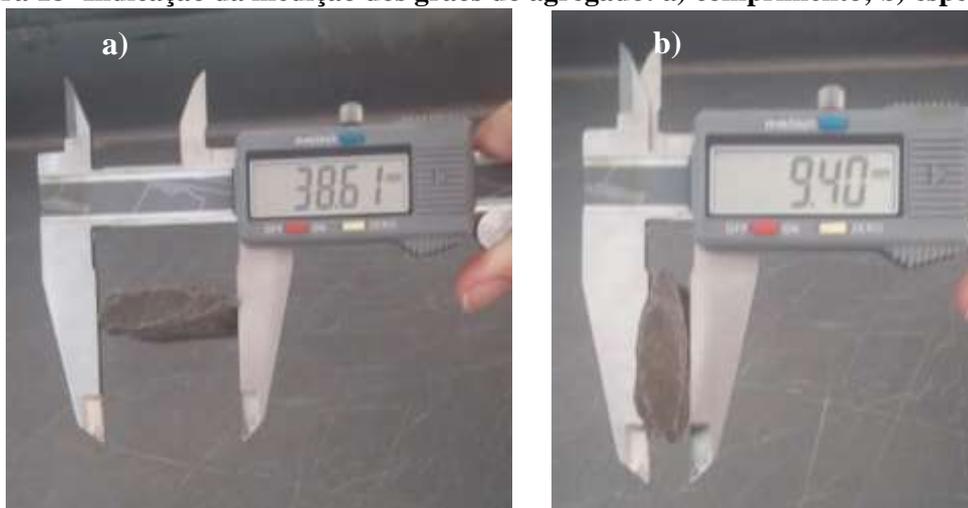
Fonte: Próprio Autor.

3.2.1.8 *Determinação do índice de forma*

Este ensaio permite avaliar as condições de determinada amostra de agregado graúdo conforme seu formato, classificando-o de acordo com suas características geométricas.

A ABNT NBR 7809:2006 descreve a determinação do índice de forma pelo método do paquímetro, sendo analisadas as partículas com dimensão máxima característica maior que 9,5 mm por medida direta com paquímetro. Assim, o índice de forma corresponde a média da relação entre comprimento e a espessura dos grãos do agregado, ponderada pela quantidade de grãos de cada fração granulométrica que o compõe. Observe na Figura 18 o procedimento realizado para determinação deste parâmetro.

Figura 18- Indicação da medição dos grãos do agregado: a) comprimento; b) espessura.



Fonte: Próprio Autor.

3.2.1.9 Análise da Reação Álcali-Agregado

Sabe-se que a reação álcali-agregado (RAA) caracteriza-se como um fenômeno patológico que vem sendo estudado e discutido por vários pesquisadores e tecnologistas de concreto. Em virtude disto, previamente ao início das concretagens das estruturas de barragens, ensaios de reatividade álcali-agregado devem ser realizados, para investigação do potencial reativo entre os álcalis contidos na composição dos cimentos e os minerais contidos nos agregados disponíveis na obra, com conseqüente probabilidade de ocorrência de reações expansivas nestas estruturas de concreto.

Os ensaios de expansão pelo método acelerado em barras de argamassa foram realizados segundo a NBR 15577-4:2009 e NBR 15577-5:2008. O método em destaque investiga a potencialidade reativa dos agregados conforme a variação do comprimento das barras de argamassa em condições prescritas na norma supracitada.

Para realização do ensaio, as amostras de agregado graúdo (brita) passaram por processo de fragmentação até a obtenção das frações necessárias contidas na norma. Este ensaio foi realizado tanto para a brita quanto para a areia. Inicialmente, realizou-se a preparação das amostras de brita (moída) e areia natural, de acordo item 6.1 – Preparo do Agregado da norma NBR 15577-4, conforme descrito na **Tabela 8**.

Tabela 8 - Granulometria requerida do material para ensaio.

Peneira com abertura de malha (ABNT NBR ISO 3310-1)		Quantidade de material em massa	
Passante	Retido	%	g
4,75 mm	2,36 mm	10	99,0
2,36 mm	1,18 mm	25	247,5
1,18 mm	600 µm	25	247,5
600 µm	300 µm	25	247,5
300 µm	150 µm	15	148,5

Fonte: Adaptado da ABNT NBR 15577-4.

Conforme explicitado na norma, procedeu-se a moldagem das barras de argamassa com dimensões específicas, para cada agregado em análise, combinado com um cimento a ser testado, com relação a/c e proporção cimento: agregado fixados nesta norma. Após 24 horas da moldagem, as barras foram desmoldadas e curadas em água por mais 24 horas a uma temperatura de 80°C. Depois deste período, estas foram retiradas uma a uma, fazendo-se a leitura do comprimento inicial e, acondicionadas em solução aquosa de hidróxido de sódio NaOH 1N, a 80°C, sendo medidos seus comprimentos diariamente até atingir idade de 30 dias. Ao final do ensaio, a expansão média é comparada ao limite máximo normatizado de forma a confirmar se o agregado possui ou não potencial reativo.

Os ensaios foram realizados em combinações dos agregados com o cimento do tipo CP IV, e em combinações dos mesmos agregados, mas em substituição de 8% do supracitado cimento por sílica ativa.

As Figuras Figura 19 Figura 20 mostram as etapas de execução do ensaio de expansão pelo método acelerado em barras de argamassa.

Figura 19- Ensaio de RAA a) Tanques de imersão com solução de hidróxido de sódio e b) Dispositivo de medição do comprimento das barras de argamassa.



Fonte: FURNAS, 2017.

Figura 20- Barras de argamassa imersas na solução de hidróxido de sódio.



Fonte: FURNAS, 2017.

3.2.2 Caracterização da Sílica Ativa

A sílica ativa comercializada pela empresa Dow Corning Silício do Brasil foi submetida a ensaios de caracterização do material para determinação da massa específica, granulometria e composição química. Neste sentido, para a obtenção da distribuição granulométrica, utilizou-se a técnica de granulometria a laser, a qual permite a obtenção dos diâmetros de materiais finos.

Para análise da composição química a amostra foi caracterizada pelos métodos espectrometria de emissão ótica com plasma indutivamente acoplado (ICP-OES) e análise por

fluorescência de raios – X. Quanto à massa específica, empregou-se o picnômetro de hélio para obtenção deste parâmetro.

Vale ressaltar que todos os ensaios de caracterização da sílica ativa foram realizados em parceria no laboratório de química da empresa Dow Corning silício do Brasil.

3.3 ESTUDO DE DOSAGEM DO CONCRETO MASSA

Este estudo de dosagens foi direcionado para a obtenção de concretos adequados para estruturas de uma usina hidrelétrica, utilizando o procedimento de dosagem correspondente ao Método do Módulo de Finura (MMF), tendo em vista que a referida metodologia é adotada na maioria das grandes obras de concreto de características massivas, devido a resultar em otimização do consumo de aglomerante, por não utilizar dados previamente tabelados.

Para a realização de dosagens foram considerados os requisitos para os concretos, contidos nas Especificações Técnicas das obras civis de uma usina hidrelétrica, as quais fazem parte de documentos técnicos de projeto básico da obra e que definem critérios de qualidade para a execução das estruturas de concreto. Desta forma, foram utilizados como base para o direcionamento dos critérios no desenvolvimento da dosagem do concreto, as especificações técnicas da obra de Usina Hidrelétrica de Belo Monte, conforme destinação da aplicação do concreto (Tabela 9).

Tabela 9 - Requisitos especificados para as classes de concreto em função da destinação.

ESPECIFICAÇÕES DE PROJETO					
REQUISITOS PARA OS CONCRETOS DAS ESTRUTURAS PRINCIPAIS					
Classe	F _{ck}	Idade	t de Student	Relação água/aglomerante	Destinação
...	(MPa)	(dias)
A	9	90	0,842	...	Regularização de fundação em rocha Concreto massa
B	15	90	0,842	...	Impermeabilização de fundação Concreto de face CCR
B	15	90	1.282	...	Concreto armado de características massivas
C	20	90	1.282	...	Concreto armado dos muros e pilares de vertedouros
C	20	90	1.645	...	Concreto armado Concreto sujeito a solicitações dinâmicas Superfícies hidráulicas sujeitas a velocidades de água inferiores a 4m/s
D	20	28	1.282	...	Concreto armado dos muros e pilares de vertedouros

D	20	28	1.645	...	Concreto armado Concreto sujeito a solicitações dinâmicas Superfícies hidráulicas sujeitas a velocidades de água inferiores a 4m/s
E	25	28	1.645	...	Concreto armado Peças pré-moldadas Superfícies hidráulicas sujeitas a velocidades de água entre 4m/s e 12m/s Concreto protendido
F	30	28	1.645	$a/c_{equiv} \leq 0,45$	Concreto de segundo estágio de guias de comportas Peças pré-moldadas Concreto protendido Concreto armado resistente à abrasão Concreto de superfícies hidráulicas sujeitas a velocidades de água superiores a 12m/s
G	25	90	1.645	...	Concreto armado Superfícies hidráulicas sujeitas a velocidades de água entre 4m/s e 12m/s
H	30	90	1.645	$a/c_{equiv} \leq 0,45$	Concreto de segundo estágio de guias de comportas Concreto armado resistente à abrasão Concreto de superfícies hidráulicas sujeitas a velocidades de água superiores a 12m/s
I	30	90	1.645	$a/c_{equiv} \leq 0,60$	Concreto de superfícies hidráulicas resistente à abrasão, equivalente à classe H, porém com $a/c_{equiv} = 0,53$
J	35	28	1.645	$a/c_{equiv} \leq 0,45$	Longarinas protendidas da ponte sobre o canal de fuga de Belo Monte
L	52	28	1.645	$a/c_{equiv} \leq 0,45$	Segundo estágio dos blocos de apoio do conduto forçado
M	25	60	1.645	$a/c_{equiv} \leq 0,45$	Curvas inferiores do conduto forçado
CCR	8	180	0,842	...	Tomada D'Água de Belo Monte de Muros Laterais Direito e Esquerdo, até elevação 60,50 m

Fonte: Bandeira *et al.*, 2017.

Na Tabela 9, os requisitos para os concretos destinados às estruturas das obras principais de Belo Monte foram estratificados segundo classes de concreto que estabelecem resistências características mínimas à compressão axial a ser atingida em determinadas idades. Dentro de cada classe são também especificados conforme sua destinação e segundo as diferentes tolerâncias de percentual de resultados inferiores às resistências mínimas especificadas. Estas são representadas pelo valor do parâmetro *t* de *Student*.

As relações 1:m de cimento: aglomerante total foram estabelecidas buscando cobrir as faixas de resistências especificadas em projeto. Considerando que devem ser feitos estudos para cada combinação de dimensão máxima característica do agregado graúdo e tipo de lançamento, convencional ou bombeado. Neste estudo será especificado o concreto convencional.

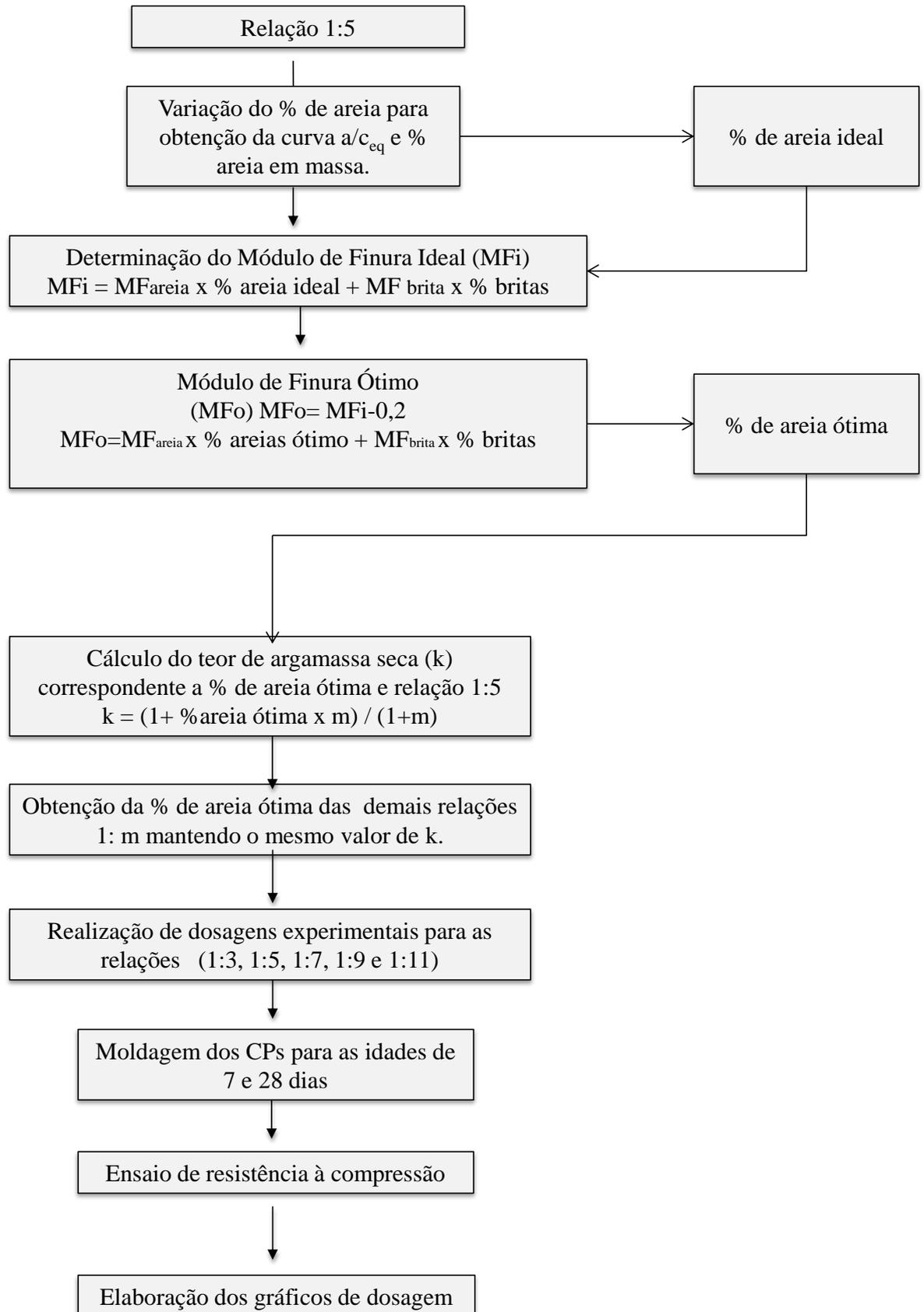
Para realização do estudo de dosagem tem-se a necessidade de verificar aos seguintes aspectos: agregados que serão utilizados; porcentagem de classe dos agregados miúdos e graúdos; massa específica do material cimentício e dos agregados; módulo de finura dos agregados; porcentagem de aditivo em relação ao cimento equivalente, bem como a porcentagem de reposição do cimento equivalente por material cimentício (sílica ativa). Conforme preconizado por Andrade *et al.* (1981) os agregados escolhidos para o estudo de dosagem precisam ser devidamente caracterizados (conforme já explanado no item 3.2.1 do Capítulo 3).

