

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO OESTE DA BAHIA  
CENTRO DAS CIÊNCIAS EXATAS E DAS TECNOLOGIAS  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**ARGAMASSA DE CIMENTO PORTLAND COM INCORPORAÇÃO DE ADITIVO  
PLASTIFICANTE POLIFUNCIONAL: INFLUÊNCIA NO TEOR DE AREIA  
INCORPORADO, RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E CUSTO UNITÁRIO**

**EMANUELLA CORREIA SILVA**

**BARREIRAS-BA  
SETEMBRO-2017**

**EMANUELLA CORREIA SILVA**

**ARGAMASSA DE CIMENTO PORTLAND COM INCORPORAÇÃO DE ADITIVO  
PLASTIFICANTE POLIFUNCIONAL: INFLUÊNCIA NO TEOR DE AREIA  
INCORPORADO, RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E CUSTO UNITÁRIO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Oeste da Bahia, como requisito parcial à obtenção do grau de Engenheiro Civil.

Orientador: D.Sc. Juarez Hoppe Filho

**BARREIRAS-BA  
SETEMBRO-2017**

## FICHA CATALOGRÁFICA

---

S586 Silva, Emanuella Correia.

Argamassa de cimento Portland com incorporação de aditivo plastificante polifuncional: influência no teor de areia incorporado, resistência à compressão e custo unitário. / Emanuella Correia Silva. – 2017.

69 f.; il.

Orientador: Prof. Dr. Juarez Hoppe Filho.

Trabalho de Conclusão de Curso: (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Oeste da Bahia. Centro das Ciências Exatas e das Tecnologias, Barreiras, BA, 2017.

1. Resistência de materiais – Argamassa. 2. Materiais de construção. I. Hoppe Filho, Juarez. II. Universidade Federal do Oeste da Bahia – Centro das Ciências Exatas e das Tecnologias. III. Título.

CDD: 620.1

---

**EMANUELLA CORREIA SILVA**

**ARGAMASSA DE CIMENTO PORTLAND COM INCORPORAÇÃO DE  
ADITIVO PLASTIFICANTE POLIFUNCIONAL: INFLUÊNCIA NO TEOR DE  
AREIA NA MISTURA, RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E CUSTO  
UNITÁRIO**

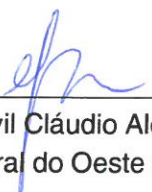
Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado ao Curso de Engenharia Civil da  
Universidade Federal do Oeste da Bahia, como  
requisito parcial à obtenção do grau de Engenheiro  
Civil.

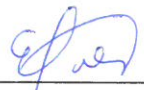
Aprovada em 19 de setembro de 2017

**Banca Examinadora**

Orientador: \_\_\_\_\_

  
Professor D. Sc. Juarez Hoppe Filho  
Universidade Federal do Oeste da Bahia (UFOB)

  
Professor Eng.º Civil Cláudio Alex de Oliveira Pires  
Universidade Federal do Oeste da Bahia (UFOB)

  
Professor M. Sc. Elier Pavón de La Fé  
Universidade Federal do Oeste da Bahia (UFOB)

*A Jesus por estar comigo, me guiando pelos seus caminhos, mesmo sendo tão imperfeita, o seu amor justifica a minha existência. Aos meus pais, Emanuel Nascimento da Silva e Maria Messias Correia Rocha Silva e ao meu irmão Samuel Correia Silva, o amor que nos une é o que me faz querer ser cada dia melhor.*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por apesar da minha imperfeição, permitir ser guiada por sua luz, a minha família, pelo apoio emocional e financeiro, a minha mãe e ao meu pai pelo exemplo cotidiano de companheirismo e de que tudo pode ser conquistado com trabalho.

Aos meus tios, primos, meus queridos avós, a minha madrinha Rosa Maria Nascimento da Silva, e meu padrinho Elmiro Cezar de Sena. Por acreditarem em mim, e dentro das suas possibilidades fornecerem o possível para que consiga alcançar os meus objetivos.

Aos meus amigos Erica Samila Araújo, Tânia Augusto, Agnes Dias, Yoná Conceição e aos amigos que a universidade me propiciou conhecer Lorena Santana, Rízia Gonçalves, Camila Rodrigues, Marília Carmelita, entre outros, sem vocês essa trajetória teria sido bem mais difícil.

A Paolo Bidese, por permanecer comigo, por acreditar na minha capacidade, e por cotidianamente se empenhar em mostrar todas as minhas possibilidades, mesmo nos momentos mais difíceis, meu muito obrigada.

Ao Professor Juarez Hoppe Filho pelos conselhos e por aceitar me orientar nesse trabalho, e em tantos outros ao longo da minha formação, pelas aulas, pelos ensinamentos, por exercer de forma tão brilhante a sua profissão, meu agradecimento sincero por humildemente compartilhar o seu conhecimento.

Agradeço ao Professor Luís Gustavo Henriques do Amaral, pela sua disponibilidade, desde o começo da minha graduação, por ser uma das minhas principais referências, pelos conselhos, todo o meu respeito e gratidão.

A todos os Professores que tive o prazer de conviver e que acreditam na profissão, e compartilham todo o conhecimento de forma tão generosa, meus agradecimentos e toda a minha admiração.

A todas as pessoas que passaram e as que ainda vão passar, e que com certeza iram deixar o seu legado na minha formação pessoal e profissional.

Ao Centro das Ciências Exatas e das Tecnologias (CCET) da Universidade Federal do Oeste da Bahia (UFOB), por ter proporcionado condições de desenvolver este trabalho.

## RESUMO

O cimento Portland requer para sua produção uso intensivo dos recursos naturais, e depende na atmosfera uma quantidade significativa de gases poluentes, como o dióxido de carbono. Com isso deve-se procurar medidas para mitigar o seu uso e, sobretudo, usá-lo de forma mais consciente e responsável. Uma das tecnologias atuais que pode viabilizar esse processo é o uso de aditivos dispersantes, que possuem propriedades que agregam ao concreto ou argamassa, as características desejadas sem a necessidade de aumento do consumo de cimento. Dentre esses, temos o aditivo plastificante polifuncional que possui como função principal a diminuição da relação água/cimento com a manutenção da trabalhabilidade da mistura. No presente trabalho, o aditivo plastificante polifuncional foi utilizado em argamassas, sendo experimentado em 4 teores (0,25 %, 0,50 %, 1,00 % e 2,00 % em relação a massa do cimento) para a análise comparativa com a argamassa referência, sem aditivo. Mantendo a relação a/c constante e com a incorporação de aditivos, a mistura apresenta-se cada vez mais fluida, e para manter a mesma trabalhabilidade da referência adicionou-se maiores proporções de areia nas composições. A verificação da constância da trabalhabilidade foi feita por meio do ensaio de mini tronco de Kantro. Com isso foi verificado que pode-se adicionar uma quantidade significativa de areia e a mistura ainda permanece com a trabalhabilidade observada na argamassa de referência. A incorporação de aditivo na composição das argamassas propiciou incremento na resistência à compressão e diminuição na porosidade. A viabilidade financeira da utilização de aditivo apresentou-se satisfatória, o que foi comprovado pela estimativa do custo unitário das argamassas.

**Palavras-chave:** argamassas aditivadas, resistência à compressão, porosidade, custo unitário.

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	12
1.1 Importância do tema .....	12
1.2 Objetivo.....	14
1.3 Justificativa.....	14
2. REVISÃO DE LITERATURA .....	16
2.1.1 Composição do cimento Portland anidro .....	17
2.1.2 Tipos de cimento Portland .....	18
2.1.3 Hidratação do cimento Portland.....	19
2.1.4 Proporção de mistura (traço) de concreto.....	21
2.2 Aditivos .....	23
2.2.1 Aditivos Redutores de Água .....	24
2.3 Resistência mecânica .....	31
2.4 Porosidade .....	32
3. MATERIAIS E MÉTODOS .....	33
3.1 Materiais .....	33
3.1.1 Cimento Portland .....	33
3.1.2 Agregado miúdo.....	33
3.1.3 Aditivo Plastificante Polifuncional.....	34
3.2 Métodos.....	34
3.2.1 Proporções de mistura das argamassas.....	35
3.2.2 Mistura da argamassa .....	36
3.2.3 Ensaio no mini tronco de cone de Kantro .....	37
3.2.4 Moldagem dos corpos de prova.....	37
3.2.5 Ensaio de resistência à compressão axial .....	38
3.2.6 Porosidade.....	39
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	43
4.1 Ensaio de mini tronco de Kantro .....	43
4.2 Resistência à compressão axial.....	46
4.3 Porosidade das argamassas .....	50

4.4	Custo unitário das argamassas estudadas.....	54
5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	63
5.1	Sugestões para trabalhos futuros.....	63
6.	REFERÊNCIAS.....	65

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Partículas de cimento floculadas em uma suspensão água/cimento sem aditivo presente e um sistema após ser disperso com adição de um aditivo tensoativo. ....	27
Figura 2 - Distribuição granulométrica do agregado miúdo (areia). ....	34
Figura 3 - Sequência de procedimentos adotados ....	34
Figura 4 - Ensaio de cone de kantro. ....	37
Figura 5 - Corpos de prova. ....	38
Figura 6 - Equipamento utilizado no ensaio de resistência à compressão axial. ....	39
Figura 7 - Balança hidrostática utilizada para a determinação da massa submersa. ....	41
Figura 8 - Ultrafreezer utilizado para a paralisação das reações de hidratação por congelamento. ....	41
Figura 9 - Liofilizador utilizado para a secagem das amostras por sublimação da água congelada nos poros das argamassas. ....	42
Figura 10 - Teor de areia das argamassas em relação ao cimento, em massa, em função do teor de aditivo dispersante incorporado à mistura. ....	44
Figura 11 – Espalhamento médio das argamassas obtido por meio do ensaio no mini tronco de cone de Kantro. ....	46
Figura 12 - Evolução da resistência à compressão das argamassas com e sem aditivo dispersante. ....	48
Figura 13 - Resistência à compressão, nas diferentes idades, em função do teor de aditivo dispersante incorporado às argamassas. ....	49
Figura 14 - Porosidade nas idades de 7, 28 e 56 dias. ....	52
Figura 15 - Porosidade, nas diferentes idades, em função do teor de aditivo dispersante incorporado às argamassas. ....	53
Figura 16 - Composição volumétrica das argamassas. ....	55
Figura 17 - Custo unitário das argamassas estudadas. ....	57
Figura 18 - Custo de cada argamassa por unidade de resistência à compressão. ....	58
Figura 19 - Resistência à compressão, porosidade, custo por unidade de resistência à compressão, custo unitário e consumo de cimento da argamassa de referência, sem aditivo, e da argamassa com 0,50% de aditivo dispersante. ....	59
Figura 20 – Resistência à compressão da referência nas idades de 7,28 e 56 e da argamassa com nova relação água/cimento, nas idades de 7 e 28 dias. ....	60

Figura 21 - Composição volumétrica da argamassa de referência, sem aditivo, e da argamassa aditivada (teor de 0,50%) misturada na relação a/c = 0,62. .... 61

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tipos de cimento Portland comercializados no Brasil.....	19
Tabela 2 - Composição das argamassas utilizadas no estudo.....	36
Tabela 3 - Efeito do aditivo dispersante na relação água/materiais secos de argamassas com consistência (espalhamento) constante.....	45
Tabela 4 - Resistência à compressão das argamassas nas idades de 7, 28 e 56 dias. ....	46
Tabela 5 - Porosidade teórica das argamassas e nas idades de 7, 28 e 56 dias.....	50
Tabela 6 - Consumo de materiais por unidade volumétrica (metro cúbico) de argamassa. ....	55
Tabela 7 - Custo dos materiais utilizados na composição das argamassas.....	56
Tabela 8 - Consumo de materiais e custo unitário ( $m^3$ ) das argamassas.....	56
Tabela 9 - Proporção de mistura ajustada da argamassa contendo 0,50% de aditivo para equiparação da resistência à compressão com a argamassa de referência. ....	60
Tabela 10 – Resistência à compressão e porosidade da argamassa de referência e da argamassa com nova relação água/cimento.....	61
Tabela 11 - Custo da argamassa de referência e da com nova relação água/cimento.....	62

## **1. Introdução**

### **1.1 Importância do tema**

A busca por inovação na construção civil tem sido alvo de interesse dos pesquisadores e produtores da área porque está associada à urbanização, que é um processo inerente ao desenvolvimento econômico e social. Nesse cenário, o cimento Portland é um material eficiente e viável para que esse processo seja feito com a garantia de eficiência, no que tange a segurança estrutural, qualidade e baixo custo.

A utilização do cimento não é recente e, de acordo com Corrêa (2010), o homem faz usos dos aglomerantes hidráulicos de agregados minerais desde a descoberta das propriedades aglomerantes de matérias primas como o gesso e o calcário. Ainda, segundo o autor, o conhecimento evoluiu com o emprego de cinzas vulcânicas mescladas à cal e, finalmente, com a descoberta, no século XIX, da mistura sinterizada (cliquerização) de calcário e argila, denominada cimento Portland. As propriedades do cimento Portland, após mais de um século de existência, vêm se mantendo como a melhor solução técnica e econômica na fabricação dos concretos e argamassas.

Mindess (2008) afirma que o cimento Portland é, de longe, o membro mais importante da família de cimentos hidráulicos, isto é, cimentos que endurecem por meio da interação química com a água. Desde então, muitas melhorias foram feitas para a produção de cimento, levando ao seu aprimoramento e aumento da sua disponibilidade.

As normas brasileiras (NBR's) sugerem que, para garantir a eficiência estrutural da edificação ou obra de arte, deve-se ter por referência uma capacidade resistente estabelecida em projeto. No caso do concreto convencional, composto não homogêneo, o que assegura esse comportamento de suporte é principalmente a pasta de cimento, pois os agregados naturais são geralmente densos e resistentes.

E com esse cenário, a indústria de cimento vem sendo demandada de forma intensiva, entretanto para a sua produção é necessário grande quantidade de materiais sendo considerado um dos maiores usuários de recursos naturais do mundo e, portanto, tem um impacto ambiental considerável. De acordo com Mindess (2008), cada tonelada de cimento Portland requer cerca de 1,5 toneladas de matéria-prima para sua produção e

esta indústria não é apenas um grande consumidor de energia, mas também é uma das principais contribuidoras na emissão de gases que produzem o efeito estufa.

Fazendo um comparativo com as informações do Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC) no relatório referente ao primeiro semestre de 2017, está exposto que no Brasil houve o consumo de 26,0 milhões de toneladas de cimento, e com isso têm-se a dimensão da produção e da demanda de recursos necessários.

Nesse cenário, para a produção do cimento é necessário significativa quantidade de materiais e energia além de emitir um volume considerável de gases, principalmente o dióxido de carbono, que é um dos condicionantes essenciais para o agravamento do efeito estufa, e com sua produção intensiva, a relação dos constituintes do concreto e argamassa, deve ser analisada para se definir a melhor proporção dos componentes, verificando o que pode ser alterado para que possa ocorrer o processo pleno de hidratação, com garantia da resistência e trabalhabilidade.

Com essa perspectiva, o concreto é, pelos seus constituintes, um material heterogêneo, e Martin (2005) afirma que as características dos seus componentes oferecem a possibilidade de, utilizando procedimentos adequados de projeto e fabricação, obter a sua máxima compacidade. Dessa forma, o concreto que sai do misturador é um material deformável, com características físicas que influenciam na sua trabalhabilidade. Dentre essas características cabe destacar o atrito interno entre os diversos componentes sólidos, que pode ser modificado por vibração, pela adição de água ou pela adição de aditivos apropriados. Martin (2005) ainda afirma que o grande avanço no campo do concreto não se deve apenas às melhorias no processo de fabricação do cimento ou às adições minerais que vêm sendo utilizadas como parte do material aglomerante, mas sim, e principalmente, aos avanços alcançados pela indústria dos aditivos químicos.

Tratando-se principalmente do aditivo plastificante, o qual age modificando a interação entre os compostos químicos presentes no cimento que possuem uma tendência a flocularem, Neville (2011) afirma que este é uma substância que se concentra na interface entre duas fases imiscíveis das partículas e altera as forças físico-químicas que atuam nesta interface, dando-lhes uma carga negativa que leva à repulsão, e isso resulta na estabilização da dispersão. Como a floculação retém água, os aditivos plastificantes atuam aumentando a superfície do cimento que pode sofrer hidratação

inicial e também a quantidade de água disponível para hidratação. Isso faz com que se reduza a relação água/cimento e mesmo assim a pasta ainda tenha a mesma trabalhabilidade.

No Brasil, afirma Corrêa (2010), a maioria dos aditivos em uso são os plastificantes e polifuncionais que geralmente propiciam uma redução no consumo de cimento na proporção de mistura (traço) entre 6 e 15%, o que é um alto índice. Como o uso de aditivos está limitado, quase que exclusivamente, aos consumidores de perfil técnico específico, segmento que no Brasil consome somente cerca de 20% do cimento comercializado no país, esta redução no consumo de cimento em função do uso de aditivos é de somente cerca de 2% da produção nacional. De fato, o uso de cimento Portland no mundo moderno é praticamente insubstituível, apesar dos danos e riscos ambientais. Portanto é necessário encontrar formas de aperfeiçoar e reduzir o seu consumo, mitigando o impacto ao meio ambiente, o que requer a consolidação do uso de aditivo como constituinte corriqueiro da execução de concreto.

## **1.2 Objetivo**

O objetivo deste trabalho é adicionar diferentes teores de aditivo dispersante e agregado miúdo nas misturas de argamassas de forma a manter constante a consistência, e com isso avaliar os efeitos sobre a resistência à compressão axial, porosidade e custo unitário.