Assim sendo, deve-se a princípio estabelecer uma relação *cimento: agregado total*, em massa, baseado nas Dimensões Máximas Características (DMC) dos agregados. A partir destas relações, procede-se a realização das dosagens experimentais a fim de definir o teor de areia ideal, variando-a dentro de uma determinada faixa.

Após a determinação das porcentagens de areia ótimas, tem-se a execução das dosagens experimentais para as relações ótimas cimento: agregado total (em massa) e a moldagem dos corpos de prova. Nesta etapa, algumas vezes é necessário o ajuste de um determinado traço que está sendo estudado. Neste caso, o abatimento medido pelo tronco de cone, e a porcentagem de ar incorporado, são fixados pelas especificações.

Seguidamente ao acerto de cada mistura, tem-se o cálculo da composição da massa, sendo utilizadas as fórmulas clássicas, usadas também para o método do IPT (consumo de cimento, massa específica teórica do concreto, peso unitário e ar incorporado teórico). Por meio de parâmetros determinados com os concretos frescos e endurecidos, obtém-se as curvas de dosagens que fornecem os traços teóricos de dosagem para atender as especificações de projeto. O fluxograma evidenciado na Figura 21 sintetiza o método de dosagem MMF.

Figura 21 - Fluxograma do Método do Módulo de Finura para dosagem de concreto.



Fonte: Próprio Autor.

3.3.1 Composição ideal dos agregados

Previamente ao início das dosagens do estudo, foram determinados os percentuais relativos entre os agregados graúdos constituintes a fim de se buscar o melhor preenchimento de vazios e melhor empacotamento entre as partículas mediante a determinação da composição ideal entre elas. Essa composição ideal foi determinada de acordo com o recomendado por Helene e Terzian (1992).

Neste procedimento as britas cujo $D_{máx}$ são respectivamente 38mm e 19 mm foram combinados em diversas frações e a massa unitária no estado compactado de cada combinação determinada de acordo com as especificações da ABNT NBR 7810:1983.

Para execução do método, em um recipiente com volume e massa previamente conhecido, foram dispostas três camadas do agregado e aplicado 25 golpes em cada camada. Sendo a amostra rasada e nivelada e posteriormente pesada. A composição é considerada ideal quando o valor obtido para a massa unitária é máximo. A Figura 22 demonstra as etapas do ensaio realizado.

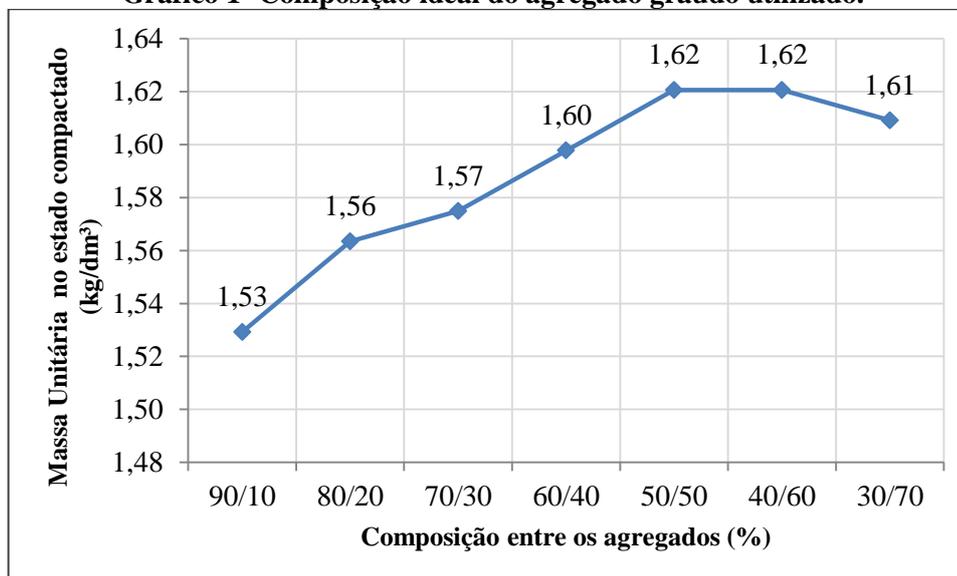
Figura 22- Etapas do ensaio de composição ideal dos agregados.



Fonte: Próprio Autor.

Para determinação da composição ideal através da massa unitária no estado compactado seco para as proporções entre os agregados $D_{máx}$ 38mm/19mm obtiveram-se os resultados expressos no **Gráfico 1**.

Gráfico 1- Composição ideal do agregado gráudo utilizado.



Fonte: Próprio Autor.

Como pode ser observado no **Gráfico 1**, o maior valor de massa unitária no estado compactado corresponde a $1,62 \text{ kg/dm}^3$ para as composições entre os agregados $D_{máx}$ 38mm/19mm em porcentagem 50/50 e 40/60. Considerando a característica de adotar agregados de maiores dimensões para barragens optou-se em adotar a proporção 50/50 para os traços de concreto elaborados.

3.3.2 Procedimento do estudo de dosagem

O estudo de dosagem iniciou com o estabelecimento de uma faixa de relações em massa cimento:agregado total variando de 1:3 a 1:11, visando o atendimento dos requisitos de resistência e trabalhabilidade. Optou-se em definir e manter constante a trabalhabilidade das misturas. Desta maneira, para a realização do controle da trabalhabilidade, foi estabelecida para este estudo a faixa de $(60 \pm 10) \text{ mm}$. Para incorporação de ar foi estabelecida a faixa de $3\% \pm 1\%$ para todos os concretos, visando melhoria na trabalhabilidade, sem afetar sensivelmente a resistência.

A Tabela 10 apresenta os valores recomendados para estabelecimento da faixa de ar incorporado e abatimento dos concretos para barragens, conforme FURNAS, 2003.

Tabela 10 - Limites para o ar incorporado e abatimento no tronco de cone.

Tipo de Concreto	Dimensão Máxima Característica	Faixa de Ar Incorporado (%)	Abatimento (mm)
Convencional	25 mm	2 a 4	60 a 80
	50 mm		
	76 mm	5 a 7	30 a 50
Bombeado	25 mm	2 a 4	100 a 130
	50 mm		

Fonte: FURNAS, 2003.

Este estudo foi conduzido considerando a utilização de areia natural e de agregado graúdo com Dmax 19 mm e 38 mm. Portanto, a percentagem de classe para a areia natural é 100% e para o agregado graúdo, conforme obtido no método de composição ideal proposto por Helene e Terzian (1992), corresponde à proporção de 50/50. Para o estudo de dosagem foi também estabelecido o percentual de substituição de cimento por sílica ativa de 8% e o percentual de aditivo incorporador de ar relativo à massa de cimento equivalente igual a 0,05%.

Vale observar que a escolha da utilização de cimento CPIV contendo 8% de sílica ativa se deu devido esta composição ter apresentado um desempenho ligeiramente superior na mitigação das reações de expansão dos agregados (RAA).

Foi escolhida uma relação intermediária 1:5, para iniciar o estudo de dosagens experimentais, com a definição da percentagem ideal de areia, correspondente ao menor consumo de água e maior resistência do concreto, obtida com dosagens com variação do percentual de areia em massa.

A percentagem de areia mínima, obtida da curva que correlaciona as % de areia com a/c resultante das dosagens experimentais estudadas, que resulta em menor relação água/cimento (a/c) e melhor aspecto, resulta na percentagem de areia ideal da mistura. Com este valor calcula-se o valor do Módulo de Finura da Mistura Ideal (MFi) através da Equação 18:

$$MFi = MF_{areia} \times \%areiaideal + MF_{brita} \times \%britas \quad (18)$$

Onde:

MFi é o módulo de finura ideal da mistura;

MF é o módulo de finura dos agregados.

Para absorver pequenas variações granulométricas dos agregados durante a produção do concreto, subtrai-se 0,2 do Módulo de Finura da Mistura Ideal (MFi) e com base neste Módulo de Finura da Mistura Ótima (MFo), encontra-se a percentagem de areia da mistura ótima. Definiu-se o teor de argamassa seca pela relação expressa na Equação 19. Fixando o valor de k encontra-se então as percentagens ótimas de areias das outras relações 1:m.

$$k = \frac{(1 + a)}{(1 + m)} = \frac{(1 + \% \text{ areia} \times m)}{(1 + m)} \quad (19)$$

Onde:

k é o teor de argamassa seca.

m é a massa total de agregado.

% areias é a percentagem de areia em relação à massa de agregado total.

As dosagens experimentais correspondentes às percentagens ótimas de areias das outras relações em peso (1:m) do estudo foram então executadas para avaliação do comportamento das misturas. Para os ajustes das dosagens experimentais procedeu-se o proporcionamento da água da dosagem para o alcance da faixa de abatimento previamente estabelecida. Os valores alcançados foram tabelados obtendo os dados de composição das dosagens experimentais.

3.3.3 Preparação e moldagem dos corpos de prova

Para a produção dos CPs, foi utilizada uma betoneira estacionária de eixo inclinado com capacidade nominal de 150 litros. Anteriormente a mistura de cada traço, o interior da betoneira foi umedecida e seguidamente realizado a imprimação. Os materiais foram colocados na betoneira seguindo esta ordem: 100% de agregado graúdo e miúdo mais 50% de água (sem aditivo); 100% de aglomerante; 50% de água e aditivo. Com todos os materiais no interior da betoneira, foi realizada a mistura por 3 minutos, seguido de um período de descanso de 3 minutos e mais 2 minutos de mistura. Os concretos foram produzidos utilizando os mesmos procedimentos, sequência e tempo de mistura.

Seguindo as diretrizes estabelecidas no programa experimental, foram moldados dois corpos de prova para cada variável e idade de controle analisadas. Em virtude do tamanho dos agregados utilizados atingindo $D_{m\acute{a}x}$ referente a 38 mm, os concretos foram moldados em corpos-de-prova cilíndricos de dimensões 15 cm x 30 cm, atendendo o requisito preconizado pela ABNT NBR 5738:2015 em que a dimensão básica do corpo de prova deve ser no mínimo três vezes maior que a dimensão nominal máxima do agregado graúdo do concreto.

Para a execução da moldagem foi utilizado o adensamento manual, seguindo as diretrizes da norma ABNT NBR 5738:2015. Após o procedimento de moldagem, os CPs foram cobertos e protegidos por uma fina película plástica durante aproximadamente 24 horas, com a finalidade de evitar perda de água do concreto, sendo mantidos na sala de dosagem neste intervalo. Decorrido este período os corpos de prova foram retirados dos moldes sendo, então, colocados na câmara úmida, com umidade relativa superior a 95% e temperatura de $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$, até o momento de realização de cada ensaio. A **Figura 23** mostra o processo de moldagem dos corpos de prova.

Figura 23- Moldagem dos corpos de prova.



Próprio Autor.

3.4 ENSAIOS DAS PROPRIEDADES TECNOLÓGICAS DO CONCRETO

Realizou-se a caracterização das propriedades tecnológicas definidas para este trabalho visando com isso avaliar o comportamento dos diversos traços de concreto estudados em relação às propriedades no estado fresco e endurecido.

3.4.1 Propriedades do concreto no estado fresco

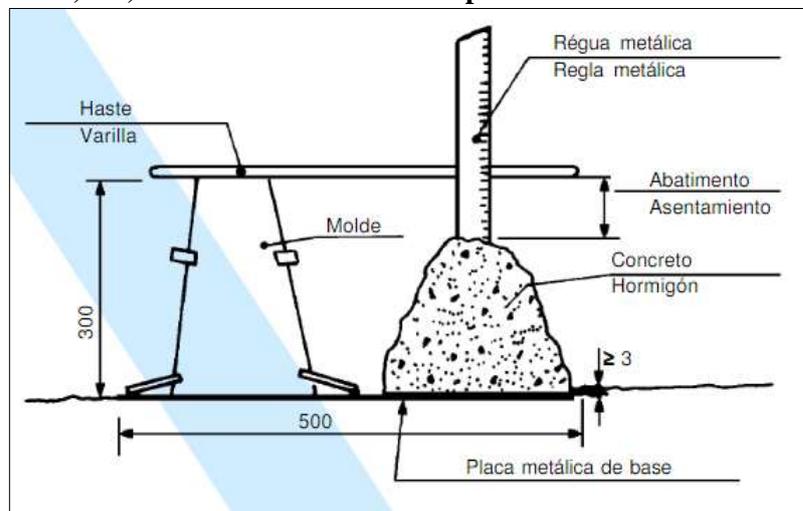
Durante a execução das dosagens foram realizados os ensaios para determinação das propriedades tecnológicas do concreto no estado fresco, uma vez que algumas características responsáveis pela qualidade final do concreto devem ser verificadas neste estágio do processo. Dentre as características que podem atestar a qualidade do concreto no estado fresco tem-se: o teor de ar incorporado, a trabalhabilidade, a coesão, a segregação e a exsudação.

3.4.1.1 Ensaio de abatimento do tronco de cone (*Slump Test*)

O ensaio de abatimento do tronco de cone (*Slump Test*) mede a consistência e a fluidez do material, permitindo o controle da uniformidade do concreto. Assim, este ensaio destaca-se entre os mais utilizados que indicam indiretamente a trabalhabilidade dos concretos convencionais e bombeados, sendo regulamentado, no Brasil, pela ABNT NBR NM 67:1998.

Em conformidade com as prescrições desta norma, o ensaio para determinação da consistência do concreto no estado fresco foi executado após o término das misturas dos concretos. Sendo realizado o preenchimento do molde distribuído em três camadas e cada uma delas compactada com 25 golpes da haste de adensamento. Realizou-se então, a retirada do molde com movimento constante e imediatamente após foi medido o abatimento do concreto com o uso da régua. Este parâmetro é determinado pela diferença entre a altura do molde e a altura média do concreto desmoldado (Figura 24).

Figura 24- a) e b) Consistência do concreto pelo abatimento do tronco de cone.



Fonte: ABNT NBR NM 67:1998

3.4.1.2 Determinação da massa específica do concreto

Mehta e Monteiro (2008) afirmam que a massa específica do concreto no estado fresco depende da massa específica do agregado e da sua porosidade, bem como da sua textura, forma e tamanho. Diante disso, a determinação da massa específica dos concretos foi realizada em conformidade com a norma técnica ABNT NBR 9833:2008.

Para tal ensaio foi utilizado um recipiente cilindro metálico com dimensões determinadas em norma. Este recipiente foi preenchido com três camadas de concreto sendo aplicados 30 golpes em cada camada, e posterior rasamento da superfície do concreto. A massa específica foi obtida pela divisão da massa do concreto (massa total – massa do recipiente), pelo volume do recipiente. A Figura 25 mostra a realização da pesagem do conjunto recipiente e concreto.

Figura 25 - Determinação da massa específica do concreto no estado fresco.



Fonte: Próprio Autor.

3.4.1.3 Determinação do teor de ar incorporado

O ar incorporado representa uma importante característica à qualidade final do concreto, sendo, portanto necessário obter um teor que não reduza significativamente sua resistência mecânica e que garanta sua durabilidade. A determinação do teor de ar no concreto fresco foi realizada pelo método pressométrico, segundo a norma técnica ABNT NBR NM 47:2002.

Para realização do ensaio utilizou-se o sistema o qual foi realizado a determinação da massa específica, composto por recipiente preenchido com concreto, adensado manualmente e a superfície devidamente rasada. O recipiente contendo a mistura foi então fechado por meio de tampa provida de válvulas de ar, chaves para injeção e saída de água e manômetro para medição de pressão (Figura 26). Desta maneira, na saída do ar, os manômetros detectam o teor liberado e indicam o percentual de ar na mistura, sendo que o teor de ar medido refere-se a todo ar presente no concreto, ou seja, a soma do ar aprisionado e o ar incorporado.

Figura 26- Sistema para medição do teor de ar incorporado no concreto.



Fonte: Próprio Autor.

3.4.2 Propriedades do concreto no estado endurecido

3.4.2.1 *Ensaio de resistência à compressão axial*

As avaliações das propriedades de resistência do concreto foram determinadas por meio do ensaio de compressão axial, conforme ABNT NBR 5739:2007. Após sujeitos às condições do processo de cura em câmara úmida, para realização do ensaio as faces do corpo de prova foram capeadas de forma a regularizar seus topos, proporcionando a distribuição uniforme da carga na amostra. Este capeamento foi realizado utilizando enxofre aquecido.

Ao alcançar as idades previstas para os ensaios (7 e 28 dias) e posterior preparação dos mesmos, os corpos de prova foram levados à prensa universal WOLPERT 300 D 74 para a realização do ensaio de compressão (Figura 27), observando-se os procedimentos descritos na norma. O procedimento de ensaio recomenda que o corpo de prova seja cuidadosamente

centralizado no prato inferior da máquina de ensaio e a carga aplicada de forma contínua e sem choques, de acordo com a velocidade normativa.

Figura 27 – Ensaio de resistência à compressão em prensa universal.



Fonte: Próprio Autor.

A resistência à compressão do corpo-de-prova de concreto é calculada através da Equação 20.

$$f_c = \frac{4 \times F}{\pi \times D^2} \quad (20)$$

Onde:

f_c é a resistência à compressão (MPa);

F é a força máxima alcançada na prensa (N);

D é o diâmetro do corpo-de-prova (mm).

3.4.3 Composição das dosagens

Para composição das dosagens tem-se os dados resultantes das dosagens experimentais realizadas. Os traços são ajustados e feitas as correções de volume para resultar 1000l (1m³), sendo o abatimento medido pelo tronco de cone (slump test) e a porcentagem de ar incorporado fixados pelas especificações para cálculo dos ajustes.

Após o acerto de cada mistura procede-se ao cálculo de sua composição, a partir do cálculo do consumo de cimento, que é expresso por duas fórmulas que quantificam: a) Consumo Teórico (Equação 21); b) Consumo Prático (Equação 22); c) Massa Específica Teórica do Concreto (Equação 23); d) Massa Específica do Concreto (Equação 24); e) Ar Incorporado Teórico (Equação 25).

$$Ct = \frac{1000 - (1 - \alpha)}{\frac{A}{C} + \frac{1}{\gamma c} + \frac{a}{\gamma a} + \frac{p}{\gamma p}} \quad (21)$$

$$Cp = \frac{me}{a/c + 1 + m} \quad (22)$$

$$\gamma t = \frac{a/c + 1 + m}{a/c + \frac{1}{\gamma c} + \frac{a}{\gamma a} + \frac{p}{\gamma p}} \quad (23)$$

$$Me = \frac{M}{V} \quad (24)$$

$$\alpha t = \frac{gt - me}{gt} \times 100 \quad (25)$$

Onde:

C é a massa de cimento m³ (kg);

A é a massa de água por m³ (kg)

γ é a massa específica de cada material (kg/m³)

M é a massa do concreto utilizada no ensaio (kg)

V é o volume do recipiente adotado (dm³)

αt é o teor de ar incorporado (%)

Vale destacar que o ar incorporado a ser o ar incorporado a ser utilizado na expressão do consumo teórico será a média do ar incorporado teórico e do ar incorporado medido pelo aparelho medidor de ar, assim como o consumo de cimento também será expresso pela média dos teores calculados.

.O cálculo da água unitária é feito multiplicando-se o consumo de cimento pela relação a/c estabelecida, enquanto o cálculo dos agregados é feito a partir do consumo de cimento a (agregado/cimento).

3.4.3.1 Gráficos de dosagem

A elaboração dos gráficos de dosagem é extremamente importante para elaboração do estudo de dosagem, pois fornece uma visão geral das correlações entre os parâmetros de dosagem. Neste sentido, os dados dos concretos fresco e das resistências à compressão axial foram tabelados, servindo de base para a construção de gráficos, que permitirão obter as dosagens para a obra. Com estas informações foram obtidos informações para a construção dos seguintes gráficos:

1. Resistência à compressão axial *versus* módulo de finura.
2. Resistência à compressão axial *versus* relação água/cimento equivalente.
3. Módulo de finura *versus* água unitária.
4. Módulo de finura *versus* % areias em massa.
5. % areias em massa *versus* % areias em volume.

Para elaboração destes gráficos têm-se as resistências à compressão axial obtidas pelas rupturas dos corpos de prova moldados durante as dosagens experimentais, bem como o Módulo de Finura relativo ao agregado total de cada dosagem experimental, correspondente à soma dos produtos dos módulos de finura de cada agregado por sua percentagem em relação ao agregado total. Adotando também o cimento equivalente da composição e a água unitária relativa ao consumo de água por m³ de concreto.

3.4.3.2 Composição dos concretos

Para composição das dosagens a partir dos gráficos de dosagem, primeiramente deve ser feita a consideração de cada resistência característica à compressão (f_{ck}) e respectiva idade de controle e o cálculo da resistência de controle (f_{cj}), que é a resistência mínima esperada das amostras da dosagem e que pode ser feito segundo o Guia ACI 214R-11 (Equação 26) ou com base na norma técnica ABNT NBR 12655:2015 (Equação 27).

$$f_{cj} = \frac{f_{ck}}{(1 - t \times v)} \quad (26)$$

$$f_{cj} = f_{ck} + t \times Sd \quad (27)$$

Onde:

f_{cj} é a resistência de controle (MPa);

f_{ck} é a resistência característica à compressão (MPa);

t é o coeficiente estatístico *t de Student*, que define tolerância de projeto para percentual de resultados de resistência inferiores a f_{ck} . Normalmente são usados em usinas hidrelétricas:

$t = 1,645$ (tolerância de $\leq 5\%$ resultados inferiores a f_{ck} ;

$t = 1,282$ (tolerância de $\leq 10\%$ resultados inferiores a f_{ck} ;

$t = 0,842$ (tolerância de $\leq 20\%$ resultados inferiores a f_{ck} .

v = coeficiente de variação, arbitrado em 15% inicialmente;

Sd é o desvio padrão, de acordo com a NBR 12655. Para Usinas Hidrelétricas, Condição de Preparo A, corresponde a $Sd = 4$ MPa.

Para o presente estudo utilizou-se a Equação 27 conforme ABNT NBR 12655:2015. Vale ressaltar que os valores definidos para usinas hidrelétricas foram obtidos de um documento que apresenta os critérios gerais de projeto civil para o desenvolvimento de projetos de usinas hidrelétricas, divulgado pela Eletrobrás em parceria com o Comitê Brasileiro de Barragens. Este documento foi divulgado no ano de 2003.

Com a resistência esperada do concreto na idade de controle, determina-se nos gráficos do estudo de dosagens os parâmetros necessários para calcular a composição da dosagem. A partir da resistência esperada na idade de controle obtêm-se o valor do módulo de finura do agregado total e a relação água/cimento equivalente. A partir do módulo de finura determina-se a água unitária. A % de areias em massa é determinada com base no módulo de finura e a % de areias em volume, é obtida a partir da % de areias em massa.

Das informações obtidas dos gráficos do estudo de dosagens para a composição do concreto, apenas a massa de água unitária foi obtida diretamente e as restantes massas de materiais foram calculadas indiretamente. Assim sendo, a massa de cimento na composição da dosagem é calculada dividindo-se o valor referente à água unitária pela relação água/cimento equivalente da mistura.

Para determinação da composição dos materiais utiliza-se o conceito de que o m^3 de concreto é constituído por um volume de pasta e um volume de agregados. Portanto o volume de pasta compreende os volumes de cimento, água e ar, desta maneira têm-se as Equações 28 e 29.

$$V_p = V_{cim} + V_{\text{água}} + V_{ar} \quad (28)$$

$$V_p = \frac{C}{\gamma_{cim}} + AU + V_{ar} \quad (29)$$

Onde:

V_p = Volume de pedra (m^3);

V_a é o volume de água (m^3);

V_{ar} é o volume de ar incorporado (m^3);

AU é a massa de água unitária (kg)

Por conseguinte, o volume total de agregados corresponde ao volume restante do m^3 de concreto. A distribuição dos volumes de agregados é feita com base na percentagem de areia em volume. O produto da percentagem de areia pelo volume de agregados corresponde ao volume de agregados da mistura, e conseqüentemente o restante equivale ao volume de britas da composição de dosagem.

A partir dos volumes dos agregados, são calculadas suas massas, ao multiplicar pela massa específica do material. O traço final da dosagem por m^3 de concreto será dado pela seguinte relação: “massa de cimento: massa da areia: massa das britas: água unitária”.

4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS

4.1.1 Caracterização física do agregado miúdo

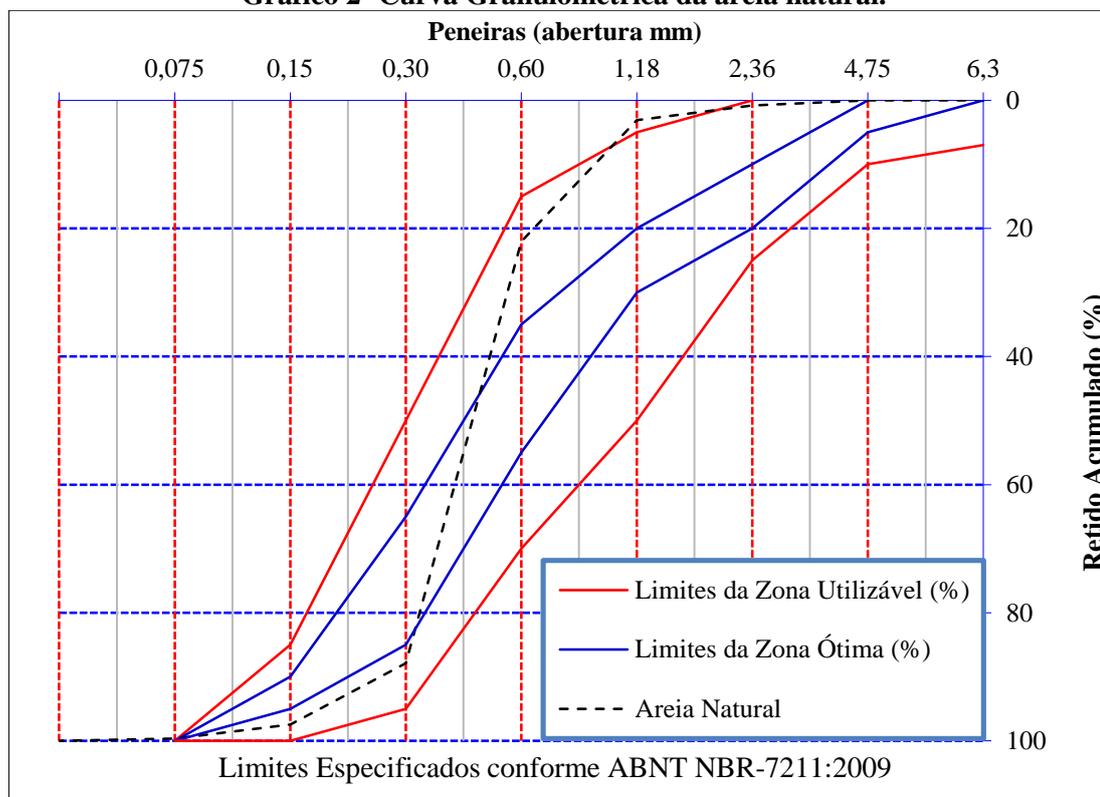
Os resultados da caracterização do agregado miúdo em estudo (areia natural extraída do leito do rio Tocantins) para a verificação da viabilidade da utilização nas dosagens está apresentado na Tabela 11, enquanto que no Gráfico 2 pode ser observada a curva granulométrica do material, as quais foram elaboradas a partir das porcentagens retidas acumuladas e os limites aceitáveis para concretos, indicados pela ABNT NBR 7211:2009.