## **1.3 Justificativa**

E evidente que houve significativa evolução na qualidade dos cimentos Portland e no seu processo industrial, com grande redução do consumo de energia para sua produção, entretanto as novas exigências incidentes sobre os materiais cimentícios utilizado nas diversas áreas da construção civil, de acordo Schmidt e Allem (2016), englobam tanto fatores que influenciam nas características químicas e físicas, como também em fatores econômicos e ambientais, ou seja, além da necessidade de um concreto cada vez mais durável e resistente, devido à grande demanda e ao grande porte

das obras, também se faz necessário levar em conta fatores como produtividade, baixo custo e sustentabilidade.

Nesse cenário, uma das medidas a ser adotada é a redução do consumo de cimento que segundo Corrêa (2010) energia para a sua produção ainda é muito alto (+/- 950 kcal / kg. de clínquer) o que faz da indústria cimenteira um alto consumidor de energia e uma indústria de alto risco devido à geração de mais de 600 kg de CO<sub>2</sub> por tonelada de clínquer produzido, o que exige um controle necessário, mas nem sempre eficiente, da emissão de CO<sub>2</sub> na atmosfera, além de ser ainda um consumidor em alta escala de reservas minerais de calcário e argila.

Esse cenário é também exposto por Mindess (2008) quando afirma que a indústria cimenteira é uma das maiores usuárias de recursos naturais do mundo e, portanto, tem um impacto ambiental considerável.

Com estes fatores já se pode considerar a produção de cimento um processo prejudicial à natureza, porém ainda não é possível substituir o cimento Portland, apesar de seus danos e riscos, entretanto é necessário encontrar formas de aperfeiçoar sua produção e reduzir o seu consumo, mitigando assim o impacto ambiental gerado.

Segundo Martin (2005), a mitigação do impacto ambiental decorrente do uso de cimento pode ser realizado por meio da seleção correta dos componentes de concretos e argamassas e por otimização das dosagens, o que altera as propriedades dos materiais no estado fresco e endurecido, tais como os tempos de pega, a densidade, as resistências mecânicas, o acabamento e, especialmente, a durabilidade. Diante deste cenário, pode-se afirmar que os benefícios ambientais decorrem da redução do consumo de cimento sem que haja prejuízos às especificações técnicas dos concretos e argamassas.

Nesse cenário os aditivos têm protagonismo, e são significativos os avanços que a indústria de aditivos para concretos e argamassas tem alcançado em um curto espaço de tempo, de tal forma que este setor, por sua modernidade, pode produzir produtos que atendam as mais variadas necessidades técnicas.

No Brasil, de acordo Martins (2005), ainda se observa uma grande resistência à utilização de aditivos por parte dos produtores de concreto. Algumas razões para essa lenta disseminação são: elevado custo de alguns tipos de aditivos; grande variedade de tipos de cimento disponíveis no mercado, o que exerce um papel fundamental no desempenho dos aditivos quando estes são combinados; e a necessidade da realização de

testes preliminares para verificar seu desempenho nas condições de produção, além da prudência natural em se adotarem “novidades” que podem interferir em uma das principais características do concreto, isto é, sua resistência mecânica.

Nesse contexto, a viabilidade do uso do aditivo plastificante polifuncional para a diminuição da proporção de cimento Portland na mistura e, conseqüentemente, o aumento no teor de areia da argamassa, deve ser analisado sob os preceitos de manutenção da trabalhabilidade e resistência à compressão, sendo essa a proposta do presente trabalho.

## **2. Revisão de literatura**

Segundo Kihara e Centurione (2005), os cimentos são substâncias ligantes capazes de unir fragmentos ou massas de materiais sólidos em um corpo compacto. Dentre esses ligantes, o cimento Portland é o aglomerante hidráulico utilizado na construção civil, e possui importância no desempenho, qualidade e durabilidade do concreto. Após entrar em contato com a água, o cimento Portland é submetido a processos de transformações químico-mineralógicas, que contribuem para juntar e consolidar os agregados, resultando em um compósito, o concreto de cimento Portland.

Os materiais a base de cimento são, certamente, de acordo Mindess (2006), os materiais de construção fabricados mais antigos e são, atualmente, os compostos de construção mais utilizados em todo o mundo, cuja produção ultrapassa amplamente materiais como o aço, a madeira, o asfalto, entre outros.

Nesse cenário, o estudo dos materiais para uso na construção civil vem crescendo e o concreto, como um dos materiais mais amplamente usado, tem sido alvo de pesquisas frequentes para compreensão e possível melhoria de suas características, visando obter menores custos, além de direcionar o processo de forma a ser o mais sustentável possível. Apesar de seu uso intensivo, Monteiro e Mehta (2008) afirmam que sua microestrutura é heterogênea e altamente complexa, e as relações microestrutura-propriedade do concreto ainda não estão completamente desenvolvidas. Afirmam ainda que certo conhecimento sobre os elementos essenciais da microestrutura é necessário para se discutir os fatores importantes para a engenharia do concreto. Com isso a microestrutura do concreto vem sendo investigada, com o intuito de desenvolver

compósitos com sua máxima eficiência. Neste contexto, o concreto, formado por agregados, cimento e água, passa a incorporar aditivos, os quais são compostos que agregam características específicas ao material, personalizando-o ainda mais para os diversos fins a qual se destina.

De acordo Mindess (2006), os concretos modernos são verdadeiramente materiais "de alta tecnologia", pois podem ser produzidos para praticamente qualquer propósito. No entanto, a capacidade de produzir concretos avançados, com propriedades reológicas controladas, alta resistência à compressão, alta tenacidade e excelente durabilidade em longo prazo depende da compreensão dos mecanismos fundamentais que regem as propriedades químicas do concreto e a habilidade para manipular a microestrutura (e às vezes até a nanoestrutura) do material.

Para se entender o mecanismo de atuação do aditivo deve-se compreender a constituição do cimento e dos agregados tanto para utilização em concreto, quanto em argamassas, sendo este último material do escopo do presente trabalho.

### **2.1.1 Composição do cimento Portland anidro**

De acordo com Kihara e Centurione (2005), o principal constituinte do cimento Portland é o clínquer, material sinterizado e peletizado, resultante da calcinação a aproximadamente 1.450 °C de uma mistura de calcário e argila e eventuais corretivos químicos de natureza silicosa, aluminosa ou ferrífera, empregados de modo a garantir o quimismo da mistura dentro de limites específicos. O aporte térmico no forno provoca a decarbonatação do calcário e a desestruturação dos argilominerais formando os minerais metaestáveis, representados pelos silicatos cálcicos (alita –  $\text{Ca}_3\text{SiO}_5$  e belita –  $\text{Ca}_2\text{SiO}_4$ ) e pelos aluminatos e ferro-aluminatos cálcicos ( $\text{C}_3\text{A}$  –  $\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$  e  $\text{C}_4\text{AF}$  –  $\text{Ca}_4\text{Al}_2\text{Fe}_2\text{O}_{10}$ ).

A alita é o principal composto do clínquer e tem importante papel no endurecimento e na resistência mecânica do cimento nas primeiras idades. Segundo Martins (2008), reage em poucas horas, liberando quantidade significativa de calor na hidratação. A belita também desempenha importante papel na resistência mecânica, sobretudo em idades avançadas, uma vez que apresenta menor taxa de hidratação e por isso desenvolve baixo calor de hidratação.

Já os aluminatos e ferroaluminatos compreendem a fase intersticial, material que foi fundido durante a clínquerização e preenche os espaços entre os cristais de alita e belita. O aluminato é o composto mais reativo e responsável pela pega instantânea do cimento e pelo alto calor de hidratação. Seu teor é pequeno porque não possui resistência à ação de águas sulfatadas, entretanto sua presença é fundamental durante a formação do clínquer, porque age como um fundente fazendo com que sejam menores as temperaturas utilizadas nos fornos. Por fim, os ferroaluminatos possuem importante papel na resistência química, e assim como o aluminato, trabalham como fundente (Kihara e Centurione, 2005).

### **2.1.2 Tipos de cimento Portland**

Segundo Martins (2005), existem no Brasil vários tipos de cimento Portland, diferentes entre si, principalmente em função de sua composição. Quase a totalidade dos cimentos comercialmente disponíveis possui um ou mais tipos de adição. São denominadas adições, os materiais que, misturados aos cimentos ou concretos em quantidades apreciáveis (maior do que 5% em massa), alteram as propriedades que o aglomerante confere à argamassa ou concreto. Este procedimento se explica principalmente pela redução de custo do cimento e por questões ambientais, pois a maioria destas adições é subproduto industrial.

Essa discussão é importante, pois as características que o aditivo confere a argamassa ou concreto são influenciadas diretamente pelo tipo de cimento, pois esses podem possuir em sua composição substâncias que, em contato com o aditivo, alteram seus efeitos. Conforme Martins (2005), na maioria dos países, a produção de cimentos compostos já é bastante expressiva. No Brasil, praticamente todos os cimentos comercialmente disponíveis possuem um ou mais tipos de adições, então para se utilizar um determinado aditivo é indispensável levar em consideração qual cimento, entre os diversos disponíveis no mercado, pode ser utilizado para se obter as características desejadas.

De acordo Kihara e Centurione (2005), o mercado nacional dispõe de onze tipos de básicos de cimento Portland. A Tabela 1 apresenta os tipos de cimento com sua nomenclatura e constituintes.

Tabela 1 - Tipos de cimento Portland comercializados no Brasil.

Nome técnico do Cimento Portland	Sigla	Classes	Conteúdo dos componentes (%)			
			Clínquer + gesso	Escória	Pozolana	Fíler calcário
Comum	CPI	25, 32, 40	100		0	
Comum com adição	CPI-S	25, 32, 40	99-95		1-5	
Composto com escória	CPII-E	25, 32, 40	94-56	6-34	0	0-10
Composto com pozolana	CPII-Z	25, 32, 40	94-76	0	6-14	0-10
Composto com fíler	CPII-F	25, 32, 40	94-90	0	0	6-10
Alto forno	CPIII	25, 32, 40	65-25	35-70	0	0-5
Pozolânico	CPIV	25, 32	5-45	0	15-50	0-5
Alta resistência inicial	CPV-ARI	-	100-95	0	0	0-5
Resistente a sulfatos	RS	25, 32, 40	-	-	-	-
Baixo calor de hidratação	BC	25, 32, 40	-	-	-	-
Branco estrutural	CPB	25, 32, 40	-	-	-	-

Fonte: Kihara e Centurione, 2005, p.316.

Dentre os tipos disponíveis, segundo Kihara e Centurione (2005), o cimento CP II - Z - 32, por exemplo, possui adição de material pozolânico, portanto é composto e modificado, o que agrega características como geração de calor numa velocidade menor que o cimento Portland comum e também maior resistência a ataques dos sulfatos contidos no solo. Os autores ainda afirmam que o concreto feito com esse produto é mais impermeável e por isso mais durável em comparação ao executado com cimento Portland comum. A justificativa para este comportamento é explicado por Mindess (2008), o qual afirma que o papel do material pozolânico é reagir lentamente com o hidróxido de cálcio liberado durante a hidratação do cimento e isso tende a reduzir o calor da hidratação e a resistência à compressão inicial, mas pode, em longo prazo, aumentar a resistência à compressão máxima do material.

### 2.1.3 Hidratação do cimento Portland

O entendimento do processo de hidratação do cimento Portland é importante para o entendimento de como o aditivo interage e altera as características reológicas da pasta.

A hidratação do cimento Portland, de acordo Kihara e Centurione (2005), pode ser entendida como a estabilização pela água dos minerais do clínquer, metaestáveis a temperatura ambiente, gerando uma assembleia mineralógica distinta, constituída predominantemente por fases de baixa cristalinidade como C-S-H, etringita e portlandita. Como o cimento é constituído por mistura de vários componentes, o processo de hidratação consiste na ocorrência de reações simultâneas dos compostos anidros com a água. No entanto, os compostos não se hidratam na mesma velocidade. Os aluminatos se hidratam mais rapidamente que os silicatos. Os primeiros estão associados ao enrijecimento e a pega, enquanto que os silicatos têm papel no endurecimento, ou seja, na taxa de desenvolvimento da resistência mecânica.

Neville (2011) trata dos principais compostos hidratados que podem ser de modo geral, classificados como silicatos de cálcio hidratados e aluminatos de cálcio hidratados. O autor afirma que os silicatos de cálcio hidratados são, em geral, descritos como C-S-H, sendo que os cristais formados na hidratação são imperfeitos e extremamente pequenos. Esses compostos hidratados são aparentemente amorfos, mas a microscopia eletrônica revela que eles têm caráter cristalino. Os silicatos de cálcio não se hidratam no estado sólido, ou seja, possivelmente no início das reações o silicato anidro sofre uma dissolução para, então, reagir, formando silicatos hidratados menos solúveis que se precipitam da solução saturada. Esta reação não possui uma velocidade constante. A rápida liberação de íons cálcio na solução propicia a formação de uma camada externa de silicatos de cálcio hidratado, sendo que essa camada dificulta a hidratação subsequente de modo que, por algum tempo, praticamente não ocorre hidratação significativa. A este intervalo de tempo atribui-se a denominação de período de indução.

Como a hidratação do cimento é uma reação exotérmica, a taxa de liberação de calor é um indicativo de velocidade de hidratação. Com isso, Neville (2011) afirma que se têm três fases de hidratação, o primeiro pico, bastante elevado corresponde à hidratação inicial da superfície dos grãos de cimento e envolve principalmente o  $C_3A$ . A duração dessa hidratação é bastante curta e é seguida por um período denominado período de dormência também conhecido por período de indução, em que a velocidade é bastante baixa. Durante estas fases, a pasta de cimento é trabalhável, ou seja, manuseável. Em determinado momento, a camada superficial de hidratos inicialmente precipitados é rompida, possivelmente pelo mecanismo de osmose ou pelo crescimento dos cristais de

hidróxido de cálcio. A partir deste momento, a velocidade de hidratação e a liberação de calor aumentam lentamente e os produtos de hidratação dos grãos individuais entram em contato entre si, ocorrendo à pega (transição do estado fresco para o estado endurecido).

Para o aluminato tricálcico, Neville (2011) propõe que esse, ao se hidratar, forma um material intersticial prismático escuro, possivelmente com outras substâncias em soluções sólidas. Frequentemente se apresenta na forma de placas circundadas pelos silicatos de cálcio hidratados. A quantidade de  $C_3A$  presente na maioria dos cimentos é relativamente pequena, mas seu comportamento e seu relacionamento estrutural com as outras fases do cimento o tornam importante. A reação do  $C_3A$  puro com a água é bastante rápida e resulta no enrijecimento instantâneo da pasta, conhecido como pega instantânea. Para impedir que isso ocorra adiciona-se sulfato de cálcio dihidratado (gipsita) à composição do cimento Portland. O sulfato de cálcio dihidratado e o  $C_3A$  reagem e formam o tri/mono sulfoaluminato de cálcio hidratado insolúvel, mas eventualmente pode ser formado aluminato de cálcio hidratado.

Com essa descrição, Mindess (2008) resume as características básicas da hidratação do cimento Portland da seguinte forma: inicialmente os grãos de cimento individuais ou aglomerados estão separados entre si pela água, o que mantém a pasta fluida. A hidratação propicia a formação de produtos de reação que ocupam maior volume que o ocupado pelos grãos de cimento anidro e, com isso, os produtos de hidratação começam a interagir. À medida que a hidratação continua, são formadas interações adicionais entre os grãos de cimento, levando ao fortalecimento do sistema. De fato, as reações de hidratação que ocorrem entre o cimento Portland, finamente moído, e a água são altamente complexas, pois os grãos individuais de cimento variam em tamanho e composição. Como consequência, os produtos de hidratação resultantes também não são uniformes.

#### **2.1.4 Proporção de mistura (traço) de concreto**

As principais propriedades do concreto endurecido são normalmente expressas pelo projetista das estruturas, enquanto que as propriedades do concreto fresco são determinadas pelos equipamentos e técnicas de execução, transporte, lançamento e

adensamento do concreto, bem como pelas próprias características geométricas da estrutura a ser concretada. (Helene, 2005)

Segundo Helene (2005), os materiais possíveis de uso nos concretos e que podem ser utilizados em um estudo de dosagem são os vários tipos de cimento, os agregados miúdos, os agregados graúdos, a água, o ar incorporado, os aditivos, as adições, os pigmentos e as fibras. Com esses materiais, um estudo de dosagem é realizado visando obter a mistura ideal e mais econômica para atender uma série de requisitos, como a resistência mecânica, trabalhabilidade, durabilidade e deformabilidade.

Para garantia dessas características, a relação água/cimento (a/c) é de significativa importância, pois tanto a trabalhabilidade quanto a resistência à compressão estão associadas a essa proporção. Portanto, deve-se obter uma proporção ideal que garanta essas propriedades de forma a atender as necessidades da obra.

A adição de muita água ao concreto tende a diminuir significativamente a resistência à compressão. Por outro lado, de acordo com Kihara e Centurione (2005), a redução significativa da relação água/cimento pode prejudicar a hidratação do cimento Portland, de tal forma que uma fração das partículas permanecerá anidra.

De acordo Mindess (2008), para o concreto comum, a relação a/c é o parâmetro que influencia significativamente na resistência à compressão do material como um todo, haja vista a resistência dos agregados ser, normalmente, muito maior que a resistência da pasta. Portanto, atenção deve ser dispensada à resistência à compressão da pasta em virtude desta configurar o elo mais fraco do composto de base cimentícia contendo agregados, ou seja, o ligante (pasta de cimento) determina a capacidade de suportar carregamento do concreto.