Tabela 11 - Características físicas da areia natural.

Ensaio	Método	Resultados
Diâmetro máximo (DMC) (mm)	NBR NM 248 (2003)	1,19
Módulo de finura (%)	NBR NM 248 (2003)	2,11
Massa específica (g/cm³)	NBR NM 52(2009)	2,67
Massa Unitária (g/cm³)	NBR NM 45(2006)	1,58
Absorção de água (%)	NBR NM 30 (2001)	0,27
Sanidade ao ataque de Na₂SO₄ (%)	ASTM C 88 (2005)	3,01
Teor de argila (%)	NBR 7218(2010)	1,07
Determinação de impurezas orgânicas (%)	NBR NM 49(2001)	Coloração mais clara que a solução padrão.

Fonte: Próprio Autor.

Gráfico 2- Curva Granulométrica da areia natural.



Fonte: Próprio Autor.

Os resultados da caracterização física da areia (Tabela 11) revelam que a mesma apresenta DMC igual a 1,19 e MF correspondente a 2,11. Segundo Fusco (2012), o MF indica a classificação das granulometria dos agregados: areia grossa ($MF > 3,9$), areia média ($2,4 < MF < 3,9$) e areia fina ($MF < 2,4$). Neste caso, a amostra analisada enquadra-se na classificação referente à areia fina. Vale ressaltar que os valores do MF obtidos serão importantes na etapa do estudo de dosagem, uma vez que serão necessários para determinação dos módulos de finura ideais e ótimos e respectivos teores de areia dos concretos a serem dosados.

Com base no Gráfico 2 foi possível verificar que areia utilizada no presente estudo encontra-se dentro dos limites da zona utilizável para concretos de cimento Portland, conforme classificação da NBR 7211:2009.

Os valores encontrados para as massas específica e unitária foram $2,67 \text{ g/cm}^3$ e $1,58 \text{ g/cm}^3$. Destaca-se que as massas específica e unitária dos agregados (graúdo e miúdo) são essenciais para a etapa de dosagem, pois por meio da massa específica pode-se calcular o consumo de materiais utilizados na produção dos concretos e por meio do resultado da massa unitária é possível analisar o grau de adensamento e de compactidade do agregado (quantidade

de vazios existentes entre as partículas), além de calcular de conversão de massa em volume ou vice-versa.

Em relação à absorção de água, o material apresentou resultado igual a 0,27%. Quanto ao teor de argila e materiais friáveis obteve-se resultado correspondente a 1,07, atendendo o critério da ABNT NBR 7211:2009, a qual especifica o limite máximo de substâncias nocivas à massa do agregado miúdo em 3%.

Quanto à determinação de impurezas orgânicas, como pode ser observado na Figura 28 comparando a cor da solução padrão (à direita) com a solução da amostra (à esquerda), é possível verificar que a solução da amostra apresenta uma coloração mais clara que a solução padrão, o que indica a conformidade com a ABNT NBR 7211:2009 a qual estabelece que a solução obtida no ensaio deve ser mais clara do que a solução padrão.

Figura 28- Aspecto da coloração da solução padrão e solução da amostra após 24 horas.



Fonte: Próprio Autor.

4.1.2 Caracterização física dos agregados graúdos

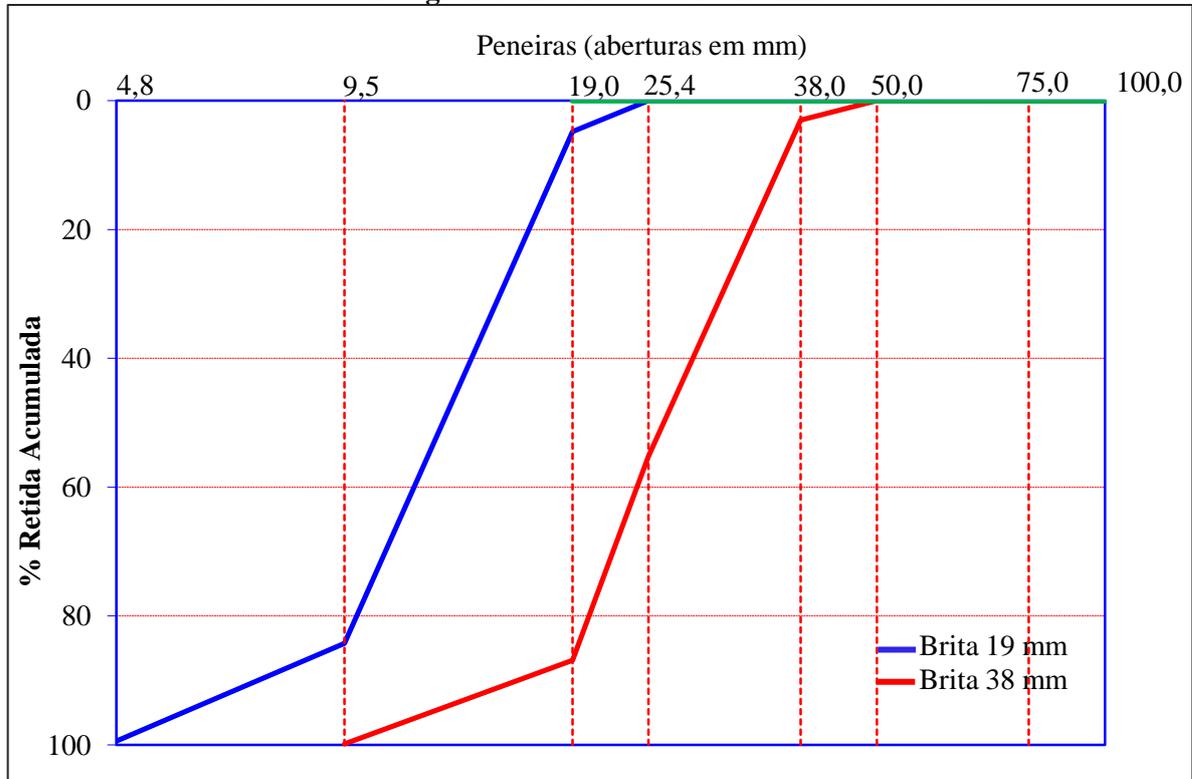
Em relação aos agregados graúdos utilizados nas dosagens experimentais estão destacados na Tabela 12 os resultados da caracterização física das britas 19 mm e 38 mm e no Gráfico 3 as curvas granulométricas obtidas.

Tabela 12 - Características físicas do agregado graúdo.

Ensaio	Método	Resultados	
		Brita 19 mm	Brita 38 mm
Diâmetro máximo (DMC) (mm)	NBR NM 248 (2003)	19	38
Módulo de finura (%)	NBR NM 248 (2003)	6,87	7,89
Massa específica (g/cm³)	NBR NM 53(2003)	2,8	2,55
Absorção de água (%)	NBR NM 53(2003)	0,47	0,25
Massa Unitária (g/cm³)	NBR NM 45(2006)	1,51	1,44
Abrasão <i>Los Angeles</i> (%)	NBR NM 51(2001)	8,72	10,85
Sanidade ao ataque de Na₂SO₄ (%)	ASTM C 88 (2005)	1,24	1,24
Índice de Forma	NBR 7809(2006)	3,0	3,0

Fonte: Próprio Autor.

Gráfico 3 - Curva granulométrica da brita 19 mm e brita 38 mm.



Fonte: Próprio Autor.

O DMC obtido para os agregados graúdos foi de 19,0 mm (brita 19 mm) e 38,0 mm (brita 38mm), enquanto que os valores de MF foram iguais a 6,87 (brita 19 mm) e 7,89 (brita 38 mm). Quanto maior o DMC, menor será o consumo de cimento, uma vez que a área superficial total dos grãos dos agregados será menor. Portanto Pimenta (2007) ressalta que existem casos em que esta regra não se aplica, havendo muitos exemplos em que concretos com agregados maiores resultaram em um maior consumo de cimento, comparativamente a concretos com agregados de menores dimensões.

Os valores encontrados para as massas específica e unitária dos agregados graúdos foram: 2,8 g/cm³ e 1,51 g/cm³ (brita 19mm); 2,55 g/cm³ e 1,44 g/cm³ (brita 38 mm), e para absorção de água obteve-se os valores de 0,47 % (brita 19 mm) e 0,25% (brita 38mm).

KUPERMAN (2005) relata que a massa específica e absorção são muito relevantes para agregados graúdos de barragens, devendo assim, possuir adequada massa específica (em média 2,65 g/m³) e baixa absorção de água (menor que 0,5%), uma vez que a primeira está relacionada à estabilidade de estruturas tipo gravidade e influi diretamente no perfil da barragem e no volume de concreto; a segunda influi no controle da água da mistura e no consumo de cimento.

Se comparados os resultados encontrados para os agregados graúdos em estudo com os valores propostos por Kuperman (2005), estes podem ser considerados aceitáveis para utilização como agregados de barragens.

O índice de forma dos agregados graúdos utilizados neste estudo corresponde a 3,0. De acordo com a ABNT NBR 7211:2009 o índice de forma dos agregados não deve ser superior a 3, quando determinado de acordo com a ABNT NBR 7809:2006, indicando portanto, que o material apresenta conformidade com a norma. Neste aspecto, Marcondes (2009) destaca a correlação dos valores maiores que 3 indicam a lamelalidade do agregado afetando a qualidade do concreto, onde britas com partículas lamelares no concreto acumulam mais bolhas de ar e água de exsudação sob elas, o que prejudica a durabilidade e reduz a resistência do concreto.

No caso da resistência à abrasão, observou-se que as britas 19 mm e 38 mm apresentaram perda de massa de 8,72% e 10,85%, respectivamente, estando adequados porém, ao limite máximo estabelecidos pela ABNT NBR 7211:2009, menor ou igual a 50%. Vale ressaltar que esta propriedade do material é determinada pelas características da rocha de origem. Neste sentido, quanto menor o valor de resistência à abrasão, melhor é a qualidade do material no que se refere ao desgaste por impacto, indicando que o material possui grau de dureza elevado.

A avaliação de durabilidade dos agregados graúdos (frente ao ataque de solução de Na_2SO_4) foi satisfatória uma vez que a perda de massa foi igual a 1,24 %, sendo que a norma ASTM C33: 2003 limita esse valor a 12%. Quanto ao exame qualitativo, verificou-se que não houve quebras ou evidências de fendilhamento nos grãos de brita analisados (Figura 29).

Figura 29- Aspecto dos grãos após os ciclos de umedecimento e secagem.

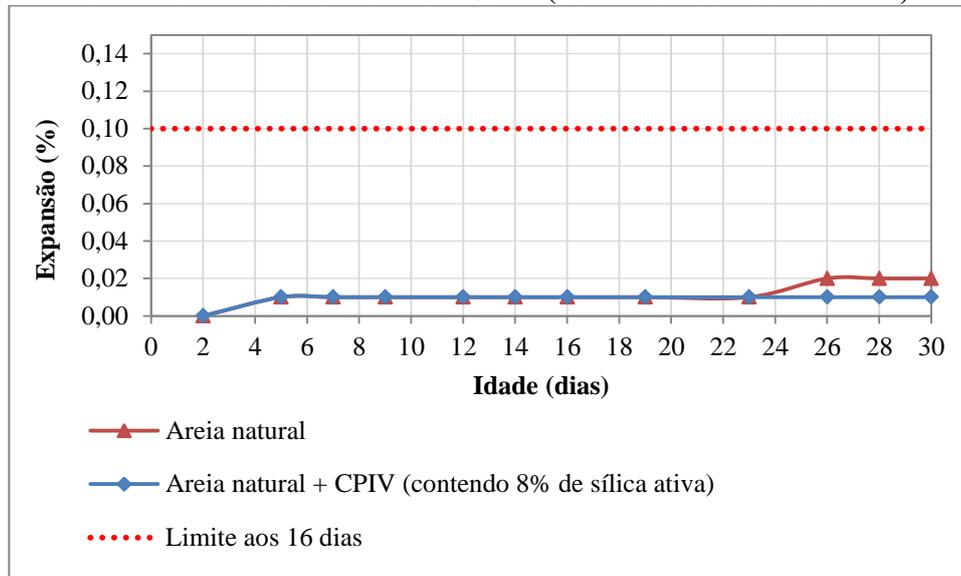


Fonte: Próprio Autor

4.1.2.1 Avaliação da Reação Álcali-Agregado (RAA)

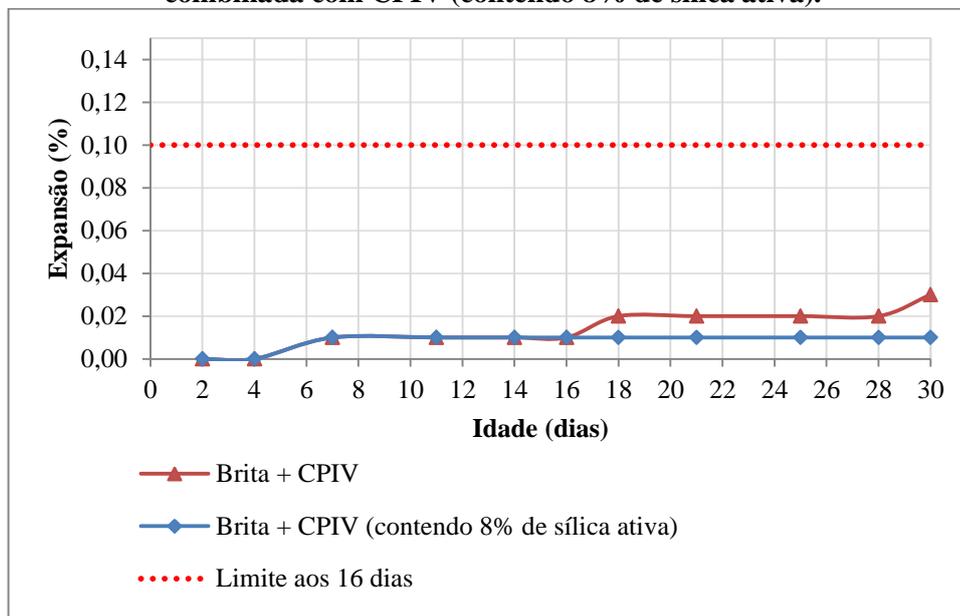
A análise referente à potencialidade de reatividade dos agregados graúdo e miúdo com os álcalis presentes no cimento utilizado baseou-se na verificação da existência de processo de expansão dos corpos de prova prismáticos. Nos Gráficos 4 e 5 encontram-se os resultados obtidos no ensaio de RAA: expansão (%) *versus* idade de imersão (dias).