Neville (2011) afirma que a resistência à compressão do concreto, em uma determinada idade e curada em água a uma temperatura prescrita, depende, principalmente, de dois fatores: da relação água/cimento e do grau de compactação da mistura.

Outro componente das misturas de concreto/argamassas são os agregados que, de acordo Neto (2005), nos primeiros estudos do concreto de cimento Portland, acreditava-se que os agregados tinham apenas o papel de enchimento e, por ocupar um volume considerável, tratava-se apenas de um material inerte destinado a baratear o custo final de produção do concreto. Com o transcorrer das aplicações em larga escala,

ficou evidenciado a verdadeira função dos agregados, sobretudo no âmbito técnico e econômico.

A definição de agregado é de um material granular, sem forma ou volume definido, de dimensões e propriedades adequadas às obras de engenharia, em particular ao fabrico de concretos e argamassas de cimento Portland (Neto, 2005).

A região de interface entre o agregado e o cimento, por ser o elo fraco no sistema, requer, de acordo Mindess (2006), mais atenção sobre as características físicas e mineralógicas dos agregados, pois estes representam entre 70 e 80% do volume do concreto, assim sendo, a resistência à compressão do concreto depende da relação água/cimento e das características da interface entre o agregado graúdo e a pasta de cimento, denominada zona de transição.

Na atualidade, outro composto importante para ser incorporado nas misturas de concretos e argamassas são os aditivos, em especial os aditivos plastificantes, responsáveis em aumentar ou assegurar a trabalhabilidade. Também podem ser utilizados como agente de manutenção da fluidez em decorrência da redução da relação água/cimento ou em virtude da maior incorporação de agregados por unidade de volume de concreto ou argamassa.

## **2.2 Aditivos**

Os avanços na indústria química proporcionaram o aperfeiçoamento de características específicas dos compostos de base cimentícia, tanto no estado fresco, quanto no estado endurecido. De acordo Whitney (2008), nas últimas décadas, foi obtido um enorme avanço nas misturas de concretos e argamassas em decorrência do uso de diversos aditivos disponíveis no mercado. Essa disponibilidade potencializou o desenvolvimento da indústria de concretos e argamassas com o intuito de melhorar variados setores da construção e um deles está relacionada ao aumento da resistência mecânica e da durabilidade dos produtos executados com a incorporação de aditivos químicos.

De acordo a ASTM C 494/C (2009), aditivos são produtos a serem adicionados às misturas de concreto para diversos propósitos, a saber:

Tipo A – Redutores de água.

Tipo B – Retardadores.

Tipo C – Aceleradores.

Tipo D – Redutores de água e retardadores.

Tipo E – Redutores de água e aceleradores.

Tipo F – Redutores de água de alto desempenho.

Tipo G – Redutores de água de alto alcance e retardadores.

A norma brasileira NBR 11.768 – Aditivos químicos para concretos de cimento Portland, (ABNT, 2011) trata sobre os aditivos químicos para concreto de cimento Portland. O documento conceitua aditivo químico como um produto adicionado durante o processo de preparação do concreto, em quantidade não maior que 5,0% da massa de material cimentício contido no concreto, com o objetivo de modificar suas propriedades no estado fresco e/ou no estado endurecido.

Martin (2005) afirma que um aditivo químico pode ser utilizado para modificar ou melhorar a reologia do concreto fresco, como a trabalhabilidade, o tempo de pega e o tempo de endurecimento, o teor de ar aprisionado e/ou incorporado; a durabilidade através da resistência às ações físico-químicas que o material de base cimentícia estará exposto durante sua vida útil; e a resistência mecânica em diferentes idades. Por fim, os aditivos também podem ser utilizados para a redução do custo unitário do material, seja ele concreto ou argamassa.

A atuação do aditivo na mistura cimentícia é influenciada pelo tipo de cimento e dos agregados usados, pela temperatura ambiente, pela energia de mistura, pela concentração do aditivo e pelo período de tempo após o início da sua interação com as partículas do cimento.

### **2.2.1 Aditivos Redutores de Água**

Os plastificantes são tipos específicos de aditivos que podem conferir aumento de fluidez, melhorar a consistência e a trabalhabilidade para baixos níveis de relação água/cimento, o que implica diretamente no aumento da resistência à compressão. Estes aditivos também podem agir diminuindo o consumo de cimento por unidade de volume de concreto ou argamassa quando se tem por objetivo manter a consistência do material fixa (Martin, 2005).

Para Castro e Pandolfelli (2009), o compósito formado pela mistura de cimento, água e agregados contém a pasta que é constituída de partículas com granulometria fina (diâmetro das partículas  $\leq 75 \mu\text{m}$ ) e, ao ser misturada em uma baixa relação água/cimento, apresenta matriz densa obtida a partir da otimização do empacotamento dos materiais granulares finos, o que reduz a trabalhabilidade do compósito. O ajuste da trabalhabilidade pode ser obtido com a dispersão das partículas, o que é promovida pela incorporação de aditivos químicos à mistura. A redução da trabalhabilidade, de acordo os autores, é motivada pela tendência à aglomeração das partículas do cimento quando dispersas em água, pois há formação de ligações interpartículas decorrentes de forças eletrostáticas entre cargas opostas e ligações envolvendo as moléculas de água e os grãos de cimento. Essa aglomeração faz com que a água fique retida nos aglomerados, tornando-a indisponível para contribuir na fluidez do sistema. Portanto, a principal função da utilização do aditivo plastificante é eliminar os aglomerados, formando suspensões dispersas que apresentam menor viscosidade e permitem a utilização de maiores concentrações de sólidos.

O aditivo plastificante age justamente reorganizando o empacotamento das partículas que, de acordo Corrêa (2010), provoca uma repulsão eletrostática entre os grãos de cimento imersos em água, gerando uma melhor dispersão destes grãos na pasta do concreto ou argamassa, evitando a formação de grumos e promovendo uma hidratação mais homogênea e efetiva em toda superfície específica do cimento. Assim sendo, há uma maior regularidade da microestrutura e, conseqüentemente, maior resistência à compressão devido à redução das falhas de hidratação.

De acordo Hoppe, Pileggi e Cincotto (2005), a água atua sob três formas distintas no sistema de base cimentícia, a saber: **a)** como água retida nos aglomerados; **b)** como película de água adsorvida nos grãos de cimento, de forma que esta quantidade de água não contribui para a fluidez do sistema; e **c)** sob a forma de água livre, a qual é responsável pela fluidez/viscosidade da pasta. A desaglomeração dos grãos disponibiliza a água retida nos aglomerados para atuar como água livre e, conseqüentemente, contribuir com a fluidez/viscosidade da pasta. Esta vantagem advém da utilização de aditivo dispersante eletroestérico na composição do material ligante.

Isto é possível, segundo Neville (2011), porque os principais componentes ativos dos aditivos dispersantes são agentes tensoativos. Estes agentes são adsorvidos nas

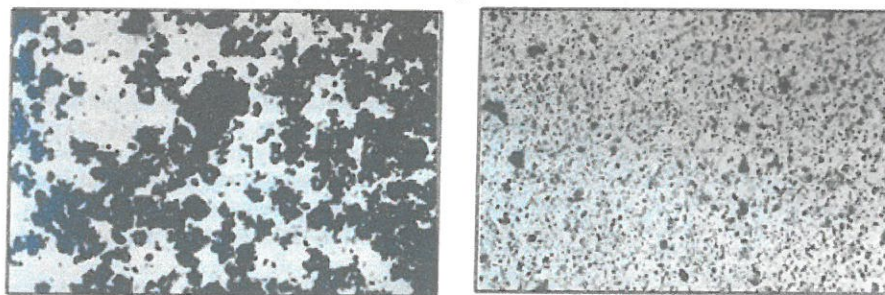
partículas de cimento, dando-lhes uma carga negativa que leva à repulsão, isto é, à sua defloculação, o que resulta na estabilização da dispersão. As bolhas de ar também são repelidas quando da presença dos agentes tensoativos e não podem se unir às partículas de cimento.

Na floculação há retenção de água e as partículas de cimento se tocam. As regiões em contato não estão livremente disponíveis para hidratação precoce o que, na presença de aditivo, não ocorre. De acordo Neville (2011), as partículas ao serem dispersas por meio de aditivos disponibilizam maior área de superfície para a hidratação inicial, além de aumentar a quantidade de água disponível para hidratação. A carga eletrostática de superfície das partículas decorrente da adsorção dos agentes do aditivo dispersante causa o desenvolvimento, em torno de cada partícula, de uma bainha de moléculas de água orientadas que impedem uma aproximação das partículas entre si e, com isso, adquirem uma maior mobilidade. A água liberada da influência restritiva do sistema floculado torna-se disponível para lubrificar a mistura de modo a aumentar a trabalhabilidade. Como efeito da dispersão de partículas de cimento, há uma maior exposição de área superficial de cimento para a hidratação, a qual progride, portanto, a uma taxa mais alta nos estágios iniciais (Neville, 2011).

Hoppe, Pileggi e Cincotto (2005) afirmam que os efeitos da utilização do aditivo ocorrem no estado endurecido com formação de microestrutura mais homogênea, favorecendo as propriedades de materiais cimentícios, por exemplo, as argamassas. E que embora o princípio ativo do aditivo seja de origem eletroquímica, onde polímeros aniônicos aderem-se aos grãos, tornando-os de carga negativa e conseqüentemente gerando repulsão eletrostática, o resultado é a individualização das partículas com diminuição do atrito interno e a maior facilidade de movimentação dos grãos no fluido.

A Figura 1 é proposta por Mehta e Monteiro (1994) onde ilustra a homogeneização da mistura com a incorporação do aditivo plastificante.

Figura 1- Partículas de cimento floculadas em uma suspensão água/cimento sem aditivo presente e um sistema após ser disperso com adição de um aditivo tensoativo.



Fonte: Mehta e Monteiro, 1994, p. 283.

Cabe ressaltar que muitos aditivos redutores de água apresentam um efeito retardador de pega do cimento, o que possibilita a concretagem de estruturas de grande volume. O aumento do tempo para que ocorra a pega, segundo Corrêa (2010), decorre da maior dispersão dos grãos, o que ocorre enquanto perduram as forças de repulsão eletrostática provocadas pelos aditivos na ligação da água com os compostos do cimento e esta mesma força eletrostática é responsável pela eliminação da formação de grumos de cimento, contrapondo-se às forças naturais de atração entre as partículas, possibilitando assim um melhor envolvimento da água sobre os grãos, gerando melhor nucleação e, conseqüentemente, um melhor nível de hidratação do cimento.

Diante do exposto, Neville (2011) afirma que os dois principais grupos de aditivos plastificantes com retardo da pega são: (a) ácidos lignosulfônicos e seus sais, e (B) ácidos carboxílicos hidroxilados e seus sais. Apesar dos aditivos redutores de água afetarem a taxa de hidratação do cimento, a natureza dos produtos de hidratação permanece inalterada, assim como a estrutura da pasta de cimento hidratada.

Segundo Antônio *et al.* (2014), além da obtenção de fatores almejados para o concreto fresco, em alguns casos outros fatores como permeabilidade, retração, calor de hidratação, tempo de pega e absorção podem ser interferidos pelo uso dos aditivos. Assim sendo, é necessário que haja controle das transformações químicas ocorridas com a introdução de aditivos no concreto, de tal forma que sejam estabelecidos limites de dosagem de aditivo, pois, de acordo Corrêa (2010), as mesmas bases que promovem um maior tempo de trabalhabilidade e maior plasticidade podem também gerar uma maior incorporação de ar, com efeitos negativos sobre as resistências mecânicas dos concretos e também tempos muito longos de retardamento da pega do cimento, com riscos de até mesmo inibir sua hidratação. Corrêa (2010) afirma que as limitações de dosagem, podem

ser usadas para diferenciar os aditivos redutores de água entre plastificantes, polifuncionais, superplastificantes e fluidificantes.

#### **2.2.1.1 Aditivo Plastificante Polifuncional**

Segundo a NBR 11.768 (2011), o plastificante é um aditivo que, sem modificar a consistência do concreto no estado fresco, permite reduzir o conteúdo de água; ou que, sem alterar a quantidade de água, modifica a consistência do concreto, aumentando o abatimento e a fluidez; ou, ainda aditivo que produz esses dois efeitos simultaneamente.

De acordo Whitney (2008), agentes redutores de água ou plastificantes, são adicionados para proporcionar capacidade de trabalho na matriz de concreto recém-misturado, enquanto se utilizam quantidades significativamente mais baixas de água, conseguindo uma melhor resistência e durabilidade. Esses agentes fornecem a lubricidade em misturas grosseiras que normalmente exigiriam cimento adicional ou mais água na pasta. Esta classe de misturas é tipicamente feita de lignosulfonatos, ácidos carboxílicos hidroxilados ou carboidratos.

Neville (2011), em termos gerais, afirma que os aditivos plastificantes são eficazes com todos os tipos de cimento Portland e que o efeito real de qualquer aditivo redutor de água depende do teor de cimento, água, tipo de agregado utilizado e presença de agentes pozolânicos, bem como da temperatura. É, portanto, notória a importância de serem realizados ensaios que contêm os materiais reais a serem utilizados na execução do material de base cimentícia, pois são essenciais para determinar o tipo e a quantidade de aditivo na mistura para a obtenção de propriedades otimizadas.

Nesse cenário existem várias teorias sobre os mecanismos responsáveis pela redução da demanda de água na matriz de concreto, mas segundo Martin (2005), existe substâncias que, ao serem adsorvidas pelos grãos de cimento, possuem efeito plastificante pela redução da tensão superficial da água ou pela defloculação através da mudança na carga elétrica das partículas do cimento. Esses produtos são utilizados para dar maior trabalhabilidade, incremento na resistência à compressão e durabilidade e na redução de custo. Dessa forma, Whitney (2008) complementa afirmando que a defloculação e a dispersão das partículas de cimento são o resultado líquido que

permitem uma melhor utilização da água disponível para uma lubrificação e hidratação mais uniformes.

Os primeiros materiais utilizados como redutores de água, de acordo Martins (2005), foram os polímeros derivados da lignina ou lignosulfonatos, os quais apresentam uma capacidade de redução de água de 5 a 12% e geralmente são derivados de um subproduto da indústria da celulose e papel. Devido a alguns efeitos, como retardo de pega e incorporação de ar, a dosagem destes aditivos deve ser limitada. Geralmente, a dosagem ótima gira em torno de 0,2 a 0,5% de material sólido em relação à massa de cimento. Alguns aditivos plastificantes, segundo Martin (2005), podem ter como base química lignosulfonatos com menor teor de impurezas ou, ainda, ter em sua formulação uma combinação destes subprodutos com outros agentes químicos. Estes aditivos são chamados de polifuncionais e sua base química, geralmente, não é padronizada e nem muito clara. São classificados como de médio desempenho, ficando entre os plastificantes convencionais e os superplastificantes. Este desempenho é alcançado em função de se poder utilizar um teor maior de aditivo, sem provocar retardo da pega e incorporação de ar excessivos.

A NBR 11.768 (2011) não abrange o conceito de aditivo plastificante polifuncional, mas, com base nos estudos de Corrêa (2010), tem-se que sua concepção foi a partir da mistura das bases químicas dos aditivos plastificantes e superplastificantes com o objetivo de obter um aditivo com alta plasticidade e um bom tempo de manutenção da trabalhabilidade para atender a demanda de um concreto com maior plasticidade na obra, mas que pudesse ser dosado a partir da central de concreto. De acordo o autor, as bases dos aditivos plastificantes como os lignosulfonatos e os gluconatos tem propriedades dispersantes até superiores aos superplastificantes, porém as limitações de dosagem dos plastificantes, pelos efeitos de retardamento e incorporação de ar, tornam o desempenho dos superplastificantes superiores pela possibilidade de se efetuar adições mais elevadas.

Aitcin e Baron (1996) *apud* Corrêa (2010) afirmam que os plastificantes redutores de água agem dispersando (defloculando) os grãos de cimento, assim como os outros finos e ultrafinos. Já os superplastificantes são dispersantes que funcionam sob o mesmo princípio que os plastificantes redutores de água, mas de uma maneira mais eficaz, visto que é possível deflocular completamente os grãos.

Mehta e Monteiro (2008) afirmam que a primeira geração de superplastificantes ou redutores de água de alta eficiência foram os compostos de sais sulfonados de melamina ou condensados de naftaleno formaldeído. Estas bases químicas, associadas às bases dos aditivos plastificantes, lignosulfonatos e gluconatos, de acordo Corrêa (2010), deram origem aos aditivos polifuncionais.

Neville (2011) define que os superplastificantes são polímeros orgânicos solúveis em água que devem ser sintetizados, usando um processo de polimerização complexa, para produzir moléculas longas de alta massa molecular e, portanto, são relativamente caras. Por outro lado, por serem fabricados para um propósito específico, suas características podem ser otimizadas em termos de comprimento de moléculas com reticulação mínima. Eles também têm um baixo teor de impurezas para que, mesmo em doses elevadas, não exibam efeitos colaterais indesejáveis. Os superplastificantes não alteram fundamentalmente a estrutura da pasta de cimento hidratada, sendo o principal efeito uma melhor distribuição das partículas de cimento e, conseqüentemente, sua melhor hidratação. Isso explicaria o comportamento observado em alguns casos, onde o uso de superplastificantes aumenta a resistência à compressão para uma relação água/cimento constante. Embora o mecanismo da ação dos superplastificantes não tenha sido totalmente explicado, é de conhecimento que eles interagem com  $C_3A$ , cuja hidratação é retardada. Uma consequência física é a formação de cristais de etringita de forma quase cúbica em detrimento à forma de agulha.