Gráfico 4 - Resultados das expansões dos corpos de prova compostos por areia natural e CPIV e areia natural combinada com CPIV (contendo 8% de sílica ativa).



Fonte: Adaptado de FURNAS, 2017.

Gráfico 5 - Resultados das expansões dos corpos de prova compostos por brita e CPIV e brita combinada com CPIV (contendo 8% de sílica ativa).



Fonte: Adaptado de FURNAS, 2017.

Observa-se no Gráfico 4 que os corpos de prova dosados com a composição areia e CPIV a partir do 24º dia apresentaram maiores expansões quando comparados com as amostras compostas por areia natural e CPIV (contendo 8% de sílica ativa). O mesmo comportamento ocorreu para nas análises das amostras de brita (Gráfico 5), no qual se observou um processo de expansão dos corpos de prova a partir do 16º dia.

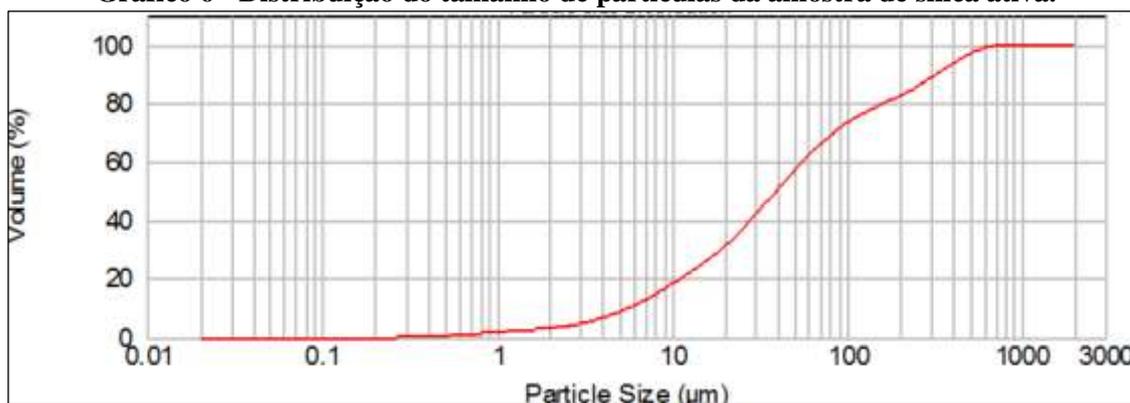
Nota-se que todas as combinações ensaiadas, apresentaram expansões caracterizadas como inócuas, uma vez que os limites indicados pela ABNT NBR 15577-1:2008 é de 0,19% aos 30 dias de idade da barra de argamassa testada; no caso do estudo de outros materiais cimentícios e/ou adições o limite passa a ser de 0,10% aos 16 dias de idade.

A inibição das expansões ocorridas nos corpos de prova contendo cimento CPIV com adição de sílica ativa já era um comportamento esperado, uma vez que a reação dos materiais pozolânicos ali presentes, neste caso a sílica ativa, serviu para neutralizar a ação dos álcalis com alguns componentes do agregado, prevenindo o desenvolvimento da RAA. O mesmo pode contribuir também para a redução dos gradientes térmicos dos concretos em barragens, servindo para redução do calor de hidratação, conforme Marques Filhos (2011). Portanto, com base nos resultados obtidos no ensaio de RAA, optou-se em utilizar na dosagem experimental dos concretos, o cimento CPIV contendo 8% de sílica ativa.

4.2 CARACTERIZAÇÃO DA SÍLICA ATIVA

A partir dos ensaios executados para caracterização da sílica ativa, referente à massa específica obteve-se valor correspondente a 2,26 g/cm³. Quanto à distribuição granulométrica, (Gráfico 6) obtido através da técnica de granulometria a laser demonstra a distribuição dos tamanhos de partículas na amostra de sílica variando entre 0,4 e 724 µm.

Gráfico 6 - Distribuição do tamanho de partículas da amostra de sílica ativa.



Fonte: Próprio Autor.

Referente à caracterização química, os resultados obtidos estão demonstrados na Tabela 13.

Tabela 13 - Composição química da sílica ativa.

Composição Química	Resultados
Dióxido de silício (SiO ₂)	95,75%
Óxido de enxofre (SO ₃)	1,727%
Óxido de fósforo (P ₂ O ₅)	0,895%
Óxido de potássio (K ₂ O)	0,731%
Óxido de cálcio (CaO)	0,726%
Óxido de zinco (ZnO)	0,068%
Óxido de ferro (Fe ₂ O ₃)	0,056%
Óxido de sódio (MnO)	0,025%

Fonte: Próprio Autor.

Conforme apresentado na Tabela 13 o constituinte dióxido de silício (SiO₂) é o componente majoritário (95,75%), outros óxido também estão presentes, contudo em quantidades inferiores, dentre eles estão: SO₃ (1,727%), P₂O₅(0,895%),K₂O (0,731%) e CaO (0,726%). Destaca-se assim, a predominância da sílica, aspecto característico de materiais pozolânicos, sendo este um fator muito importante na reatividade pozolânica.

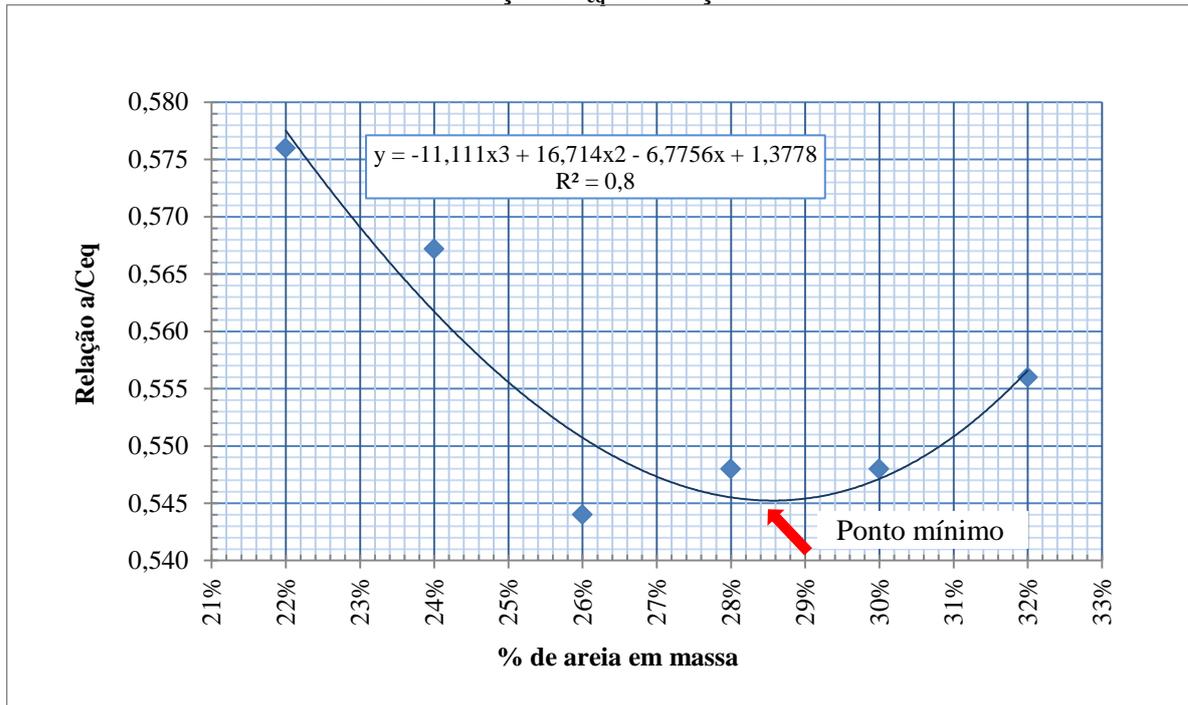
Dal Molin (1995) destaca que na Noruega o teor mínimo estabelecido pelas normas locais corresponde a 85% de SiO₂ para seu uso em concretos. No Brasil a ABNT NBR 1395-1:2012 fixa esse teor de dióxido de silício também em 85%.

Portanto, destaca-se que os resultados das características físico-químicas apresentadas para a sílica ativa, são bastante satisfatórios para seu emprego em dosagens de concreto.

4.3 ESTUDO DE DOSAGEM DO CONCRETO PELO MMF

4.3.1 Determinação do teor ideal de areia e módulo de finura ideal

Os resultados obtidos para a determinação do teor ideal de areia estão representados pelo Gráfico 7 A curva foi elaborada por meio de procedimento experimental (para a relação intermediária 1:5) a partir da variação das porcentagens de areia e da quantidade de água, mantendo-se o consumo de aglomerante constante. Neste processo, buscou-se obter o ponto mínimo da curva, que indica a menor relação a/c, sendo então este valor referente ao teor de areia ideal em massa.

Gráfico 7- Relação a/c_{eq} em função do % areia.

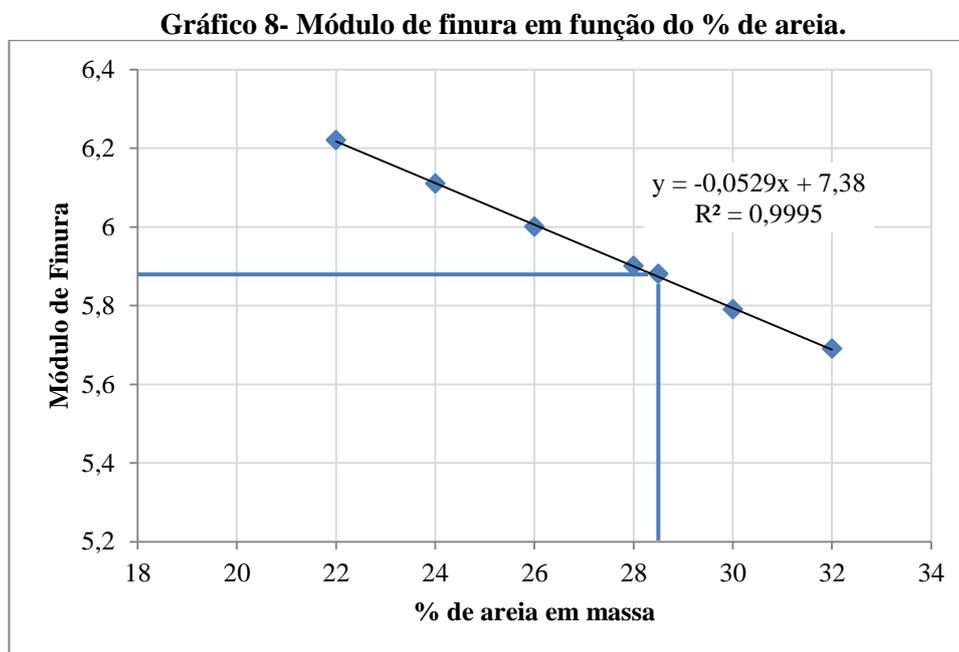
Fonte: Próprio autor.

O comportamento do concreto expresso no Gráfico 7 demonstra que à medida que o percentual de areia vai aumentando a demanda de água vai diminuindo, e isto se dá até certo ponto (ponto mínimo da curva) ocorrendo posteriormente o inverso, ou seja, maiores percentuais de areia demandam maiores quantidades de água. Este comportamento é expresso por um gráfico em parábola do qual se extrai o teor ideal de areia (e menor quantidade de água) mantendo-se a trabalhabilidade pré-definida para o estudo de dosagem (60 ± 10) mm.

Logo:

- Teor de areia ideal: 28,5%
- Relação a/c_{eq} de 0,568

Com base no teor ideal de areia (28,5%) obtém-se o módulo de finura ideal da mistura (MFi), sendo este igual a 5,878 (Gráfico 8).



Fonte: Próprio Autor.