Os aditivos polifuncionais alcançam níveis de redução de água equivalentes aos superplastificantes, mas com maior tempo de manutenção da trabalhabilidade, o que resulta em uma nova segmentação aos aditivos redutores de água, a qual ainda não está normalizada.

Nesse cenário, Corrêa (2010) afirma que o aditivo polifuncional é a mescla dos compostos químicos dos plastificantes e dos superplastificantes, com propriedades muito diferentes de ambos, atingindo níveis de plasticidade próximos aos dos superplastificantes, associado a um bom tempo de manutenção desta plasticidade. Os polifuncionais apresentam limites de dosagem bem superiores aos aditivos plastificantes, que tem limites determinados pelos longos retardamentos e/ou possíveis incorporações de ar excessivas quando utilizados acima de certas dosagens. Geralmente a dosagem empregada para os aditivos plastificantes é em torno de 0,3 a 0,5% sobre a massa de

material cimentício. Normalmente recomenda-se a dosagem dos polifuncionais em torno de 0,6 a 1,0%, enquanto que as dosagens usuais de superplastificantes variam entre 0,6 a 1,5%, sempre em relação à massa do material cimentício.

Com isso, além do aspecto ecológico, o uso de aditivos redutores de água deve ser estimulado no meio da construção civil, pois, de acordo Corrêa (2010), pode proporcionar aos concretos e argamassas melhores características de resistências mecânicas e de trabalhabilidade, tornando-os mais adaptáveis aos processos de aplicação. Esta melhoria na trabalhabilidade promove um grande incremento no nível de qualidade do concreto executado em canteiro de obra, devido à melhor homogeneidade das misturas quando processadas com aditivos, o que proporciona também maior regularidade entre os traços do mesmo concreto. Ainda, segundo o autor, a redução de consumo de cimento no traço proporciona outros benefícios como uma menor liberação de calor de hidratação, o que favorece a elaboração de proporções de mistura (traços) para barragens, e também concretos de alto desempenho ou de pavimentos, os quais demandam um alto consumo de cimento e cura rigorosa em função das consequências do alto calor de hidratação. A redução de água na proporção de mistura (traço) também favorece a redução de efeitos de retração, considerando concretos de mesmas características e propriedades e sob mesmas condições de aplicação e cura.

### **2.3 Resistência mecânica**

Segundo Helene (2005), a resistência mecânica do concreto é o parâmetro mais frequentemente especificado, sendo a resistência à compressão a mais tradicionalmente utilizada como parâmetro principal de dosagem e controle da qualidade dos concretos destinados a obras correntes. Isso se deve principalmente a simplicidade do ensaio de compressão e pela resistência à compressão ser um parâmetro sensível às alterações de composição da mistura, permitindo inferir modificações em outras propriedades do concreto. O grau de hidratação e a relação água/cimento causam modificação na resistência à compressão e, dessa forma é indispensável à análise prévia destes parâmetros para realizar alteração no tipo de cimento Portland a ser utilizado em determinada aplicação.

Além da relação água/cimento, Martins (2005) cita alguns outros fatores que afetam a resistência mecânica, como a porosidade; a relação cimento/agregados; a natureza, granulometria e dosagem dos aglomerantes; a granulometria, dimensão máxima, forma, textura e mineralogia dos agregados; a qualidade da água de amassamento; os aditivos químicos, principalmente os retardadores e aceleradores; a idade; as condições de cura; e os parâmetros de ensaio.

## 2.4 Porosidade

De acordo Paulon (2005), a pasta de cimento hidratado é uma união relativamente heterogênea de partículas, filmes, microcristais e elementos sólidos, ligados entre si por uma massa porosa contendo, em seu estado nativo, espaços com soluções e alguns vazios (poros).

O volume da água evaporável na pasta em um concreto saturado varia de aproximadamente 60% na hora da mistura para aproximadamente 40% quando o cimento está completamente hidratado. Esta água contém íons, primeiramente  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{SO}_4^{-2}$  e  $\text{OH}^-$ , cujas concentrações variam com o tempo. A concentração de alguns íons aumenta enquanto que a de outros diminui. Assim, com a evolução da hidratação, a porosidade vai diminuindo e os vazios, que inicialmente eram ocupados pelo eletrólito, vão sendo preenchidos pelos compostos que se formam no decorrer do tempo (Monfore, 1968 apud Valdés *et al.*, 2017).

Os poros existentes no concreto convencional são considerados como parte integrante da matriz (pasta de cimento) e podem ser encontrados em diversos tamanhos. Os microporos são responsáveis pela formação da porosidade intrínseca; os mesoporos e macroporos formam o sistema capilar do material. O sistema de distribuição de poros do concreto é fortemente influenciado por fatores como dosagem do concreto (principalmente relação a/c), cura, quantidade e tipo de adições e aditivos químicos. (Paulon, 2005).

### **3. Materiais e métodos**

O capítulo que segue apresenta os materiais utilizados na etapa experimental do presente trabalho, além dos métodos utilizados para promover o objetivo sugerido, e para isso foi feito o ensaio de mini tronco de cone de Kantro, para avaliar o espalhamento da argamassa, o ensaio de resistência à compressão e avaliação da porosidade nas idades de 7, 28 e 56 dias.

#### **3.1 Materiais**

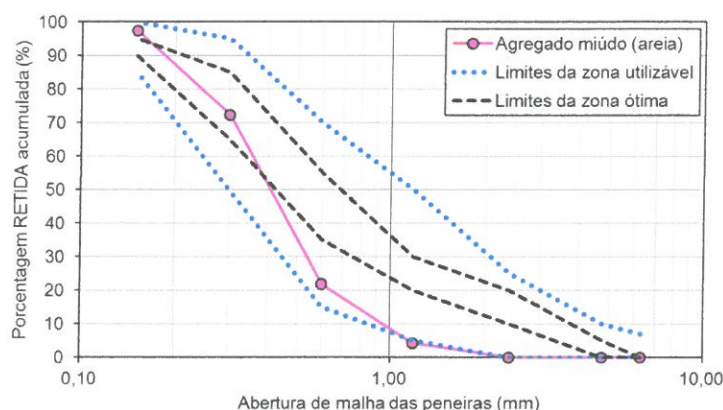
##### **3.1.1 Cimento Portland**

O cimento Portland utilizado para desenvolvimento do trabalho foi do tipo CP II – Z – 32, da marca Ciplan, de acordo com a norma ABNT NBR 11.578 (1991). A massa específica do cimento adotada foi de  $3,00 \text{ g/cm}^3$ . A adoção deste valor se deve à falta de infraestrutura laboratorial da Instituição para a realização dos ensaios de caracterização do cimento. A escolha desse tipo de cimento foi devido a sua ampla utilização na região de Barreiras no estado da Bahia.

##### **3.1.2 Agregado miúdo**

O agregado miúdo utilizado para a realização das argamassas foi adquirido na região de estudo e apresenta características comuns a areia extraída de leito de rio. A massa específica da areia, determinada em duplicata, é de  $2,56 \text{ g/cm}^3$ . A massa unitária no estado solto, determinada em triplicata, é de  $1,57 \text{ g/cm}^3$ . Com base nestas características físicas, obtém-se a porosidade da estrutura granular, que é de 38,60 %. A distribuição granulométrica do agregado miúdo é apresentada na Figura 2.

Figura 2 - Distribuição granulométrica do agregado miúdo.



**Agregado miúdo:**

Diâmetro máximo característico: 1,20 mm.

Módulo de finura: 1,95.

A distribuição granulométrica não atende os limites da zona utilizável proposto pela ABNT NBR 7211/2009.

Fonte: Própria.

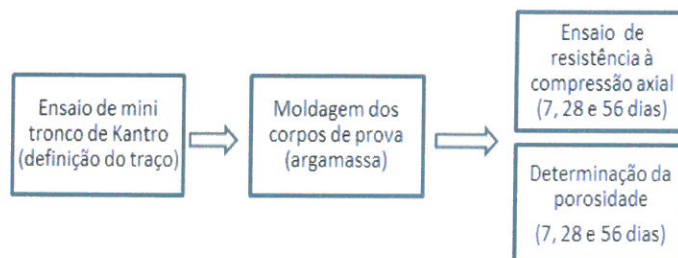
### 3.1.3 Aditivo Plastificante Polifuncional

O aditivo utilizado foi um plastificante polifuncional redutor de água, da marca Grace Construction Products, da linha Mira Set 28 que, de acordo o fabricante, foi desenvolvido para aplicação em temperatura ambiente elevada com alto poder dispersante e boa manutenção de abatimento. De acordo o fabricante, o aditivo possui massa específica que varia entre 1,12 - 1,18 g/cm<sup>3</sup>, obtido pela ABNT NBR 10.908 (2008). Para fins deste trabalho, adotou-se a massa específica de 1,15 g/cm<sup>3</sup>.

### 3.2 Métodos

Os métodos utilizados para analisar a influência da incorporação de aditivo, e o consequente aumento no teor de areia incorporado, sobre a resistência à compressão axial e porosidade de argamassas são demonstrados na Figura 3.

Figura 3 – Procedimentos realizados.



Fonte: Própria.

O ensaio de Kantro foi utilizado para avaliar a consistência/fluidez das argamassas. No presente estudo, o espalhamento da argamassa foi mantido constante e, portanto, com a adição de teores crescentes de aditivo dispersante houve a necessidade de aumentar gradativamente o teor de agregado miúdo (areia) às argamassas para manter sua consistência constante. Assim sendo, o ensaio de Kantro foi utilizado para estabelecer a proporção de mistura das argamassas, de mesma relação água/cimento e consistência, com teores variados de aditivo dispersante.

O planejamento experimental deste estudo foi realizado nos Laboratórios da Universidade Federal do Oeste da Bahia, *Campus Barreiras*. A descrição dos métodos utilizados na realização do planejamento experimental é apresentada a seguir.

### **3.2.1 Proporções de mistura das argamassas**

O presente estudo está fundamentado na análise da influência da incorporação de aditivo dispersante na composição de argamassa misturada na relação água/cimento = 0,55, a qual apresentou espalhamento médio no ensaio de mini tronco de cone de Kantro de 72,24 mm. O espalhamento da argamassa de referência, sem aditivo, foi pré-estabelecido como pré-requisito para as argamassas aditivas, as quais tiveram a relação água/cimento mantida fixa, ou seja, igual a 0,55.

Assim sendo, a incorporação de teores crescentes de aditivo dispersante à argamassa de referência propiciou espalhamentos também crescentes, ou seja, a consistência foi alterada. Com o intuito de restabelecer o espalhamento ao valor pré-estabelecido, foi adicionado parcelas de agregado miúdo à argamassa até que houvesse a compensação do efeito do aditivo dispersante. A adequação das proporções de mistura das argamassas em função dos teores de aditivo utilizados constituiu a etapa preliminar do presente estudo. Como resultado desta etapa, obtiveram-se as proporções de mistura utilizadas para a execução das argamassas, as quais são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Composição das argamassas utilizadas no estudo.

Argamassas	Cimento Portland CP II – Z – 32	Agregado Miúdo (areia)	Relação água/cimento	Aditivo Plastificante Polifuncional
Referência	1,00	1,35		0,00 %
Mistura 1	1,00	1,81		0,25 %
Mistura 2	1,00	1,91	0,55	0,50 %
Mistura 3	1,00	2,33		1,00 %
Mistura 4	1,00	2,45		2,00 %

Fonte: Própria.

Os teores de aditivo de 0,50 e 1,00 % representam a faixa de utilização recomendada pelo fabricante, enquanto o teor de 0,25 % está abaixo da recomendação e o teor de 2,00 % representa o dobro do teor máximo sugerido. A extrapolação da faixa de utilização tem por objetivo verificar as alterações de comportamento da argamassa decorrentes da presença do aditivo em baixo teor e, sobretudo, quando utilizado em superdosagem.

Cabe destacar que o aditivo utilizado, por ser líquido, possui água na sua composição. Logo a relação água/cimento é alterada com a incorporação do aditivo, entretanto como o fabricante não divulga o percentual de água na composição não foi considerado a influência desta na relação água/cimento das argamassas.

### 3.2.2 Mistura da argamassa

A partir das proporções de mistura apresentadas na Tabela 1, as argamassas foram misturadas em um vasilhame polimérico utilizando como misturador uma furadeira convencional, na qual foi acoplada uma pá de mistura utilizada em bateadeiras domésticas. A adoção deste método de mistura se fez necessário em virtude da falta de infraestrutura laboratorial da Instituição.

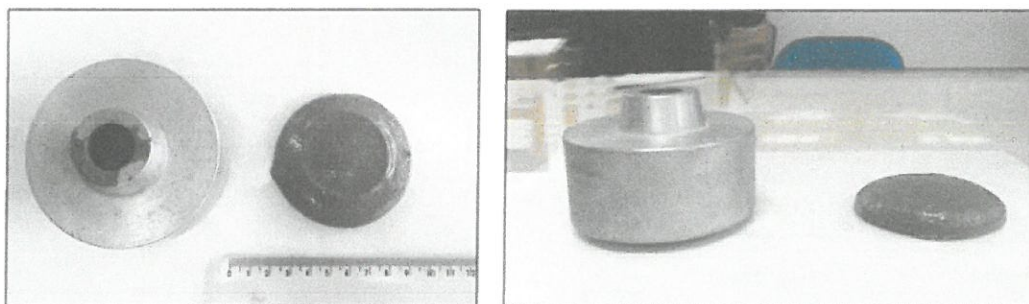
O aditivo foi misturado previamente à água de mistura, a qual foi lançada completamente no recipiente polimérico e, sobre esta, foi lançado o cimento. Na sequência, o agregado miúdo foi adicionado em parcelas, sendo misturado gradativamente à pasta. A mistura demandou tempo suficiente para a constatação visual da homogeneidade da argamassa, ou seja, aproximadamente 5 minutos para a realização do ciclo completo de mistura.

### 3.2.3 Ensaio no mini tronco de cone de Kanro

O ensaio de mini tronco de cone, de acordo Kanro (1980), consiste em lançar a argamassa no mini tronco de cone, o qual deve estar sobre uma placa de vidro, ambos devidamente lubrificados. O preenchimento do cone foi feito em três camadas, sendo cada camada compactada com uma haste e, logo após o completo preenchimento, o cone foi levantado com um movimento rápido o suficiente para que o molde não restrinja o escoamento da pasta fluida. Ao término do escoamento foram feitas medidas de dois diâmetros ortogonais entre si sobre o disco formado, utilizando um paquímetro. A média dos diâmetros caracteriza o espalhamento da argamassa, o qual esta relacionada à fluidez e à trabalhabilidade da mistura.

A Figura 4 apresentam o mini tronco de cone de Kanro e o disco de argamassa resultante do ensaio de espalhamento.

Figura 4 - Ensaio de cone de kanro.



Fonte: Própria.

### 3.2.4 Moldagem dos corpos de prova

As argamassas, após a mistura, foram lançadas nos moldes cilíndricos, de dimensões  $\varnothing 5 \times 10$  cm, em quatro camadas. O adensamento de cada camada foi realizado pela aplicação de 30 golpes de soquete padrão, de acordo com as recomendações da ABNT NBR 7.215/1996. As argamassas permaneceram nos moldes, em repouso, durante 24 horas em temperatura ambiente, para então serem desmoldadas e submetidas à cura submersa em água saturada com cal. A cura submersa perdurou até as idades de ensaio de resistência à compressão axial e porosidade. Para cada uma das argamassas estudadas foram moldados doze corpos-de-prova, dos quais quatro foram

ensaiados aos 7 dias, quatro aos 28 dias e quatro aos 56 dias. Na Figura 5 são apresentados os corpos-de-prova após a desmoldagem.

Figura 5 - Corpos de prova.



Fonte: Própria.

#### **3.2.4.1 Argamassa contendo 2,00 % de aditivo**

A cura da argamassa com teor de 2,00 % de aditivo demandou um procedimento diferente do adotado nas outras misturas. Essa alteração decorreu do retardo no tempo de pega dos corpos de prova. Após transcorridas 24 horas da moldagem, os CP's permaneciam enrijecidos porém não endurecidos, o que impediu a imersão em água saturada com cal para a cura. Caso houvesse a imersão dos CP's em água, estes se desagregavam. Diante desta situação, os CP's, desmoldados, foram mantidos em ar atmosférico por período de 24 horas para, então, serem curados em água saturada com cal. Portanto, neste caso, a cura se iniciou após 48 horas da mistura das argamassas.

#### **3.2.5 Ensaio de resistência à compressão axial**

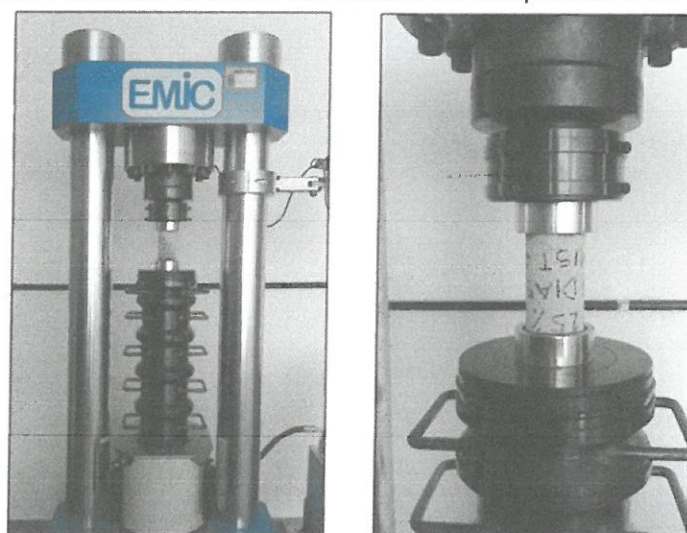
Os ensaios de resistência à compressão axial foram realizados segundo a ABNT NBR 7.215/1996 Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão, que trata sobre o método pelo qual devem ser ensaiados à compressão os corpos de prova cilíndricos de argamassa.

As imperfeições e irregularidades das superfícies planas nos corpos-de-prova foram suavizadas pelo uso de pratos de aço que acomodam discos de neoprene de

dureza *shore* 70. A disposição de um corpo-de-prova, com os pratos de aço contendo os discos de neoprene, na prensa hidráulica para o ensaio de resistência à compressão é mostrado na Figura 6.

O ensaio de resistência à compressão axial foi realizado nas idades de 7, 28 e 56 dias em máquina de ensaio de compressão (prensa hidráulica) da marca EMIC, modelo PC 200C.

Figura 6 - Equipamento utilizado no ensaio de resistência à compressão axial.



Fonte: Própria.

### 3.2.6 Porosidade

A água presente no cimento hidratado está retida em diferentes graus de energia, pois em um extremo esta a água livre; no outro esta a água quimicamente combinada que constitui parte definitiva dos compostos hidratados. Entre essas duas esta a água de gel (adsorvida), retida em diversas outras formas. A água livre é retida nos capilares e está além do alcance das forças superficiais da fase sólida.

Dessa forma, a água que não é consumida na hidratação do cimento, permanece livre no sistema e, ao evaporar, dá origem à porosidade da argamassa endurecida. Com isso, quanto maior a relação  $a/c$ , maior o volume de poros capilares. Assim sendo, o volume de vazios depende da quantidade de água adicionada e do grau de hidratação do cimento, sendo essa tratada como porosidade aparente.

O ensaio de porosidade aparente das argamassas foi realizado em amostras

extraídas dos corpos-de-prova já submetidos ao ensaio de resistência à compressão axial. As amostras foram extraídas da região central dos corpos-de-prova, que já estavam fragmentados em decorrência da ruptura com compressão, com o auxílio de marreta e talhadeira.

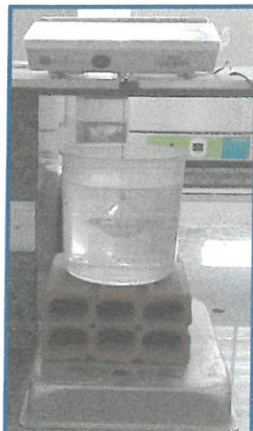
As formas das amostras obtidas eram irregulares, porém com dimensão máxima aproximada de 8,0 mm e sem a presença da superfície externa do corpo-de-prova. A dimensão máxima e a ausência da superfície externa tiveram como objetivo facilitar a secagem da amostra por liofilização e impedir a influência do efeito ocasionado pela argamassa em contato com o molde metálico.

É importante destacar que as amostras retiradas dos corpos de prova foram submergidas em água para garantir a completa saturação. Na sequência, em cada amostra, a superfície foi seca com auxílio de flanela para a determinação da massa saturada superfície seca ( $M_{SSS}$ ) e da massa submersa ( $M_{SUB}$ ), sendo esta última obtida por meio de balança hidrostática. A balança eletrônica utilizada foi da marca Marte, modelo AD2000.

Ao término da determinação da massa saturada superfície seca ( $M_{SSS}$ ) e da massa submersa ( $M_{SUB}$ ), cada amostra foi acondicionada em uma embalagem polimérica e estocada em ultrafreezer a uma temperatura de  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$  para a paralisação das reações de hidratação. A permanência mínima no freezer foi de 24 horas para, então, ser realizado o processo de secagem da amostra, por liofilização. Ao término da liofilização, a massa seca ( $M_S$ ) foi determinada na mesma balança eletrônica utilizada na determinação da massa saturada superfície seca ( $M_{SSS}$ ) e da massa submersa ( $M_{SUB}$ ).

Na Figura 7 está apresentada a adequação da balança eletrônica para determinação da massa submersa da amostra.

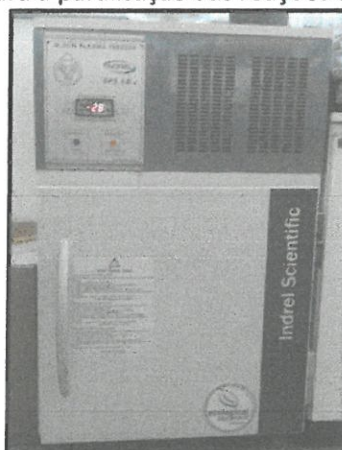
Figura 7 - Balança hidrostática utilizada para a determinação da massa submersa.



Fonte: Própria.

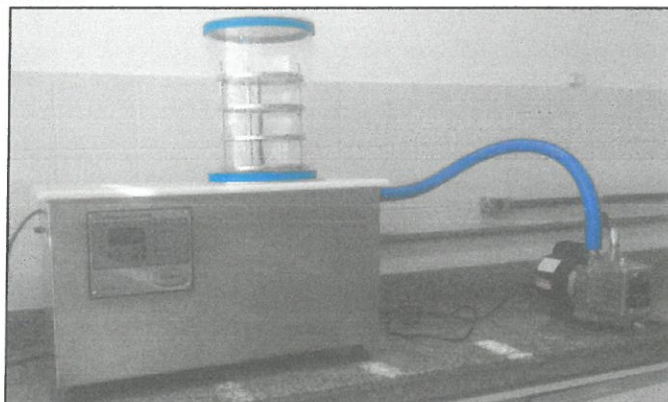
A Figura 8 apresenta o ultrafreezer utilizado para o congelamento das amostras e a Figura 9 apresenta o liofilizador utilizado para a secagem das amostras por sublimação da água.

Figura 8 - Ultrafreezer utilizado para a paralisação das reações de hidratação por congelamento.



Fonte: Própria

Figura 9 - Liofilizador utilizado para a secagem das amostras por sublimação da água congelada nos poros das argamassas.



Fonte: Própria.

A determinação da porosidade aparente das diferentes amostras de argamassas foi realizada por meio da Equação 1, baseada nos parâmetros propostos pela ASTM C20 (2005).

$$P = \frac{M_{SSS} - M_s}{M_{SSS} - M_{sub}} \times 100$$

Equação 1

Em que:

P – Porosidade (%);

$M_{SSS}$  – massa saturada de superfície seca (g);

$M_s$  – massa seca (g);

$M_{sub}$  – massa submersa (g).

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Ensaio de mini tronco de Kantro

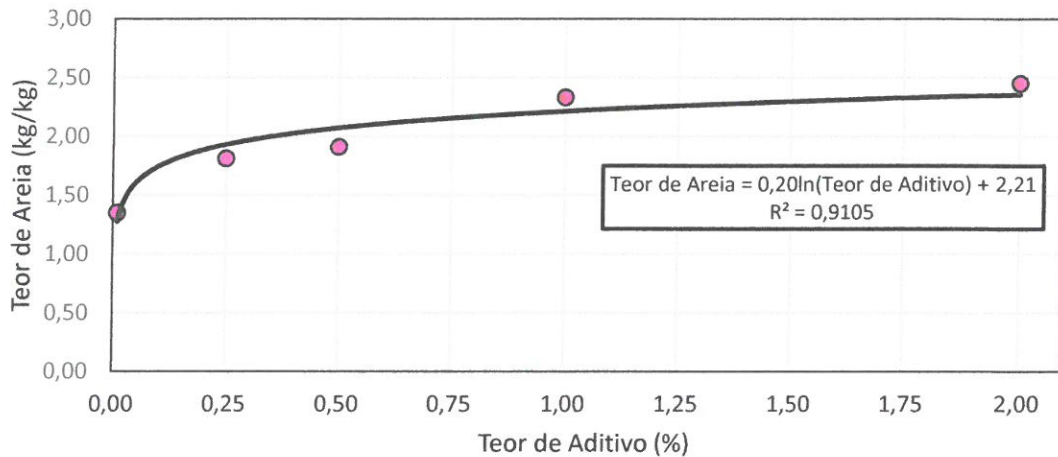
A intenção do trabalho é analisar o efeito de aditivo dispersante na resistência à compressão e porosidade de argamassas misturadas com relação água/cimento fixa ( $a/c = 0,55$ ) e de mesma consistência (espalhamento). De fato, a incorporação de aditivo dispersante à argamassa de referência resulta em maior espalhamento que, para ser restabelecido ao valor pré-estabelecido, demandou a incorporação de maior teor de areia à proporção de mistura das argamassas.

A determinação da proporção de mistura (traço) da argamassa de referência foi realizada em um estudo prévio de fluidez a fim de adequar a consistência às características físico-químicas dos materiais utilizados. A avaliação da consistência (espalhamento) foi realizada por meio do ensaio no mini tronco de cone de Kantro que, apesar das limitações, permite avaliar a trabalhabilidade da argamassa quando esta apresenta fluidez suficiente para propiciar um considerável espalhamento. A proporção de mistura resultante deste estudo foi: 1,00 : 1,35 : 0,55 (cimento : areia :  $a/c$ ), a qual apresentou espalhamento médio de 72,24 mm.

A partir da proporção de mistura da argamassa de referência, foram adicionados a esta argamassa os teores de aditivo dispersante de 0,25 %; 0,50 %; 1,00 % e 2,00 % em relação à massa de cimento. Obviamente que a utilização de teores crescentes de aditivo propiciou incrementos progressivos de espalhamento, o que foi compensado com a incorporação de maior quantidade de areia à argamassa, o que resultou em alteração nas proporções de mistura em função do teor de aditivo utilizado.

A Figura 10 apresenta a proporção de areia em relação à massa de cimento de cada argamassa em função do teor de aditivo dispersante incorporado à mistura.

Figura 10 - Teor de areia das argamassas em relação ao cimento, em massa, em função do teor de aditivo dispersante incorporado à mistura.



Fonte: Própria.

O teor de areia de 1,35 em relação ao cimento, em massa, na argamassa de referência aumenta progressivamente conforme aumenta a dosagem do aditivo dispersante. O incremento do teor de areia é significativo até o teor de aditivo de 1,00 %, passando a ser de 2,33. O teor de aditivo de 1,00 % representa a máxima dosagem recomendada pelo fabricante e, nesta situação, o teor de areia pode ser aumentado em 73 %, o que implica em considerável redução no consumo de cimento por unidade de volume de argamassa. A superdosagem de aditivo (2,00 %) propiciou pequeno incremento no teor de areia em relação à dosagem máxima (1,00 %), o que evidencia que o efeito dispersante do aditivo já foi otimizado quando da utilização da dosagem máxima recomendada pelo fabricante. Cabe destacar que a superdosagem de aditivo impactou no endurecimento da argamassa (tempos de pega) e, portanto, não deve ser utilizado na prática.

O aumento do teor de areia em relação à massa de cimento implica em redução da relação água/materiais secos das argamassas, a qual pode ser estabelecida pela Lei de Lyse. Apesar desta lei ser utilizada com frequência na tecnologia do concreto, sua aplicação pode ser extrapolada para argamassas, a fim de evidenciar o efeito do aditivo dispersante no consumo de água por unidade de volume de argamassa. A Lei de Lyse é apresentada na Equação 2.

$$H = \frac{a/c}{(1+m)} * 100$$

Equação 2

em que:

H – Relação água/materiais secos (%);

a/c – Relação água/cimento (kg/kg);

m – Relação agregado<sup>1</sup>/ material aglomerante (kg/kg).

<sup>1</sup> Originalmente, “m” refere-se à soma dos agregados presentes no concreto (miúdo e graúdo). No caso de argamassa, “m” refere-se somente ao agregado miúdo.

A variação na relação água/materiais secos das argamassas em decorrência da utilização de diferentes teores de aditivo dispersante é apresentada na Tabela 3.

Tabela 3 - Efeito do aditivo dispersante na relação água/materiais secos de argamassas com consistência (espalhamento) constante.

<b>Teor de Aditivo (%)</b>	<b>Agregado miúdo (areia) – “m” (kg)</b>	<b>a/c (kg/kg)</b>	<b>H (%)</b>
<b>0,00</b>	1,35		23,40
<b>0,25</b>	1,81		19,57
<b>0,50</b>	1,91	0,55	18,90
<b>1,00</b>	2,33		16,52
<b>2,00</b>	2,45		15,94

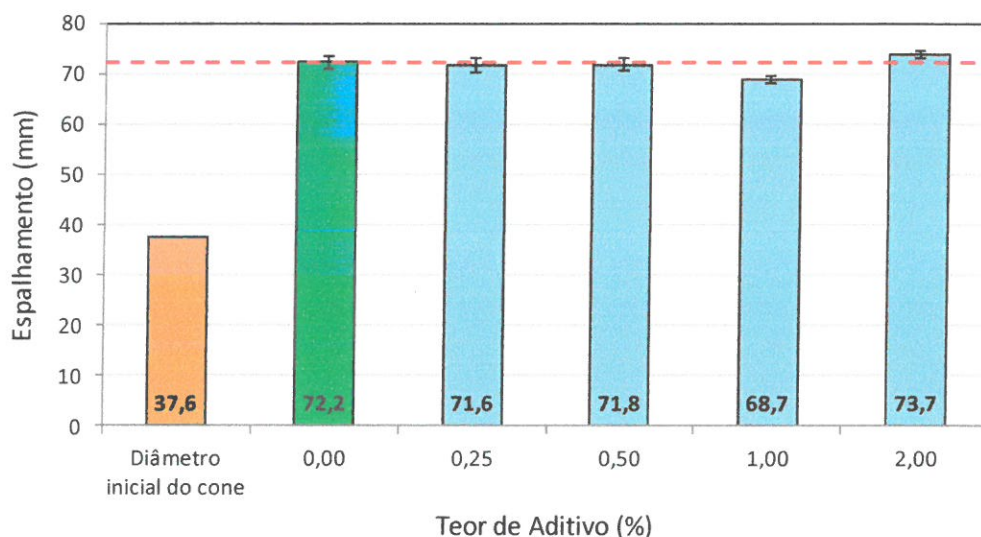
Fonte: Própria

A partir dos resultados apresentados na Tabela 2, é possível observar que a incorporação de aditivo dispersante, ao propiciar aumento no teor de areia em relação à massa de cimento, reduz significativamente a relação água/materiais secos para a condição de mesma consistência (espalhamento). Obviamente que o menor volume de água por unidade de volume de argamassa reduz a sua fluidez, o que foi compensado pelo efeito dispersor do aditivo sobre as partículas aglomeradas do cimento, liberando água para contribuir com o espalhamento da mistura cimentícia.

O espalhamento médio da argamassa de referência e das argamassas aditivadas, obtidos por meio de ensaio no mini tronco de cone de Kantro, são apresentados na Figura 11. Cabe destacar que o ensaio foi realizado após transcorridos 9 minutos da mistura do cimento com a água. Neste período de tempo, a argamassa contendo 2,00 % de aditivo apresentou espalhamento de 58,7 mm, ou seja, muito inferior ao valor de 72,2 mm estabelecido como requisito inicial. A superdosagem de aditivo impactou significativamente na consistência da argamassa, de tal forma que foi necessário maior intervalo de tempo para que a mistura se tornasse estável no tocante à fluidez.

Transcorridos 20 minutos, o efeito do aditivo se estabilizou e a argamassa passou a apresentar espalhamento de 73,72 mm.

Figura 11 – Espalhamento médio das argamassas obtido por meio do ensaio no mini tronco de cone de Kantro.



Fonte: Própria

A análise dos resultados apresentados na Figura 11 evidencia que é possível manter constante a consistência de argamassas aditivadas por meio do incremento do teor de areia incorporado à mistura.

#### 4.2 Resistência à compressão axial

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão realizados nas idades de 7, 28 e 56 dias, para os diversos teores de aditivos são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Resistência à compressão das argamassas nas idades de 7, 28 e 56 dias.

7 dias			
Argamassa	Resistência à compressão axial (MPa)	Desvio padrão (MPa)	Coefficiente de variação (%)
Referência	18,73	0,18	0,99
0,25 % aditivo	19,61	1,47	7,47
0,50 % aditivo	22,71	2,11	9,28
1,00 % aditivo	22,22	1,86	8,38
2,00 % aditivo	10,27	0,08	0,76

... continua na próxima página

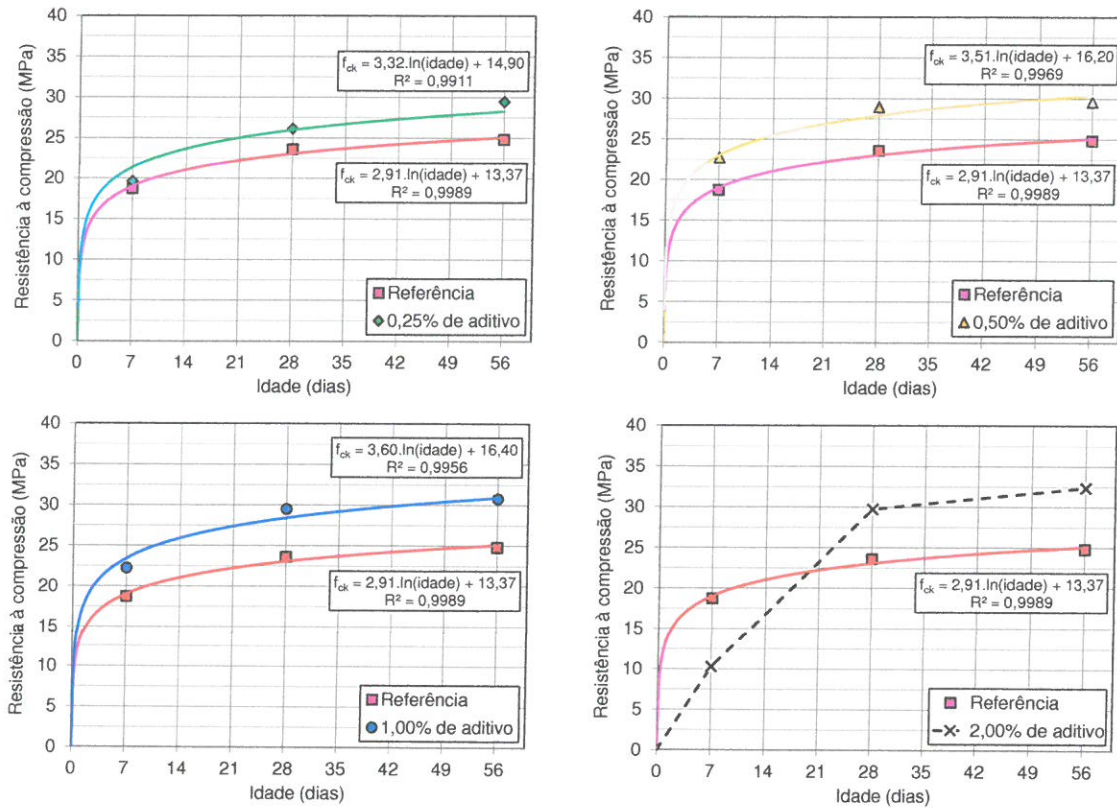
... continuação da Tabela 4.