Analisando o gráfico pode-se inferir que o MF varia linearmente com a porcentagem de areia. Desta maneira, sabe-se que uma baixa porcentagem de areia resulta concretos ásperos, enquanto porcentagens de areia altas gera excesso de argamassa, indicando então à importância da porcentagem de areia ideal a qual resulta menor relação a/c e consequentemente maior resistência à compressão, assim como garante um aspecto adequado do concreto.

4.3.2 Determinação do módulo de finura ótimo e teor de areia ótimo

A partir do MFi correspondente à porcentagem de areia ideal tem-se o módulo de finura ótimo da mistura (MFo) igual a 5,678. Para este novo módulo (MFo), obteve-se a porcentagem de areia ótima igual a 32,3 %.

O teor ótimo de argamassa seca (k) correspondente à % areia ótima para a relação 1:5 encontrado foi de 0,436. Mantendo o valor de k constante para as outras relações 1:m a serem estudadas, para que seja mantido o mesmo aspecto dos concretos, calculou-se o percentual de areia ótimo para as outras relações 1:m, inclusive a relação intermediária (1:5).

Na Tabela 14 são apresentados os percentuais de areia ótimos obtidos para o estudo do concreto massa convencional com $D_{m\acute{a}x}$ 38 mm.

Tabela 14- Determinação das porcentagens de areia ótimas para as relações 1:m.

Relação em massa (cimento: agregado total)	Módulo de Finura Ótimo (MFo)	Teor ótimo de areia (%)
1:3	6,07	24,77
1:5	5,68	32,29
1:7	5,51	35,52
1:9	5,41	37,31
1:11	5,35	38,45

Fonte: Próprio Autor.

4.3.3 Propriedades no estado fresco

Ao longo do processo do estudo de dosagem dos traços analisados (1:m) foi possível observar os seguintes aspectos:

- Valores de abatimento do tronco de cone (60 ± 10) mm e do teor de ar incorporado (3 ± 1)%. mantiveram-se dentro do intervalo estabelecido no estudo (Figura 30-a).
- Vale ressaltar também que não foram observadas indícios de segregação ou exsudação nos concretos produzidos (Figura 30-b). Neste sentido, sabe-se que em virtude da utilização de agregados de $D_{m\acute{a}x}$ elevados em concreto de barragens, deve ser tomado cuidado com a ocorrência de segregação, evidenciando a importância da composição ideal entre os agregados e a pasta de cimento.
- Observou-se que os concretos produzidos apresentaram boa coesão, representando homogeneização dos materiais (Figura 30-c). Esta característica observada para todas as composições justifica-se devido a utilização das porcentagens ótimas de areia, contribuindo na proporção de partículas miúdas na mistura, ajustando então o esqueleto granular do concreto.

- No que se refere aos valores de massa específica dos traços estudados analisados foi possível observar que se mantiveram praticamente constantes encontrando-se dentro do esperado para concretos de massa específica normal (2400 a 2500 kg/m³), conforme Watanabe, 2008.

Figura 30 - Aspecto dos concretos produzidos no estudo de dosagem: a) medição do abatimento; b) ausência de exsudação; c) avaliação da coesão do concreto.

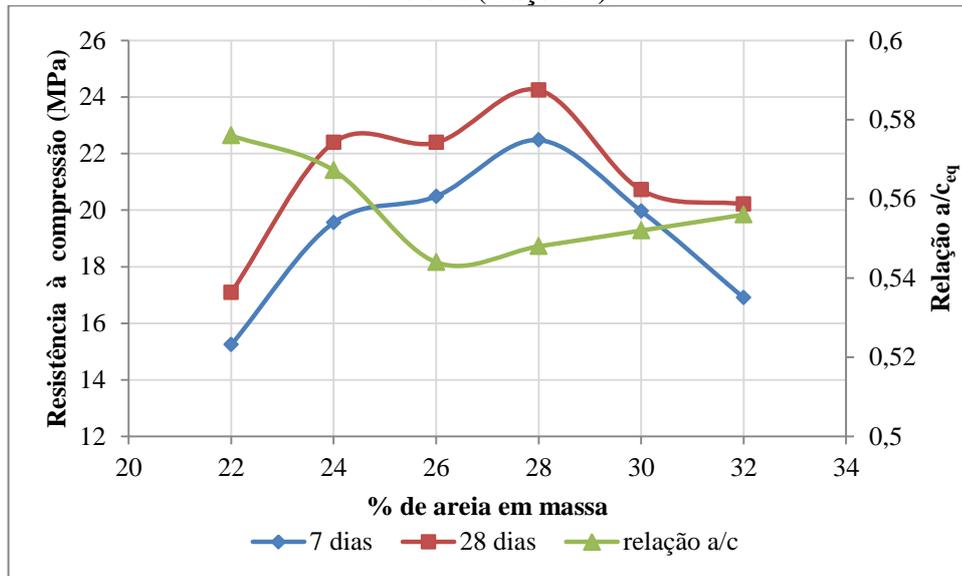


Fonte: Próprio Autor.

4.3.4 Propriedades no estado endurecido: resistência à compressão

Os resultados das resistências à compressão axial referente ao traço unitário intermediário (1:5) em função da variação da porcentagem de areia na mistura e da relação a/c_{eq} estão apresentados no Gráfico 9.

Gráfico 9- Resistência à compressão em função da variação do teor de areia e da relação a/c_{eq} na mistura (traço 1:5).



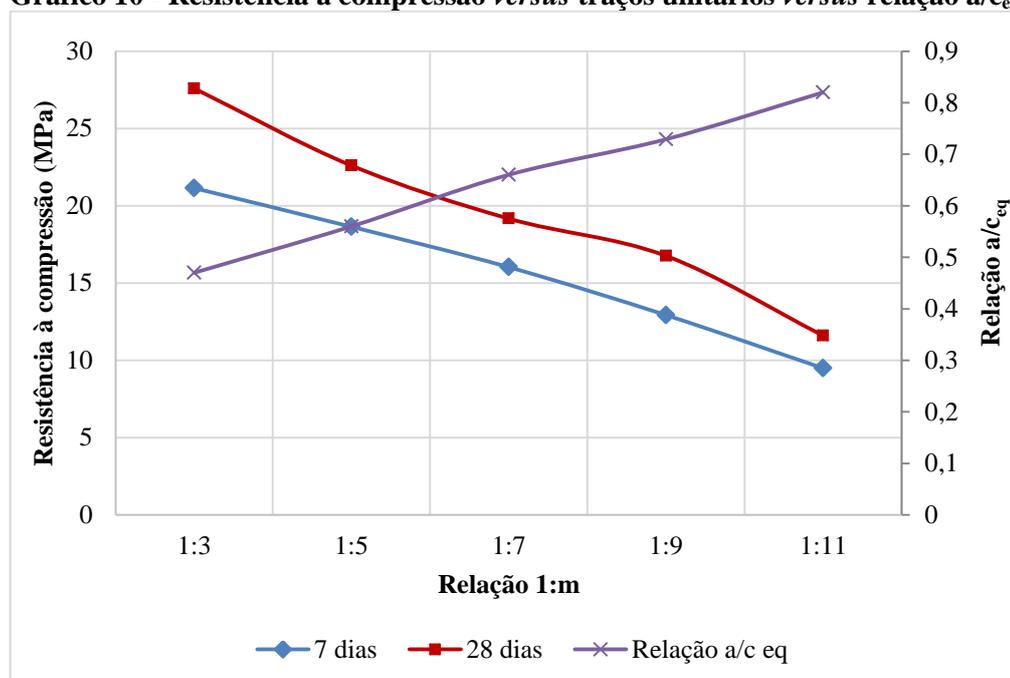
Fonte: Próprio Autor.

Os resultados a compressão para 7 dias indicaram que houve um aumento das resistências em proporção ao aumento do teor de areia, este comportamento foi atingido até um certo limite correspondente a porcentagem de areia de 28%, seguindo então para uma diminuição das resistências com o aumento da porcentagem de areia dos concretos. Para 28 dias predominou-se a mesma tendência observada em relação à idade de 7 dias.

Os valores das resistências obtidas para 7 dias se enquadram em um intervalo entre 15,24 MPa e 22,48 MPa, enquanto para a idade de 28 dias tem-se valores entre 17,09 MPa e 24,25 MPa, destacando como maior resistência obtida o valor de 24,25 MPa aos 28 dias referente a 28% de areia. No Gráfico 9 verifica-se também o comportamento atendendo a Lei de Abrams a qual dita que a resistência de um concreto é inversamente proporcional à relação água cimento.

No **Gráfico 10** estão representados os comportamento dos concretos em termos de resistência à compressão respectivamente nas idades de controle de 7 dias e 28 dias para todas as relações 1:m, bem como o fator a/c_{eq} requerido para cada relação.

Gráfico 10 - Resistência a compressão versus traços unitários versus relação a/c_{eq} .



Fonte: Próprio Autor.

Verifica-se que a relação 1:m é inversamente proporcional aos resultados de resistência à compressão, onde à medida que aumenta-se a quantidade de agregado total obtém-se valores menores de resistência. Ainda, ao se analisar a relação 1:m com a relação a/c_{eq} , observa-se uma proporcionalidade, ou seja quanto maior a quantidade de agregados totais maior será o fator a/c_{eq} .

4.3.5 Composição dos concretos

A partir do desenvolvimento do estudo de dosagem experimental pelo MMF foi possível elaborar a Tabela de composição e propriedades dos concretos na relação intermediária 1:5 (Tabela 15). Vale ressaltar que os valores indicados na referida tabela tratam-se dos resultados já refinados, levando em conta os cálculos dos consumos de todos os materiais componentes do concreto e as correções necessárias para a conversão do traço em massa para volume.

Tabela 15- Composição e propriedades - concreto estado fresco e endurecido (traço intermediário).

Concreto Massa Convencional - D _{máx} 38mm								
Traço em Massa			1:5					
Dados de Composição	Cimento equivalente		362	364	367	366	365	365
	Cimento		326	327	329	329	328	328
	Sílica Ativa		28	28	29	29	29	29
	Água		204	201	195	196	197	198
	Areia Natural	kg/m ³	389	426	465	500	535	570
	Brita 19 mm		690	675	662	643	624	606
	Brita 38 mm		690	675	662	643	624	606
	Aditivo Incorporador de Ar		0,181	0,182	0,183	0,183	0,183	0,182
	Relação a/C _{equiv}		0,576	0,567	0,544	0,548	0,552	0,556
	% argamassa s/ ar inc.	%	47,3	48,5	49,4	50,7	52,1	53,6
	% argamassa s/ ar inc.	%	48,3	49,5	50,4	51,8	53,2	54,6
	Módulo de Finura		6,22	6,11	6,01	5,90	5,79	5,69
	% de areia em massa	%	22	24	26	28	30	32
	% de areia em volume	%	21,99	23,99	25,99	27,99	29,99	31,99
Propriedades do Concreto Fresco	Abatimento (mm)	cm	40	50	50	40	60	60
	Ar incorporado	%	2,0	2,0	2,0	2,2	2,2	2,1
	Massa específica (kg/m ³)	kg/m ³	2.438	2.424	2.411	2.423	2.398	2.431
Resistência à Compressão Axial	7 dias	MPa	15,24	19,56	20,49	22,48	19,97	16,90
	28 dias	MPa	17,09	22,39	22,39	24,25	20,72	20,21

Fonte: Próprio Autor.

Já na Tabela 16 estão apresentados os dados das demais composições dos concretos baseadas nas relações 1:11; 1:9; 1:7; 1:5 e 1:3 . Vale lembrar que tais resultados foram obtidos a partir das dosagens experimentais utilizando o valor de teor de argamassa (k) fixo para obtenção dos teores ótimos de areia para cada traço unitário.

Na mesma tabela encontram-se também os resultados dos ensaios das propriedades no estado fresco e endurecido de todas as relações, bem como a composição dos materiais através dos cálculos dos consumos, ajustes e correções dos traços (massa e volume).

Tabela 16- Composição e propriedades - concreto estado fresco e endurecido.

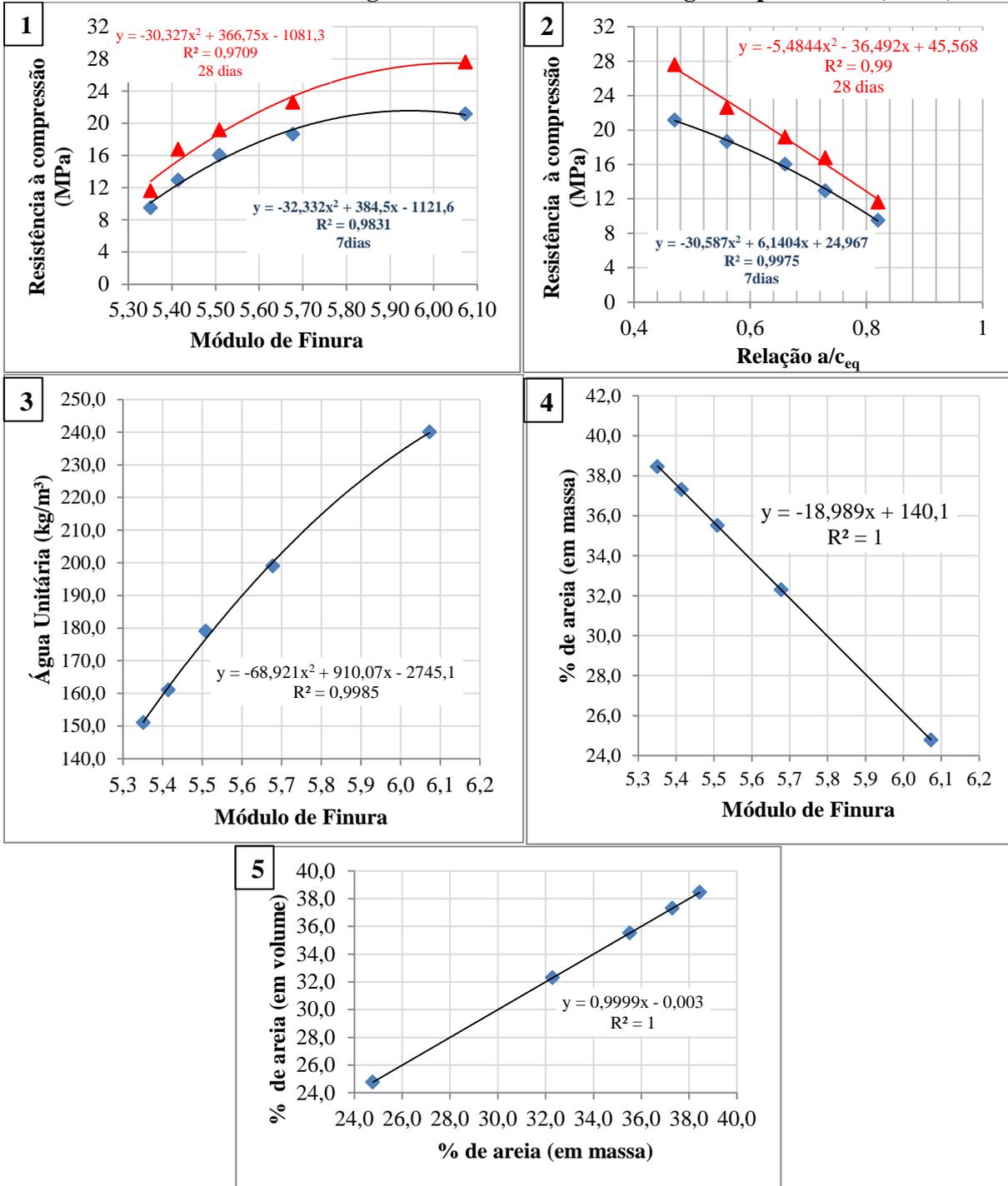
Concreto Massa Convencional - D_{máx} 38mm							
Traço em Peso		1: 11	1:9	1:7	1:5	1:3	
Dados de Composição	Cimento Equivalente	kg/m ³	189	226	278	364	522
	Cimento		170	203	250	327	469
	Sílica		15	18	22	28	41
	Água		151	161	179	199	240
	Areia Artificial		780	741	675	574	379
	Brita 19 mm		624	622	612	602	575
	Brita 38 mm		624	622	612	602	575
	Aditivo Incorporador de Ar		0,094	0,113	0,139	0,182	0,261
	Relação a/c _{equiv}		0,820	0,729	0,660	0,560	0,470
	% argamassa s/ ar inc.		%	50,7	51,5	52,6	53,8
% argamassa c/ ar inc.	%	53,2	53,4	54,1	54,9	56,9	
Módulo de Finura Ótimo		5,35	5,41	5,50	5,67	6,07	
% de areia em massa	%	38,45	37,31	35,52	32,29	24,77	
% de areia em volume	%	38,44	37,30	35,51	32,28	24,76	
Propriedades do Concreto Fresco	Abatimento (mm)	cm	40	40	40	60	60
	Ar incorporado	%	3,9	3,7	3,0	2,2	2,0
	Massa específica (kg/m ³)	kg/m ³	2.398	2.419	2.438	2.424	2.363
Resistência à Compressão Axial	7 dias	MPa	9,49	12,93	16,03	18,64	21,14
	28 dias	MPa	11,6	16,76	19,17	22,6	27,59

Fonte: Próprio Autor.

Com base nos resultados das dosagens experimentais contidos na Tabela 15 foram gerados cinco gráficos, os quais servirão de dados de entrada para a elaboração da composição dos concretos em conformidade aos requisitos de projeto apresentados na Tabela 9 (p. 69). Sendo os gráficos de dosagem obtidos:

1. Resistência à compressão axial *versus* módulo de finura.
2. Resistência à compressão axial *versus* relação água/cimento equivalente.
3. Módulo de finura *versus* água unitária.
4. Módulo de finura *versus* % areias em massa.
5. % areias em massa *versus* % areias em volume.

Gráfico 11 - Gráficos de dosagem obtidos do estudo de dosagem experimental (MMF).



Fonte: Próprio Autor.

De posse dos gráficos de dosagem foram verificadas as possíveis aplicações em concreto massa utilizáveis em hidrelétricas, de acordo com a tabela de requisitos de projeto (Tabela 17). Analisando a referida tabela fez-se a correlação das resistências obtidas no estudo de dosagem (Gráfico 11) com as resistências de dosagem na idade de controle desejada (f_{cj}):

As classes E, F, J e L poderiam ser atendidos pelo critério da idade de controle (28 dias), porém o f_{cj} calculado não está contemplado nos gráficos de dosagem 1 e 2 (Gráfico 11).

As classes A, B, C, G, H, I, M e CCR cujo parâmetro especificado para idade de controle ser maior que 28 dias (60, 90 e 180 dias) não foram passíveis de verificação devido o presente estudo de dosagem não contemplar moldagens para tais idades uma vez que o tempo disponível para o desenvolvimento da pesquisa foi restrito.

A classe de concreto atendida foi a “D” devido o valor de f_{cj} da mesma enquadrar-se nos resultados das resistências para 28 dias, conforme gráfico 1 (Gráfico 11). Logo a composição do concreto (Tabela 18) definido a partir do estudo de dosagem poderá ser aplicada: em estruturas de concreto armado dos muros e pilares de vertedouros, concreto armado e concreto sujeito a solicitações dinâmicas, bem como em superfícies hidráulicas sujeitas a velocidades de água inferiores a 4m/s.

Tabela 17 - Requisitos especificados para as classes de concreto em função da destinação.

ESPECIFICAÇÕES DE PROJETO						
REQUISITOS PARA OS CONCRETOS DAS ESTRUTURAS PRINCIPAIS						
Classe	F_{ck}	F_{cj}	Idade	t de Student	Relação água/aglomerante	Destinação
...	(MPa)	(MPa)	(dias)
A	9	12,37	90	0,842	...	Regularização de fundação em rocha Concreto massa
B	15	18,37	90	0,842	...	Impermeabilização de fundação Concreto de face CCR
B	15	20,13	90	1.282	...	Concreto armado de características massivas
C	20	25,13	90	1.282	...	Concreto armado dos muros e pilares de vertedouros
C	20	26,58	90	1.645	...	Concreto armado Concreto sujeito a solicitações dinâmicas Superfícies hidráulicas sujeitas a velocidades de água inferiores a 4m/s
D	20	25,13	28	1.282	...	Concreto armado dos muros e pilares de vertedouros
D	20	26,58	28	1.645	...	Concreto armado Concreto sujeito a solicitações dinâmicas Superfícies hidráulicas sujeitas a velocidades de água inferiores a 4m/s

E	25	31,58	28	1.645	...	Concreto armado Peças pré-moldadas Superfícies hidráulicas sujeitas a velocidades de água entre 4m/s e 12m/s Concreto protendido
F	30	36,58	28	1.645	$a/c_{equiv} \leq 0,45$	Concreto de segundo estágio de guias de comportas Peças pré-moldadas Concreto protendido Concreto armado resistente à abrasão Concreto de superfícies hidráulicas sujeitas a velocidades de água superiores a 12m/s
G	25	31,58	90	1.645	...	Concreto armado Superfícies hidráulicas sujeitas a velocidades de água entre 4m/s e 12m/s
H	30	36,58	90	1.645	$a/c_{equiv} \leq 0,45$	Concreto de segundo estágio de guias de comportas Concreto armado resistente à abrasão Concreto de superfícies hidráulicas sujeitas a velocidades de água superiores a 12m/s
I	30	36,58	90	1.645	$a/c_{equiv} \leq 0,60$	Concreto de superfícies hidráulicas resistente à abrasão, equivalente à classe H, porém com $a/c_{equiv} = 0,53$
J	35	41,58	28	1.645	$a/c_{equiv} \leq 0,45$	Longarinas protendidas da ponte sobre o canal de fuga de Belo Monte
L	52	58,58	28	1.645	$a/c_{equiv} \leq 0,45$	Segundo estágio dos blocos de apoio do conduto forçado
M	25	31,58	60	1.645	$a/c_{equiv} \leq 0,45$	Curvas inferiores do conduto forçado
CCR	8	11,37	180	0,842	...	Tomada D'Água de Belo Monte de Muros Laterais Direito e Esquerdo, até elevação 60,50 m

Fonte: Adaptado de Bandeira *et al.*, 2017.

Tabela 18 - Dados de composição para os concretos da Classe D.

Dados de Composição		Resistência especificada				
		fck	Fcj	Fck	Fcj	
		20	25,13	20	26,58	
Materiais componentes	Cimento equivalente	kg/m ³	406		463	
	Cimento		374		426	
	Sílica Ativa		32		37	
	Água Unitária		211		222	
	Areia natural		506		452	
	Brita 19 mm		604		590	
	Brita 38 mm		550		538	
	Aditivo incorporador de ar		0,20		0,23	
Relação a/c _{equiv}	%	0,52		0,48		
Módulo de Finura	%	5,77		5,87		
% de areia em massa	%	30,53		28,63		
% de areia em volume	%	30,53		28,63		
Traço Final		1:4,1		1:3,4		
		1:1,2:2,8		1:0,98:2,4		

Fonte: Próprio Autor.

Para a obtenção dos parâmetros (relação a/c_{eq} , módulo de finura, % de areia em massa e volume) bem como o consumo de água unitária, correlacionou-se o fcj obtido na classe D com os gráficos do estudo de dosagem (Gráfico 11). O consumo dos materiais foi determinado indiretamente através de cálculos. O consumo de cimento foi determinado pela divisão da massa de água unitária pelo fator a/c e a massa dos agregados foram determinadas através do cálculo dos volumes e posterior conversão multiplicando-se pela massa específica de cada agregado.

Vale ressaltar que o módulo de finura se caracteriza por ser parâmetro fundamental para elaboração das dosagens, pois a partir deste é possível estabelecer correlações entre as resistências do concreto, a/c_{eq} , porcentagem de areia e água unitária, implicando na produção de concretos mais econômicos que atendam faixas de resistências específicas para cada projeto, levando em conta a otimização da granulometria do concreto.

5 CONCLUSÕES

O estudo de dosagem para concretos massa de barragens apresenta particularidades nas definições dos traços, uma vez que se tem a necessidade de minimizar o consumo de cimento, assim como os vazios do efeito granular e obter misturas adequadas considerando o diâmetro máximo característico elevado dos agregados graúdos, bem como evitar reações deletérias no concreto.

Neste sentido, uma das etapas mais importante do estudo de dosagem refere-se à caracterização dos materiais, sendo que para o presente estudo as propriedades físicas dos agregados graúdos e miúdos tais como granulometria, abrasão, massa específica, absorção, entre outros, demonstraram resultados adequados para aplicação de concretos massa.

No caso da avaliação da reação dos álcalis do cimento selecionado (cimento CPIV) para o estudo com os agregados (RAA), observou-se a que as amostras de ensaio apresentaram expansão inócua viabilizando assim o uso da brita e da areia selecionados para a pesquisa. Além disso, verificou-se que a combinação dos agregados e o cimento CPIV contendo 8% de sílica ativa apresentou melhor desempenho no combate das expansões.

Referente às características do cimento estas atenderam as exigências da ABNT NBR 5733:1991. Assim como as características físico-químicas apresentadas para a sílica ativa foram bastante satisfatórios para seu emprego em dosagens de concreto, atendendo a ABNT NBR 1395-1:2012.

Na etapa do estudo de dosagem com base no método MMF foi possível à elaboração dos gráficos de dosagem necessários para a definição da composição de concretos e consequentemente a verificação de suas aplicações em barragens, sendo os concretos de classe D adequados ao estudo.

Desta forma, de acordo com a classe D, o presente estudo de dosagem pode ser aplicado nos seguintes elementos: concreto armado dos muros e pilares de vertedouros, concreto armado e concreto sujeito a solicitações dinâmicas, bem como em superfícies hidráulicas sujeitas a velocidades de água inferiores a 4m/s.

Por fim, pode-se concluir que o MMF demonstrou ser um método bastante adequado para aplicações de concretos massa, uma vez que é nortado pela busca de composições de concretos contendo granulometrias otimizadas (módulo de finura ótimo), o que possibilita a obtenção de concretos mais econômicos.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Considerando a importância da divulgação deste método para a comunidade acadêmica, bem como a ampla aplicação por parte dos profissionais da área de dosagem e controle de concreto de barragens, percebe-se a necessidade de aprofundamento neste tema, surgindo algumas possíveis propostas de trabalhos futuros;

- ✓ Realizar estudos de dosagem pelo método MMF contemplando resistências à compressão para idades maiores que 28 dias;
- ✓ Realizar estudo de dosagem envolvendo maiores dimensões características de agregado graúdo comumente utilizado em barragens;
- ✓ Analisar o fenômeno de calor de hidratação de concretos massivos aplicáveis em barragens;
- ✓ Verificar propriedades de durabilidade de concretos massivos para aplicação em barragens;

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBUQUERQUE, A. C.; **Estudo das Propriedades de Concreto Massa com Adição de Partículas de Borracha de Pneu**. 259 f. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. Porto Alegre: 2009.

ALMEIDA, A.E.F.S., SICHIERI, E.P. Propriedades microestruturais de argamassas de cimento Portland com adições minerais e poliméricas utilizadas na fixação de porcelanato. **Cerâmica [online]**, vol.52, n.323, pp.174-179. ISSN 0366-6913. São Paulo, 2006.

ALHOZAIMY, A.; FARES, G.; ALAWAD, O.A.; AL-NEGHEIMISH, A.; Heat of hydration of concrete containing powdered scoria rock as a natural pozzolanic material. **Construction and Building Materials**. Elsevier, 2015.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **Cement and Concrete Terminology**. ACI 116R. Farmington Hills, 2005.

_____. **Guide to Mass Concrete**. ACI 207.1R-05. Farmington Hills, 2005.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS -. **ASTM C 88**: Standard test method for soundness of aggregates by use of sodium sulfate or magnesium sulfate. USA, 2005.