28 dias			
Argamassa	Resistência à compressão axial (MPa)	Desvio padrão (MPa)	Coefficiente de variação (%)
Referência	23,59	2,29	9,72
0,25 % aditivo	26,13	1,22	4,65
0,50 % aditivo	28,98	1,23	4,25
1,00 % aditivo	29,51	2,66	9,02
2,00 % aditivo	29,72	1,26	4,25
56 Dias			
Argamassa	Resistência à compressão axial (MPa)	Desvio padrão (MPa)	Coefficiente de variação (%)
Referência	24,81	2,17	8,75
0,25 % aditivo	29,45	1,06	3,59
0,50 % aditivo	29,61	0,46	1,55
1,00 % aditivo	30,78	1,63	5,31
2,00 % aditivo	32,36	1,15	3,56

Fonte: Própria.

A evolução da resistência ao longo do tempo é apresentada na Figura 12. A fim de salientar o efeito dos diferentes teores de aditivo dispersante, os gráficos apresentam os resultados de resistência à compressão das argamassas aditivadas de forma individual, porém em conjunto com a argamassa de referência. Desta forma fica evidente a influência do aditivo em relação ao comportamento da argamassa de referência, sem aditivo. É notório o efeito potencializador da resistência à compressão quando da utilização de aditivo dispersante na composição da argamassa, mesmo para o teor de 0,25 %. Cabe destacar que o incremento na resistência à compressão depende da hidratação mais homogênea do cimento e, também, em virtude da maior concentração de sólidos do sistema, decorrente do maior percentual volumétrico de agregado miúdo.

Figura 12 - Evolução da resistência à compressão das argamassas com e sem aditivo dispersante.



Fonte: Própria.

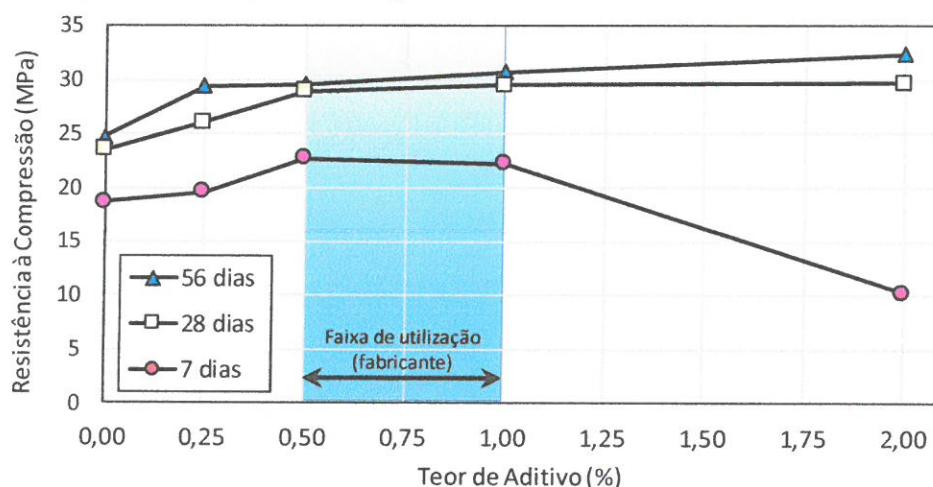
O incremento evolutivo na resistência à compressão é bastante similar para os teores de aditivo de 0,50 % e 1,00 %, os quais representam a faixa de utilização recomendada pelo fabricante. Portanto, no âmbito da resistência à compressão, não se justifica aumentar o teor de aditivo de 0,50 % para 1,00 %, pois os resultados serão similares. Por outro lado, o maior teor de aditivo (1,00 %) permite incorporar 2,33 kg de agregado miúdo para cada unidade de massa de cimento, enquanto que, para o teor de 0,50 %, essa massa é de 1,91 kg. Assim sendo, pode-se afirmar que o aumento do teor de aditivo de 0,50 % para 1,00 % permite aumentar o teor de areia incorporada na argamassa em 22 %. Em virtude do maior custo do aditivo em relação ao agregado miúdo, o incremento de 22 % no teor de areia incorporado não justifica o uso de maior teor de aditivo.

Por fim, para os teores de 2,00 % de aditivo, foi observado comportamento atípico na idade de 7 dias, ou seja, a resistência à compressão ficou muito aquém da observada na argamassa de referência. De fato, a superdosagem do aditivo comprometeu, nas primeiras idades, o endurecimento da argamassa em virtude da restrição à água imposta

ao cimento, resultado da grande adsorção de agentes dispersantes na superfície dos grãos. Desta forma, a hidratação inicial foi prejudicada, demandando maior tempo de cura para que as reações se desenvolvessem com intensidade satisfatória para dotar a argamassa de resistência mecânica compatível com as demais argamassas aditivadas. Aos 28 e 56 dias, a argamassa contendo aditivo em teor de 2,00 % atingiu valores de resistência à compressão similares aos observados na argamassa que utilizou teor de aditivo de 1,00 %.

Os valores de resistência à compressão, nas diferentes idades, em função dos teores de aditivo incorporados nas argamassas são apresentados na Figura 13.

Figura 13 - Resistência à compressão, nas diferentes idades, em função do teor de aditivo dispersante incorporado às argamassas.



Fonte: Própria.

Os resultados apresentados na Figura 13 evidenciam que a utilização de aditivo dispersante propicia incremento na resistência à compressão, o que já pode ser observado na idade de 7 dias, exceto quando há superdosagem. A faixa de utilização recomendada pelo fabricante resultou em incremento de resistência à compressão praticamente constante em relação à argamassa de referência em cada uma das idades estudadas, apesar da ocorrência de maior concentração de sólidos na argamassa quando do incremento no teor de aditivo. Diante destes resultados, pode-se afirmar que a utilização de 0,50% de aditivo representa o teor otimizado no que se refere ao incremento na resistência à compressão, sobretudo em virtude do custo do dispersante.

Na idade de 7 dias, o incremento médio na resistência à compressão decorrente da utilização de aditivo nos teores de 0,50% e 1,00% foi de 20%. Aos 28 dias, para a mesma faixa de utilização de aditivo, o incremento médio foi de 24%, enquanto que, aos 56 dias, o valor médio foi de 22%.

### 4.3 Porosidade das argamassas

A porosidade inicial teórica das argamassas foi determinada considerando-se o volume de água em relação ao volume total, representado pela soma dos volumes de cimento, areia, aditivo e água, como o volume de vazios contido no sistema no exato instante que antecede o contato da água com os demais materiais. A partir deste momento, as reações de hidratação que se sucedem propiciam a formação de compostos hidratados que reduzem paulatinamente a porosidade ao longo do tempo.

A Tabela 5 apresenta, além da porosidade inicial teórica, os valores de porosidade média ao longo do tempo para as diferentes argamassas estudadas.

Tabela 5 - Porosidade teórica das argamassas e nas idades de 7, 28 e 56 dias.

<b>Argamassa</b>	<b>Porosidade inicial teórica (%)</b>		
Referência	39,14		
0,25% aditivo	34,79		
0,50% aditivo	34,54		
1,00% aditivo	31,54		
2,00% aditivo	30,78		
<b>7 dias</b>			
<b>Argamassa</b>	<b>Porosidade (%)</b>	<b>Desvio Padrão (%)</b>	<b>Coefficiente de variação (%)</b>
Referência	27,21	1,83	6,72
0,25% aditivo	22,36	1,15	5,14
0,50% aditivo	22,38	2,00	8,94
1,0% aditivo	20,55	1,85	8,98
2,0% aditivo	19,04	1,29	6,77
<b>28 dias</b>			
<b>Argamassa</b>	<b>Porosidade (%)</b>	<b>Desvio Padrão (%)</b>	<b>Coefficiente de variação (%)</b>
Referência	23,46	2,22	9,46
0,25% aditivo	21,20	1,37	6,48
0,50% aditivo	20,20	0,84	4,16
1,0% aditivo	20,08	0,82	4,10
2,0% aditivo	19,88	1,04	5,22

56 dias			
Argamassa	Porosidade (%)	Desvio Padrão (%)	Coefficiente de variação (%)
Referência	23,03	1,14	4,94
0,25% aditivo	21,02	1,29	6,15
0,50% aditivo	20,60	0,07	0,32
1,00% aditivo	20,25	1,34	6,63
2,00% aditivo	19,32	1,88	9,75

Fonte: Própria.

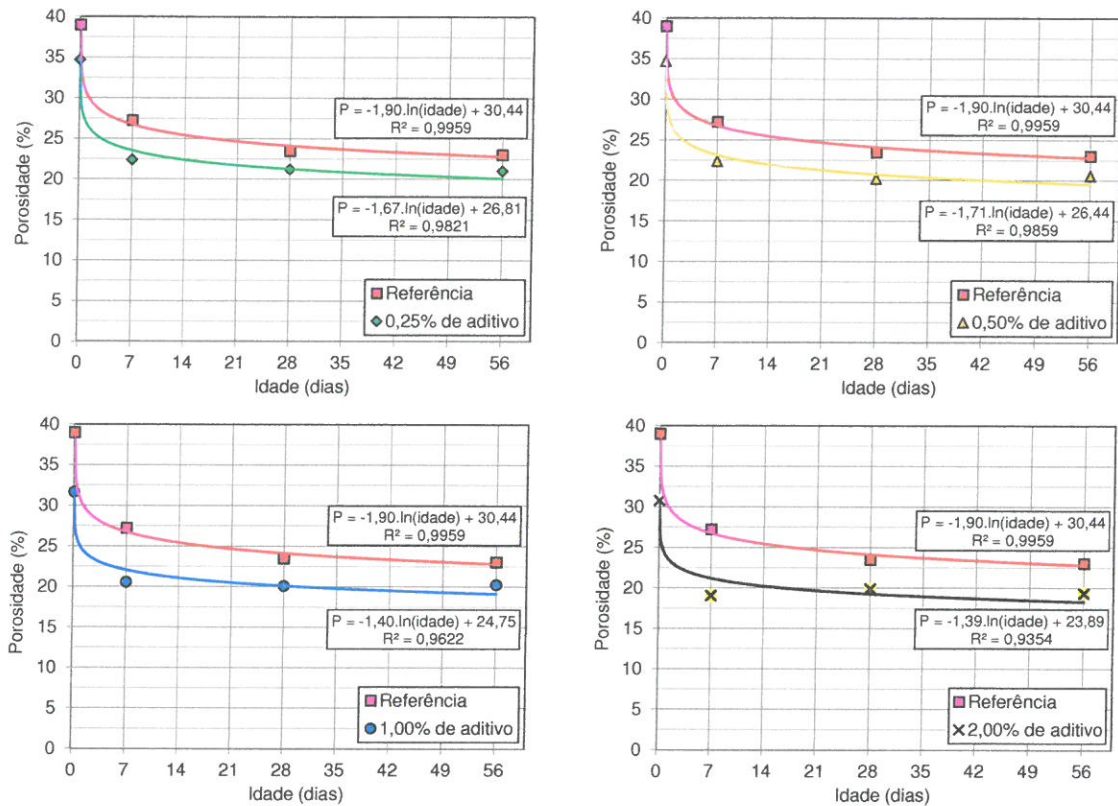
A evolução da porosidade ao longo do tempo das diferentes argamassas aditivadas em comparação à argamassa de referência é apresentada na Figura 14.

De fato, a porosidade apresenta redução ao longo do tempo devido às reações de hidratação do cimento Portland. Essa redução é mais expressiva nas primeiras idades, até os 7 dias. A partir desta idade, a porosidade continua a reduzir, porém em menor taxa.

A argamassa de referência, com porosidade inicial teórica de 39,14 %, apresentou, aos 7 dias, um volume médio de vazios de 27,21 %, atingindo uma porosidade média de 23,03 % aos 56 dias. Portanto, a hidratação do cimento no período de 56 dias propiciou uma redução na porosidade de 16,1% (39,1% - 23,0%). Na idade de 7 dias, a redução na porosidade já havia sido de 11,9% (39,1% - 27,2%), o que representa 74% da redução total observada no período de 56 dias. Este comportamento evidencia a importância das condições propícias para a hidratação do cimento das idades iniciais o que, na prática, se traduz na realização de um processo de cura bem criterioso.

A incorporação de aditivo dispersante na composição das argamassas impactou na porosidade inicial teórica dos sistemas cimentícios, pois o gradual acréscimo no teor de aditivo resultou em gradual incremento no teor de areia incorporado às respectivas argamassas. Desta forma, as argamassas aditivadas possuem, previamente à hidratação do cimento Portland, uma porosidade inicial inferior à apresentada pela argamassa de referência, devido as misturas com incorporação de aditivo possuírem um menor volume de cimento e conseqüentemente menor quantidade de água na sua composição. A argamassa com 0,25 % de aditivo possui porosidade inicial teórica de 34,79%, enquanto que, para a argamassa com 2,00 % de aditivo este valor era de 30,78 %. Portanto, as argamassas aditivadas tendem a apresentar menor porosidade ao longo do tempo em relação à argamassa de referência o que, de fato, ocorreu.

Figura 14 - Porosidade nas idades de 7, 28 e 56 dias.



Fonte: Própria.

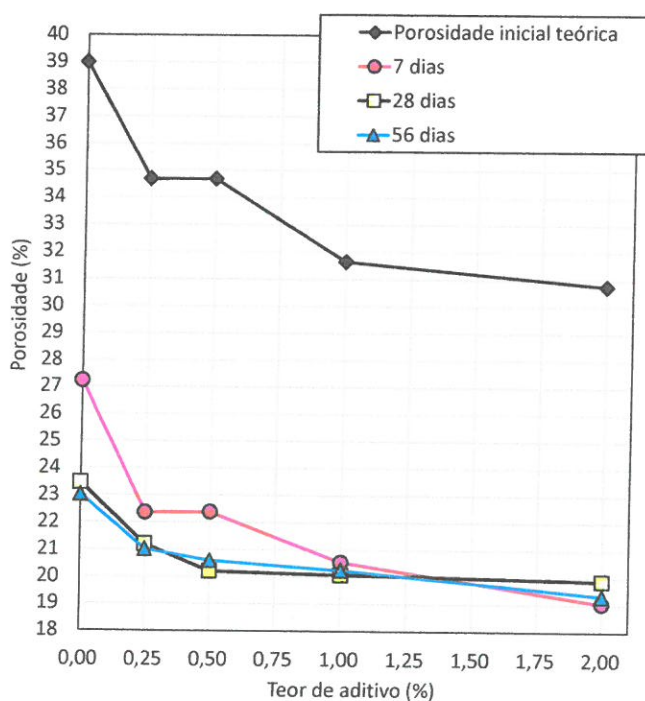
Outro aspecto importante relacionado à variação da porosidade ao longo do tempo decorre do volume de cimento contido em uma unidade de volume de argamassa. O uso de teores crescentes de aditivo implica em acréscimo no teor de areia incorporado à argamassa e, conseqüentemente, decréscimo no teor de cimento. Assim sendo, quanto maior o teor de aditivo na argamassa, maior o teor de areia incorporado, menor o teor de cimento e, por fim, menor a redução na porosidade ao longo do tempo. De fato, a redução da porosidade está relacionada, única e exclusivamente, à hidratação do cimento Portland. Logo, a argamassa que possui menor teor de cimento apresentará menor redução no volume de vazios a partir da porosidade inicial teórica. A argamassa de referência sofreu redução de 16,11 % ao longo de 56 dias. Já a argamassa com 0,50 % de aditivo, por exemplo, sofreu redução de 13,94 % (porosidade inicial teórica – porosidade aos 56 dias) (34,54 % - 20,60 %).

A alteração no comportamento relacionado à redução da porosidade nas idades iniciais (7 dias) quando da presença de aditivo dispersante na argamassa é outro aspecto que deve ser evidenciado. A argamassa de referência apresentou redução na porosidade,

aos 7 dias, equivalente a 74 % da redução observada aos 56 dias. As argamassas contendo 0,25 % e 0,50 % de aditivo apresentaram, nesta mesma idade, uma redução média na porosidade de 89 % em relação à redução aos 56 dias. Isto é um indício de que a presença de aditivo no sistema aumenta o grau de hidratação nas primeiras idades, o que se deve a maior dispersão dos grãos do cimento e, em consequência, maior área de superfície das partículas em contato com a água, o que aumenta o teor de compostos hidratados formados. Para o teor de 1,00 % de aditivo, a redução na porosidade aos 7 dias representou 97 % da redução obtida aos 56 dias e, para 2,00 % de aditivo, essa redução foi de praticamente 100%, ou seja, a porosidade não sofreu redução significativa após 7 dias de hidratação.