_____. **ASTM C1260**: Standard Test Method For Potential Alkali Reactivity Of Aggregates (Mortar-Bar Method). USA, 2014.

ANDRADE, W. P., FONTOURA, J. T., GUERRA, E.A. BITTENCOURT, R.M. **Um método de dosagem para concreto massa**. In: COLÓQUIO SOBRE CONCRETO MASSA. Anais do IBRACON. São Paulo, 1981.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211**: Agregados para concreto - Especificação. Rio de Janeiro, 2011.

_____. **NBR 11768**. Aditivos para Concreto de Cimento Portland. Rio de Janeiro. 2011.

_____. **NBR 12653**. Materiais pozolânicos - Requisitos. Rio de Janeiro. 2014.

_____. **NBR 13956-1**. Sílica ativa para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta - Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro, 2012.

_____. **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 7218**. Agregados – Determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis. Rio de Janeiro, 2010.

_____. **NBR 7222:** Concreto e argamassa — Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011.

_____. **NBR 7809:** Agregado graúdo - Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR 9935:** Agregados – Terminologia, Rio de Janeiro, 2011.

_____. **NBR 8522.** Concreto - Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão. Rio de Janeiro, 2008.

_____. **NBR 9833.** Concreto fresco - Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR NM 15577-4.** Agregados - Reatividade álcali-agregado - Parte 4: Determinação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado. Rio de Janeiro, 2008.

_____. **NBR NM 15577-5.** Agregados - Reatividade álcali-agregado - Parte 5: Determinação da mitigação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado. Rio de Janeiro, 2008.

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

_____. **NBR NM 26:** Agregados – Amostragem, Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR NM 27:** Agregados – Redução da amostra de campo para ensaios de laboratório. Rio de Janeiro, 2001.

_____. **NBR NM 30:** Agregado miúdo - Determinação da absorção de água. Rio de Janeiro, 2001.

_____. **NBR NM 45:** Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.

_____. **NBR NM 51** - Agregado graúdo - Ensaio de abrasão "*Los Angeles*". Rio de Janeiro, 2001.

_____. **NBR NM 52:** Agregado Miúdo - Determinação de massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.

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

BACALTCHUK SOBRINHO, J.; PLATCHECK, I.; CASTELO, G.. Soluções de arranjos visando a economia e a redução de prazos no projeto e construção de barragens de concreto compactado com rolo. In: **XXX Seminário Nacional de Grandes Barragens**. Foz do Iguaçu, 2015.

BANDEIRA, O.M.; PENNA NETO, F.O.; BERNARDO, E.S. Consumo Médio do Concreto Aplicado nas Estruturas da Expansão da Usina Hidrelétrica de Tucuruí. In: **XXVII Seminário Nacional de Grandes Barragens - Comitê Brasileiro de Barragens**. Belém, 2007.

BANDEIRA, O.M.; ANDRADE, W.P.; BITTENCOURT, R.M.; Material Cimentício para o Projeto Belo Monte. **Revista Brasileira de Engenharia de Barragens** - Comitê Brasileiro de Barragens. Edição Especial (Belo Monte). Ano IV nº 04 maio de 2017.

BITTENCOURT, R. M.; FONTOURA J. T. F.; DE ANDRADE, W. P.; MONTEIRO; P. J. M. Mass Concrete Mixtures Based on Fineness Modulus and Geometrical Gradation. **Journal of Materials in Civil Engineering** Vol. 13, Issue 1, Fevereiro 2001.

BRASIL, Ministério de Minas e Energia. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2024**. Empresa de Pesquisa Energética. Brasília, 2015.

BRASIL. Presidência da República. Lei n. 12.334 de 20 de set. de 2010. Estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens destinadas à acumulação de água para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais, cria o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens. Brasília, 2010.

CAMPITELI, V.C. Concreto de Cimento Portland: Um Método de Dosagem. **Revista Engenharia Civil UM**, nº 20, 2004.

CARMO, J.B.M; PORTELLA, K.F. Comparative study of mechanical performance of silica fume and metakaolin mineral admixtures in concrete structures. **Revista Cerâmica** Vol.54, nº 331, São Paulo, 2008.

CARMO, J.B.M. **Análise Comparativa do Desempenho de Concretos Compostos com Sílica Ativa e Metacaulim Face à Resistência Mecânica e à Viabilidade Econômica**. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2006.

CASTRO, N.J.; BARA NETO, P.; BRANDÃO, R.; DANTAS, G.A. **Expansão do Sistema Elétrico Brasileiro e o Potencial Hidroelétrico da Região Amazônica**. Texto de Discussão do Setor Elétrico – TDSE nº50. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2012.

COELHO, N. A.; **Métodos Analíticos e Numéricos para o Estudo dos Efeitos Termomecânicos no Concreto Massa Orientados às Barragens de Gravidade**. Tese de Doutorado em Estruturas e Construção Civil. Publicação E.TD-007A/16, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Universidade de Brasília. Brasília, 2016.

COELHO, N. A.; **Um Estudo Numérico do Efeito Térmico em Concreto Massa**. Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil. 152p. Publicação EDM-006A/12, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Universidade de Brasília – UnB. Brasília, 2012.

COSTA, A.B. **Potencial Pozolânico da Cinza Volante como Material de Substituição Parcial de Cimento**. Trabalho de Conclusão de Curso – Centro Universitário INIVATES. Lajeado, 2015.

COMITÊ BRASILEIRO DE GRANDES BARRAGENS. Hidrelétrica Santo Antônio: Quarta maior em geradora hídrica do país. **Revista Brasileira de Engenharia de Barragens**. N. 03. CBDB: Abril: 2016.

DAL MOLIN, D. C. C. **Contribuição ao Estudo das Propriedades Mecânicas dos Concretos de Alta Resistência com e sem Adição de Microssilica**. Tese de Doutorado - Escola Politécnica da USP. São Paulo, 1995.

DONADON, J.M. Progressos Recentes no Projeto e Construção de Barragens de Concreto Compactado com Rolo. **Comitê Brasileiro de Grandes Barragens - XXX Seminário Nacional de Grandes Barragens**. Foz do Iguaçu, 2015.

FURNAS. **Concretos Massa, Estrutural, Projetado e Compactado com Rolo: Ensaios e Propriedades**. Editora PINI. São Paulo, 1997.

FURNAS. **Relatório GST.E.064.2017-R0 – Universidade Federal do Pará - UFPA – Ensaios de Reatividade Potencial Álcali-Agregado**. Aparecida de Goiânia, 2017.

FURNAS. **Documento DCT.T.01.056.2003-RO** - Estudos de Viabilidade do AHE Jirau. 2003.

FUSCO, P.B. **Tecnologia do Concreto Estrutural**. 2ª Ed. Editora PINI. São Paulo, 2012.

GAMBALE, E.A.; CESAR, M. C.; QUEIROZ, A.C. E.; MOTTA C.F.C.; ANDRADE, M.A.S. Simulação numérica e verificação "in loco" das temperaturas da viga Munhão da UHE Foz do Chapecó. In: **51º Congresso Brasileiro do Concreto**. Curitiba, 2009.

GAMBALE, E.A.; TRBOUSI, M.A. FERREIRA, R.B. Evaluation of Thermal and Tensional Behavior of Concrete Applied for Structures Hydroelectric Plant. **Comitê Brasileiro de Grandes Barragens - XXX Seminário Nacional de Grandes Barragens**. Foz do Iguaçu, 2015.

HAN F.; LIU, R.; WANG, D.; YAN, P.; **Characteristics of the hydration heat evolution of composite binder at different hydrating temperature**. Thermochemica Acta. Elsevier: 2014.

HASPARYK, N.P.; MONTEIRO, P.J.M.; DAL MOLIN, D.C.C. Investigation of Mechanical Properties of Mass Concrete Affected by Alkali-Aggregate Reaction. **Journal of Materials in Civil Engineering**, Vol. 21, No. 6, June 1, 2009. ©ASCE, ISSN 0899-1561.

INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS. **The Specification and Quality Control of Concrete for Dams**. Paris, 2009.

KUPERMAN, S.C. **Concreto massa convencional e compactado com rolo para barragens**. In: ISAIA, G.C. Concreto – Ensino, Pesquisa e Realizações, Instituto Brasileiro do Concreto – IBRACON. Vol II, cap.41, p.1260-1295. São Paulo, 2005.

MARQUES FILHO, J. **Concreto massa e Compactado a Rolo**. In: ISAIA, G. C. **Concreto: Ciência e Tecnologia**, Instituto Brasileiro do Concreto – IBRACON. Vol II, p.1399-1448. São Paulo, 2011.

LACERDA, C.S.; HELENE, P.R.L. **Estudo da Influência da Substituição de Cimento Portland por Metacaulim em Concretos**. Departamento de Engenharia de Construção Civil. São Paulo, 2005.

MARCONDES, C. **Brita lamelar e a qualidade do concreto**. Artigo técnico – Cimento Itambé, 2009.

MARQUES, J.L.S.; CARVALHO, R.R. **CrITÉrios de Projeto de Barragens De Concreto à Gravidade: Uma Visão de Sustentabilidade**. Trabalho de conclusão de curso – Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2013.

MC-BAUCHEMIE. **Usinas Hidrelétricas – soluções para Construção, Recuperação e Estanqueidade de Usinas Hidrelétricas e Barragens**. Catálogo Técnico. 2013.

MELLO, F. M.. **Síntese do Desenvolvimento da Implantação das Barragens no Brasil**. A História das Barragens no Brasil Séculos XIX, XX, XXI: cinquenta anos do Comitê Brasileiro de Barragens-CBDB. Rio de Janeiro, 2011a.

_____ **Resumo da História Remota da Hidroeletricidade no Brasil**. A História das Barragens no Brasil Séculos XIX, XX, XXI: cinquenta anos do Comitê Brasileiro de Barragens - CBDB. Rio de Janeiro, 2011b.

MENEZES, J.B.; BANDEIRA, O.M.; LEITE, D. T. **A Construção do Complexo Hidrelétrico de Belo Monte: Quarta Maior do Mundo em Capacidade Instalada**. **Revista Brasileira de Engenharia de Barragens** - Comitê Brasileiro de Barragens. Edição Especial (Belo Monte). Ano IV nº 04 maio de 2017.

METHA, K.; MONTEIRO, P.J.M. – **“Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais”** – Editora PINI, São Paulo, 1994.

MOHAMMED S. I.; COLLETT, C.; SEAN M. **Trends And Developments In Green Cement And Concrete Technology**. **International Journal of Sustainable Built Environment** (2012) 1, p. 194–216.

NEVILLE, A.M. **Propriedades do Concreto**. 5ª ed., Bookman. Porto Alegre, 2016.

NOGUEIRA, K.A. **Reação Álcali-Agregado: Diretrizes e Requisitos da ABNT NBR 15577/2008**. Monografia de Especialização em Construção Civil - Escola de Engenharia UFMG. Belo Horizonte, 2010.

OLIVEIRA, A. M.; ARAÚJO, J.; COSTA, M.; BERNARDO, A. **Estudos Preliminares para Potencial Uso de Resíduos da Produção de Ferro-Silício como Substituição Parcial a Agregados Miúdos em Concretos**. 52ºCBC, IBRACON. Fortaleza, 2010.

PAN, J. W.; FENG, Y. T.; WANG, J. T.; SUN, Q. C.; ZHANG, C. H.; OWEN, D. R. J. Modeling of alkali-silica reaction in concrete: a review. **Frontiers of Structural and Civil Engineering**, v.6, n.1, 2012; p.1-18.

PAVEL, K.; ROSTISLAV, D.; ALEKSANDR, G.; KAVALEROVA, E. Mechanism of Preventing the Alkali-Aggregate Reaction in Alkali Activated Cement Concretes. **Cement & Concrete Composites** 45 (2014) 157–165.

PIMENTA, M.A.; SILVA, C.M.; ANDRADE, M.A.S.; CAMPOS, C.O. Concreto para Barragens e Usinas Hidrelétricas – Projetando e construindo para a durabilidade e a Segurança. **Comitê Brasileiro de Barragens - XXVII Seminário Nacional de Grandes Barragens**. Belém, 2007.

REVISTA BRASILEIRA DE ENGENHARIA DE BARRAGENS. Comitê Brasileiro de Barragens. Ano III nº 3 Abril de 2016.

REZENDE, M. L. S.; NASCIMENTO, J. W. B.; NEVES, G. A.; SILVA, F. L. H.; LEAL, A. F.; FERREIRA, H. C. Uso de metacaulin em concreto seco: uma abordagem por superfície de resposta. **Rev. Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 12, p. 135-146, 2012.

ROCHA, G.G.N. **Adições Minerais e suas Influências na Qualidade do Concreto**. Metacaulim do Brasil. II Congresso Nacional de Tecnologia do Concreto online, 2017.

SAJAL, K. D.; BORSAIKIA, C.A. Mixture proportioning of mass concrete for gravity dam based on fineness modulus and geometrical gradation. **The Indian concrete Journal**, Jan 2006, p. 52-56.

SOUZA, M.M. **Estudo para o Projeto Geotécnico da Barragem de Alto Irani, SC**. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2013.

THOMAZ, E. **Calor sob controle**. Revista TÉCNICA. Ed. 190, janeiro de 2013, p. 30-35.

TYDLITAT, V.; MATAS, T.; CERNÝ, R.; Effect of w/c and temperature on the early-stage hydration heat development in Portland-limestone cement. **Construction and Building Materials**. Elsevier, 2014.

TUTIKIAN, B.F.; HELENE, P. **Dosagem dos Concretos de Cimento Portland**. In: **Concreto: Ciência e Tecnologia** ISAIA G.C. IBRACON, 2011.

WATANABE, P.S. **Concretos Especiais – Propriedades, Materiais e Aplicações**. Relatório Final de Pesquisa - Universidade Estadual Paulista. Bauru, 2008.