A representação gráfica deste comportamento pode ser observada na Figura 15.

Figura 15 - Porosidade, nas diferentes idades, em função do teor de aditivo dispersante incorporado às argamassas.



Fonte: Própria.

Os resultados da Figura 15 demonstram que a porosidade inicial teórica das argamassas reduz com o aumento gradativo do teor de aditivo, o que se deve ao incremento gradual do teor de areia incorporado às argamassas. No que se refere à

variação da porosidade entre 28 e 56 dias, pode-se afirmar que praticamente não houve alteração no volume de vazios contido na estrutura da matriz hidratada das argamassas.

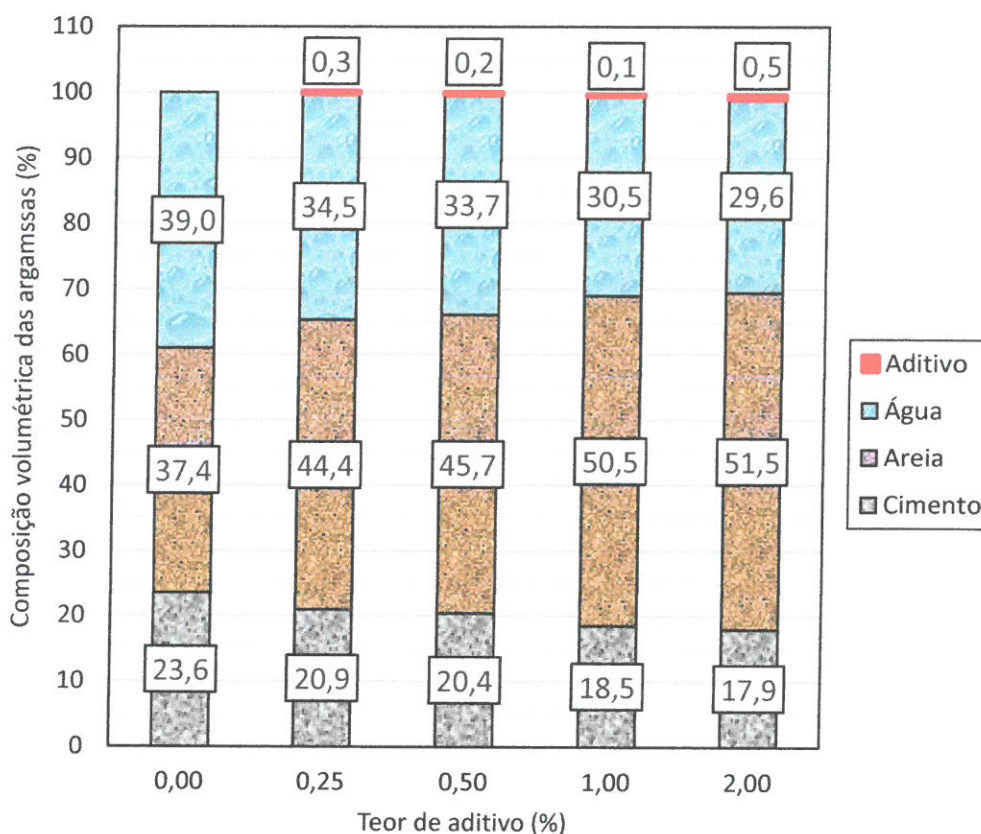
O comportamento observado entre 7 e 28 dias evidencia a influência do aditivo dispersante sobre a hidratação do cimento Portland, pois há distanciamento da curva que representa a idade de 7 dias em relação a curva de 28 dias no intervalo de 0,00 % a 1,00% de aditivo. Este distanciamento é maior na argamassa de referência, onde há a presença de aglomerados de partículas de cimento, o que impõe restrição à taxa de hidratação e, conseqüentemente, menor redução na porosidade aos 7 dias em relação à observada aos 28 dias. Para os teores de aditivo de 0,25 % e 0,50 %, onde há desaglomeração parcial das partículas de cimento, o distanciamento da curva de 7 dias em relação à curva de 28 dias é reduzido, ou seja, a taxa de hidratação foi aumentada. Já no teor de 1,00 % de aditivo, a maior dispersão das partículas permitiu que ocorresse maior grau de hidratação, de tal forma que a porosidade aos 7 dias é praticamente a mesma observada aos 28 dias.

Por fim, as porosidades, aos 56 dias, das argamassas contendo aditivo nos teores de 0,50 %, 1,00 % e 2,00 % são similares, o que evidencia que o teor de 0,50% representa o teor otimizado para uso diante das condições apresentadas neste trabalho.

#### **4.4 Custo unitário das argamassas estudadas**

Como apresentado anteriormente, o uso de aditivo dispersante em argamassas de relação água/cimento e consistência (espalhamento) fixas resulta em aumento no teor de areia incorporado, incremento na resistência à compressão e redução da porosidade quando comparadas à argamassa de referência, sem aditivo. A adoção do uso de aditivo dispersante na prática ainda é restrita em decorrência do seu valor agregado, o que perpetua a ideia de que argamassas aditivadas resultam em maior custo por unidade de volume. Este item do trabalho visa apresentar uma estimativa de custo unitário das argamassas a fim de esclarecer a questão relacionada à viabilidade do uso de aditivos dispersantes na composição dos materiais de base cimentícia. Para tanto, apresenta-se na Figura 16 a composição volumétrica das argamassas estudadas neste trabalho.

Figura 16 - Composição volumétrica das argamassas.



Fonte: Própria.

Os resultados apresentados na Figura 16 demonstram que o gradual aumento do teor de aditivo na composição das argamassas implica em gradual redução no consumo de cimento e, conseqüentemente, na demanda de água, haja vista a relação água/cimento ser fixa, além do aumento paulatino no teor de areia incorporado. Diante da composição volumétrica, foi determinado o consumo de materiais por unidade de volume (metro cúbico) das argamassas, o que é apresentado na Tabela 6.

Tabela 6 - Consumo de materiais por unidade volumétrica (metro cúbico) de argamassa.

Argamassas	Proporção de mistura	Consumo de materiais (kg/m <sup>3</sup> )			
		Cimento	Agregado Miúdo	Água	Aditivo
Referência	1,00 : 1,35 : 0,55	708,9	957,0	389,9	0,0
0,25 % de aditivo	1,00 : 1,81 : 0,55	627,9	1.136,6	345,4	1,6
0,50 % de aditivo	1,00 : 1,91 : 0,55	612,1	1.169,1	336,6	3,1
1,00 % de aditivo	1,00 : 2,33 : 0,55	554,9	1.292,9	305,2	5,5
2,00 % de aditivo	1,00 : 2,45 : 0,55	538,3	1.318,8	296,1	10,8

Fonte: Própria.

O custo dos materiais foi estabelecido a partir de valores praticados na região do município de Barreiras – BA, por meio de informações publicadas na Tabela SINAPI (Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil), tomando como base o mês de julho de 2017, e no site da Empresa Baiana de Águas e Saneamento S.A. (EMBASA). A Tabela 7 apresenta os respectivos custos dos materiais de interesse para este trabalho.

Tabela 7 - Custo dos materiais utilizados na composição das argamassas.

Item	Unidade	Preço (reais)	Referência
Cimento CP II – Z 32	kg	0,44	Preço praticado no comércio regional julho 2017 (22 reais/saco).
Água	L	0,02	EMBASA (julho 2017)
Areia	m <sup>3</sup>	61,60	Tabela SINAPI (julho 2017)
Aditivo	Kg	3,60	Preço praticado pelo fornecedor regional <sup>1</sup>

Fonte: Própria.

<sup>1</sup> O custo do aditivo para o mês de agosto de 2017, segundo o fornecedor regional, era de 2,26 reais/kg, ao qual foi acrescentado o valor de 1,34 reais/kg referente ao frete, totalizando 3,60 reais/kg.

A Tabela 8 apresenta o custo por unidade de volume das diferentes argamassas estudadas.

Tabela 8 - Consumo de materiais e custo unitário (m<sup>3</sup>) das argamassas.

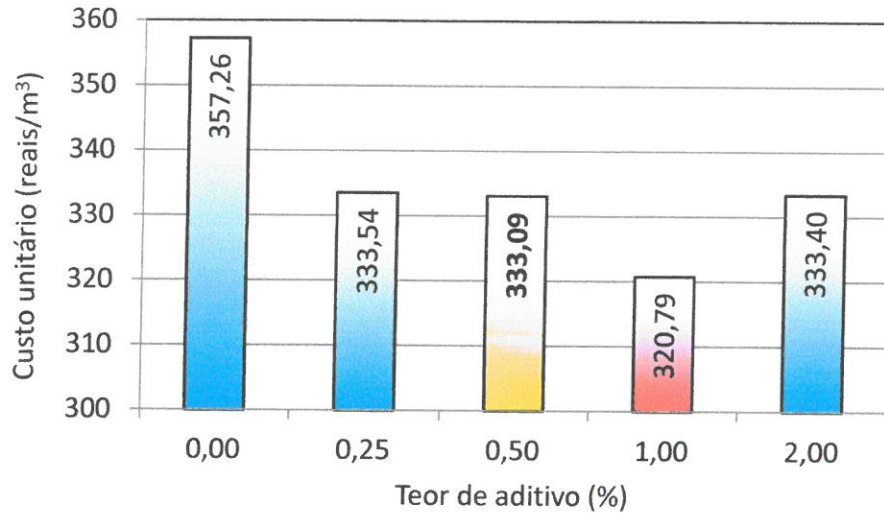
Argamassa	Cimento	Areia	Água	Aditivo	Preço Total (R\$)	
Referência	Consumo (kg/m <sup>3</sup> ) Preço (R\$)	708,9 311,92	957,0 37,55	389,9 7,80	0,0 0,00	<b>357,26</b>
0,25% de aditivo	Consumo (kg/m <sup>3</sup> ) Preço (R\$)	627,9 276,28	1.136,6 44,60	345,4 6,91	1,6 5,76	<b>333,54</b>
0,50% de aditivo	Consumo (kg/m <sup>3</sup> ) Preço (R\$)	612,1 269,32	1.169,1 45,87	336,6 6,73	3,1 11,16	<b>333,09</b>
1,00% de aditivo	Consumo (kg/m <sup>3</sup> ) Preço (R\$)	554,9 244,16	1.292,9 50,73	305,2 6,10	5,5 19,80	<b>320,79</b>
2,00% de aditivo	Consumo (kg/m <sup>3</sup> ) Preço (R\$)	538,3 236,85	1.318,8 51,74	296,1 5,92	10,8 38,88	<b>333,40</b>

Fonte: Própria.

O custo unitário da argamassa de referência foi de 357,26 reais, o que representa o maior entre as argamassas estudadas. A utilização de aditivo dispersante reduz

gradativamente o custo unitário das argamassas até o teor de 1,00%. A partir deste teor, o custo aumenta o que pode ser observado graficamente na Figura 17.

Figura 17 - Custo unitário das argamassas estudadas.

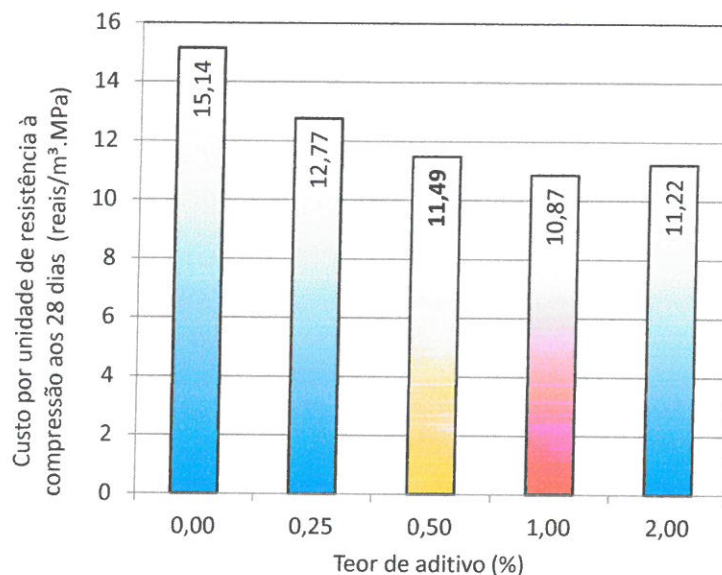


Fonte: própria

O custo de 320,79 reais para o teor de aditivo de 1,00% representa uma redução de 10% em relação à argamassa de referência. Já para o teor de 0,50%, o custo de 333,09 reais representa uma redução de, aproximadamente, 7% quando comparado ao custo da argamassa não aditivada. O teor de 0,50% de aditivo, apesar de não representar o menor custo unitário, foi o que se mostrou mais viável no tocante à resistência à compressão e porosidade. Assim sendo, este teor foi apresentado em destaque na Figura 17, bem como o teor de 1,00%, o qual representa o menor custo unitário.

Diante do custo unitário de cada argamassa e das respectivas resistências à compressão aos 28 dias de idade, pode-se estimar o custo por unidade de resistência à compressão, ou seja, para 1,0 MPa, como está representado na Figura 18.

Figura 18 - Custo de cada argamassa por unidade de resistência à compressão.



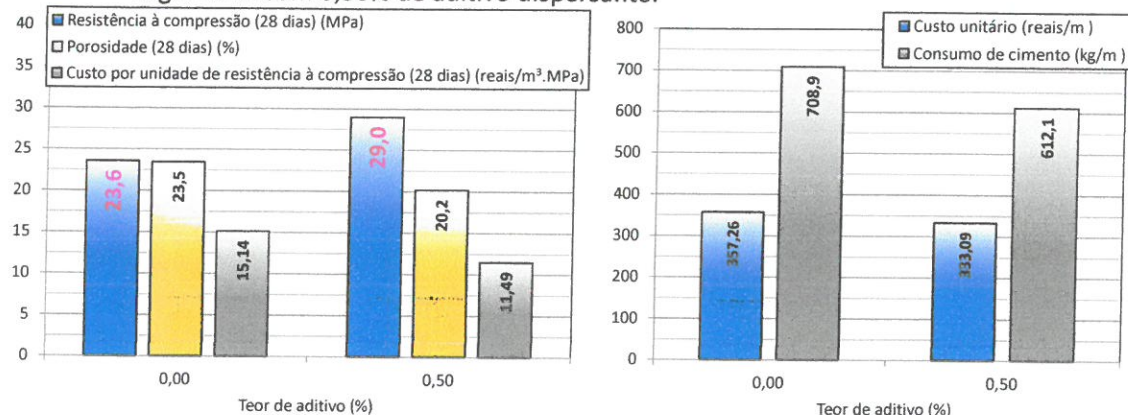
Fonte: Própria.

A argamassa de referência demanda o maior aporte financeiro por unidade de resistência à compressão, atingindo o valor de 15,14 reais/MPa. Este valor reduz gradativamente até o teor de aditivo de 1,00%, quando atinge o custo de 10,87 reais/MPa. Para o teor de 2,00% de aditivo, o custo passa a ser de 11,22 reais/MPa. Os menores custos encontram-se na faixa de dosagem prescrita pelo fabricante do aditivo, o qual recomenda a utilização entre 0,50% e 1,00% sobre a massa de cimento Portland e para o teor de 2,00 %.

A partir dos efeitos sobre a resistência à compressão, pode-se afirmar que o melhor teor de aditivo a ser utilizado é de 0,50%, apesar deste não representar o melhor custo benefício. A recomendação deste valor, o qual representa a dosagem mínima prescrita pelo fabricante, decorre dos efeitos sobre enrijecimento da argamassa, haja vista o teor de 1,00% e de 2,00 % apresentarem tendência ao retardo da pega para o cimento do tipo CP II Z – 32 utilizado neste trabalho.

Diante da recomendação do teor de aditivo de 0,50%, foi realizada uma análise comparativa da argamassa contendo este teor de aditivo com a argamassa de referência, não aditivada. A Figura 19 apresenta os principais resultados que subsidiam a comparação.

Figura 19 - Resistência à compressão, porosidade, custo por unidade de resistência à compressão, custo unitário e consumo de cimento da argamassa de referência, sem aditivo, e da argamassa com 0,50% de aditivo dispersante.



Fonte: Própria.

Conforme os resultados da Figura 19, a argamassa de referência, apesar do maior custo unitário e maior consumo de cimento, apresenta menor resistência em comparação à argamassa aditivada (teor de 0,50 %). A argamassa de referência também apresenta maior porosidade e maior custo por unidade de resistência à compressão em relação à argamassa contendo aditivo. De fato, a argamassa aditivada apresenta melhor custo x benefício, porém sua resistência à compressão (29,0 MPa) é 23 % superior à resistência da argamassa de referência (23,6 MPa). Diante deste fato, e objetivando tornar a argamassa aditivada ainda mais econômica em comparação à argamassa de referência, foi realizado o ajuste da proporção de mistura da argamassa aditivada com o intuito de equiparar, aos 28 dias, a resistência à compressão de ambas as misturas.

O estudo para a alteração da proporção de mistura da argamassa com teor de aditivo de 0,50 % partiu da proporção inicialmente utilizada, ou seja, 1,00 : 1,91 : 0,55 (cimento : areia : relação água/cimento). Nesta proporção de mistura foi adicionada uma parcela de água para a obtenção de relação água/cimento = 0,62, o que interferiu na fluidez da argamassa, aumentando o espalhamento no ensaio realizado no mini tronco de Kantro. A compensação da maior fluidez foi realizada pela incorporação gradativa de areia, até a obtenção de espalhamento similar ao pré-estabelecido (72,2 mm). A proporção de mistura ajustada para a relação água/cimento = 0,62 é apresentada na Tabela 9.

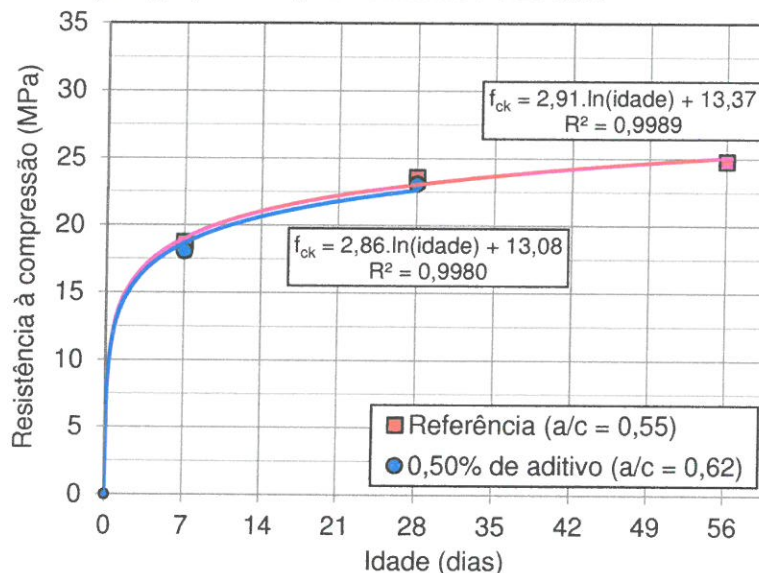
Tabela 9 - Proporção de mistura ajustada da argamassa contendo 0,50% de aditivo para equiparação da resistência à compressão com a argamassa de referência.

Argamassas	Cimento Portland CP II – Z – 32	Agregado Miúdo (areia)	Relação água/cimento	Aditivo Plastificante Polifuncional
Mistura 2 AJUSTADA	1,00	2,50	0,62	0,50 %

Fonte: Própria.

A evolução da resistência à compressão da argamassa ajustada para equiparar-se à argamassa de referência é apresentada na Figura 20. Os resultados de resistência à compressão da argamassa que teve a relação água/cimento aumentada para 0,62, bem como o teor de areia para 2,45, são similares aos obtidos na argamassa de referência. Como nas aplicações práticas a resistência à compressão é o principal parâmetro a ser submetido ao controle tecnológico, a comparação entre argamassas de mesma resistência mecânica evidencia, de fato, a viabilidade da utilização de aditivo dispersante na composição do material de base cimentícia.

Figura 20 – Resistência à compressão da referência nas idades de 7,28 e 56 e da argamassa com nova relação água/cimento, nas idades de 7 e 28 dias.



Fonte: Própria.

Os resultados de resistência à compressão e porosidade da argamassa de referência e da argamassa contendo 0,50 % de aditivo, a qual teve a proporção de mistura ajustada, são apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 – Resistência à compressão e porosidade da argamassa de referência e da argamassa com nova relação água/cimento.

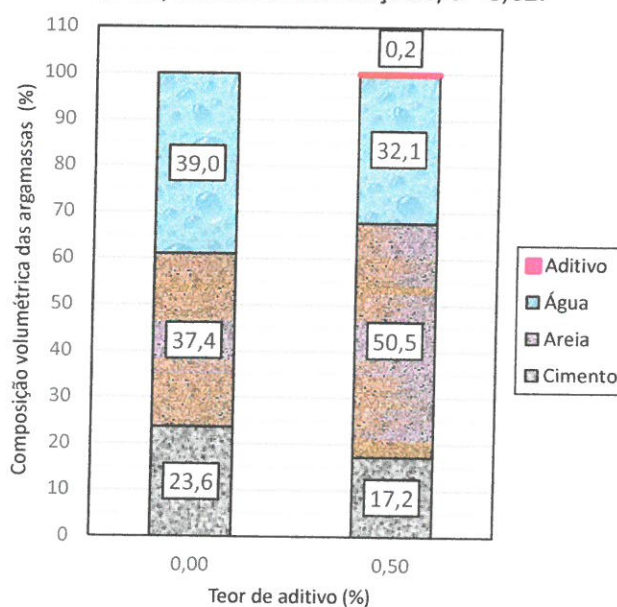
7 dias						
Argamassa	Resistência à compressão axial (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coefficiente de variação (%)	Porosidade (%)	Desvio Padrão (%)	Coefficiente de variação (%)
Referência	18,73	0,18	0,99	27,21	1,83	6,72
0,50% Aditivo (Ajustada)	18,06	0,60	3,33	24,26	0,67	2,76
28 dias						
Argamassa	Resistência à compressão axial (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coefficiente de variação (%)	Porosidade (%)	Desvio Padrão (%)	Coefficiente de variação (%)
Referência	23,59	2,29	9,72	23,46	2,22	9,46
0,50% Aditivo (Ajustada)	23,10	0,72	3,10	22,07	1,00	4,53

Fonte: Própria.

A argamassa aditivada apresentou menor porosidade, aos 7 dias, em comparação à argamassa de referência. Já aos 28 dias, a porosidade das argamassas foi similar, da ordem de 23 %.

A Figura 21 apresenta a composição volumétrica das argamassas, evidenciando o menor consumo de cimento e o maior teor de areia na argamassa aditivada.

Figura 21 - Composição volumétrica da argamassa de referência, sem aditivo, e da argamassa aditivada (teor de 0,50%) misturada na relação a/c = 0,62.



Fonte: Própria.

A partir do aumento da relação a/c, pode-se acrescentar um maior teor de areia na argamassa, e com um menor volume de água e de cimento, manter fixa a trabalhabilidade estabelecida na referência em decorrência da ação do aditivo, garantindo ainda que a resistência à compressão fosse similar à da argamassa utilizada como parâmetro.

Os custos unitários da argamassa de referência e da argamassa aditivada são apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 - Custo da argamassa de referência e da com nova relação água/cimento.

Argamassas		Cimento	Areia	Água	Aditivo	Custo Total (R\$)
Referência	<b>Peso Específico (kg/m<sup>3</sup>)</b>	708,9	957,0	389,9	0	<b>357, 26</b>
	<b>Preço (R\$)</b>	311,92	37,55	7,80	0	
0,50 % de aditivo AJUSTADA	<b>Peso Específico (kg/m<sup>3</sup>)</b>	517,0	1.292,5	320,5	2,6	<b>294, 29</b>
	<b>Preço (R\$)</b>	227,48	51,04	6,41	9,36	

Fonte: Própria.

A argamassa aditivada (com teor de 0,50 %) com resistência à compressão similar à argamassa de referência possui custo unitário de 294,29 reais, valor que representa uma redução de 18 % em comparação ao custo da argamassa de referência.

Diante desta análise, fica evidente que a utilização de aditivo dispersante na composição de argamassa de resistência à compressão pré-estabelecida resulta em menor valor unitário em comparação a argamassa sem aditivo e de mesma resistência à compressão. Portanto, o uso de aditivo dispersante na composição de argamassas deve ser incentivado, haja vista as vantagens técnicas advindas desta utilização, sobretudo a redução do consumo de cimento Portland por unidade volumétrica de argamassa.

A menor demanda por cimento representa redução do impacto ambiental para a execução de determinada aplicação de material de base cimentícia, ou seja, insere a construção civil nos preceitos da sustentabilidade. Cabe salientar que a análise apresentada neste estudo está baseada na resistência à compressão, a qual representa um parâmetro a ser avaliado no tocante ao desempenho do material de base cimentícia. A presente metodologia pode ser extrapolada para outros parâmetros de durabilidade a fim de ampliar o conhecimento técnico-científico a respeito da utilização corriqueira de aditivo dispersante na composição de argamassas e concretos.

## **5. Considerações Finais**

Com a incorporação de aditivo dispersante, a proporção de areia adicionada às argamassas para a adequação da trabalhabilidade foi considerável, atingindo, no maior teor de aditivo utilizado (2,00 %), um acréscimo de 55 % na quantidade de areia em relação à argamassa de referência.

Para os teores de aditivos a partir de 1,00 % houve retardo na pega, sendo esse comportamento agravado no teor de 2,00 %, o que inviabiliza sua utilização prática.

Houve aumento da resistência à compressão com o incremento do teor de aditivo, sendo que a argamassa com 0,50 % de aditivo resultou em um acréscimo de 19 % em relação à referência. A partir desse teor, o incremento foi pequeno. O teor de 0,50 % de aditivo, sugerido como teor mínimo a ser utilizado pelo fabricante, foi considerado, neste trabalho, o teor ótimo de utilização.

A porosidade das argamassas reduziu gradativamente em função de teores crescentes de aditivo. Cabe destacar que a redução depende, principalmente, do maior teor de areia incorporado às argamassas aditivadas, o que reduz a porosidade inicial teórica.

A argamassa com 0,50 % de aditivo na composição, apesar da maior resistência à compressão em comparação a argamassa de referência, não aditivada, apresentou custo unitário inferior, o que viabiliza economicamente a sua utilização. A argamassa aditivada apresenta microestrutura mais homogênea, o que repercutiu positivamente na resistência à compressão.

A alteração da proporção de mistura (traço) da argamassa com 0,50 % de aditivo para equiparação da resistência à compressão com a argamassa de referência, reduziu o custo unitário em 18 %. Assim sendo, a argamassa aditivada, com resistência à compressão similar à argamassa de referência, apresenta viabilidade econômica e vantagens técnicas, de tal forma que esta prática deve ser incentivada nas aplicações cotidianas.

### **5.1 Sugestões para trabalhos futuros**

No trabalho experimental do estudo proposto, não foram realizados ensaios para a análise da distribuição do diâmetro dos poros, o que seria interessante para evidenciar

as alterações microestruturais decorrentes da utilização de aditivo dispersante. Este ensaio requer equipamento apropriado, o qual não está disponível na Instituição. Portanto, em um momento oportuno, esta avaliação seria fundamental para ampliar o conhecimento acerca do assunto tratado neste trabalho.

Outra sugestão seria a realização de estudo de avaliação da concentração de sólidos de argamassa aditivada sobre a resistência à compressão. Para tanto, a argamassa com relação água/cimento fixa e teor de aditivo (0,50%) também fixo, poderia ter o espalhamento diversificado, o que implicaria em diferentes concentrações de sólidos. Desta forma, poderia se avaliar se este efeito contribui significativamente para a alteração da resistência à compressão ou se este incremento decorre única e exclusivamente da ação do aditivo dispersante.

Também é recomendado o estudo de parâmetros de durabilidade confrontando a argamassa de referência, sem aditivo, e a argamassa aditivada, a fim de comprovar se o uso de aditivo se traduz em vantagens ou desvantagens técnicas.

## 6. Referências

ANTONIO, J.; NATAL, J.; MATEUS, L.; PRADO, P.; RODRIGUES, T.; CONTATO, R.; PINTO, C. O. **O uso de aditivos plastificantes em concretos baseado a porcentagens utilizadas.** In: Encontro de tecnologia da UNIUBE, 8., 2014, Uberaba.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11768 – Aditivos químicos para concreto de cimento Portland- Requisitos.** Rio de Janeiro, 2011.

\_\_\_\_\_. **NBR 7.211 – Agregados para concreto – Especificação.** Rio de Janeiro, 2009.

\_\_\_\_\_. **NBR 10908 – Aditivos para argamassa e concreto – Ensaio de caracterização.** Rio de Janeiro, 2008.

\_\_\_\_\_. **NBR 7.215 – Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão.** Rio de Janeiro, 1996.

\_\_\_\_\_. **NBR 11578 – Cimento Portland composto.** Rio de Janeiro, 1991.

American Society for Testing and Materials. **ASTM C494 - Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete.** West Conshohocken, 2009.

American Society for Testing and Materials. **Standard Test Methods for Apparent Porosity, Water Absorption, Apparent Specific Gravity, and Bulk Density of Burned Refractory Brick and Shapes by Boiling Water.** West Conshohocken, 2005.

CASTRO, A. L. PANDOLFELLI, V. C. **Revisão: Conceitos de dispersão e empacotamento de partículas para a produção de concretos especiais aplicados na construção civil.** Departamento de Engenharia de Materiais - DEMa, Universidade Federal de S. Carlos, 2009.

CORRÊA, A. C. A. **Estudo do desempenho dos aditivos plastificantes e polifuncionais em concretos de cimento portland tipo CIII-40.** 2010. 149 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia da construção)- Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2010.

EMPRESA BAIANA DE ÁGUAS E SANEAMENTO S.A.– EMBASA. **Abastecimento de água tratada bruta: Ligações medidas.** Disponível em: <http://www.embasa.ba.gov.br/centralservicos/index.php/tarifas>. Acessado em: agosto de 2017.

FERNANDES, F. M.; SILVA, B. V. **influência da adição de aditivo plastificante e água para manter o abatimento ao longo do tempo na resistência à compressão do concreto.**

2011. 19 p. Artigo (Graduação em Engenharia Civil)- Universidade do Extremo Sul Catarinense, Santa Catarina, 2011.

HELENE, Paulo. **Dosagem dos Concretos de Cimento Portland**. In: ISAIA, G. C. (Org.). *Concreto, Ensino, Pesquisa e Realizações*. 1. ed. São Paulo: IBRACON, 2005. cap. 15, p. 440-471. v. 1.

Hoppe, J. F.; Pileggi, R.; Cincotto, M. A. **Investigação sobre a dispersão de pastas de cimento, cinza volante e cal hidratada**. In: Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas, 6., 2005, Florianópolis.

KANTRO, D. L. **Influence of Water Reducing Admixtures on Properties of Cement Paste-A Miniature Slump Test, Cement Concrete and Aggregates**. CCAGDP, Vol. 2, No. 2, Winter 1980, p. 95-102.

KIHARA, Y.; CENTURIONE, S. L. **O Cimento Portland**. In: ISAIA, G. C. (Org.). *Concreto, Ensino, Pesquisa e Realizações*. 1. ed. São Paulo: IBRACON, 2005. cap. 10, p. 295-322. v. 1.

MARTIN, J. F. M. **Aditivos para concreto**. In: ISAIA, G. C. (Org.). *Concreto, Ensino, Pesquisa e Realizações*. 1. ed. São Paulo: IBRACON, 2005. cap. 13, p. 381-406. v. 1.

MARTINS, V. C. **Otimização dos processos de dosagem e proporcionamento do concreto dosado em central com a utilização de aditivos: estudo de caso**. Universidade de Santa Catarina - UFSC, Florianópolis, 2005.

MEHTA, P. K. MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 3 ed. São Paulo: IBRACON, 2008. Cap. 02.

MEHTA, P. K. MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. 1 ed. São Paulo: PINI, 1994.

MINDESS, S. **Concrete Constituent**. In: NAWY, E. G. (Org.). *Concrete Construction Engineering Handbook*. 2. ed. New Brunswick, New Jersey: CRC Press, 2008. cap. 1, p. 1-26. v. 1.

MINDESS, S. **Advanced Concrete for use in civil engineering**. In: WU, H. C. (Org.). *Advanced civil infrastructure materials – Science, mechanics and applications*. 1. ed. Florida: CRC Press, 2006. cap. 1, p. 1-27. v. 1.

NETO, C. S. **Agregados para Concreto**. In: ISAIA, G. C. (Org.). *Concreto, Ensino, Pesquisa e Realizações*. 1. ed. São Paulo: IBRACON, 2005. Cap. 11, p. 323-343. v. 1.

NEVILLE, A. M. **Properties of concrete**. 5. ed. Edimburgo Inglaterra: Pearson, 2011. 841 p. v. 1.

Paulon, C. S. **A microestrutura do concreto convencional**. In: ISAIA, G. C. (Org.). **Concreto, Ensino, Pesquisa e Realizações**. 1. ed. São Paulo: IBRACON, 2005. Cap. 19, p. 583-604. v. 1.

SALVADOR, A. J. **Desempenho de concretos bombeáveis fabricados com aditivo estabilizador de hidratação**. 2011. 92 p. Dissertação (Mestrado em Materiais de Construção Civil)- Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.

SCHMIDT, J. ALLEM P. M. **Estudo comparativo das resistências mecânicas do concreto de alta resistência inicial com substituição parcial do cimento Portland por metacaulim**. UNESC – Universidade do Extremo Sul Catarinense, Santa Catarina, 2016.

Sistema Nacional de Pesquisas de Custos e Índices da Construção Civil - SINAPI. **Preços de Insumos**. Disponível em: <http://www.caixa.gov.br/poder-publico/apoio-poder-publico/sinapi/Paginas/default.aspx>. Acessado em: agosto de 2017.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO – SNIC. **Relatórios anuais** Disponível em: <http://www.snic.org.br/>. Acessado em: julho de 2017.

VALDÉS, A. C. GALDER, F. OLIVEIRA, I. A. MEDEIROS, M. H. F. **Efeito do grau de hidratação, tipo de adição mineral e grau de saturação do concreto nas leituras de resistividade elétrica**. In: Simpósio Paranaense de Patologia das Construções, 2., 2017, Paraná.

WHITNEY, D. P. **Chemical Admixtures**. In: NAWY, E. G. (Org.). **Concrete Construction Engineering Handbook**. 2. ed. New Brunswick, New Jersey: CRC Press, 2008. cap. 3, p. 1-18. v. 1.