

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALFENAS

CAMPUS DE POÇOS DE CALDAS

**Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de
Materiais – PPG – CEM**

RODOLFO HENRIQUE FREITAS GRILLO

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DE ADITIVOS REDUTORES DE
ÁGUA EM CONCRETOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL**

Poços de Caldas/MG

2014

RODOLFO HENRIQUE FREITAS GRILLO

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DE ADITIVOS REDUTORES DE
ÁGUA EM CONCRETOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Alfenas como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais. Exemplar apresentado para exame de defesa. Linha de Pesquisa: Materiais e Compósitos Cerâmicos.

Orientador: Profa. Dra. Sylma Carvalho Maestrelli

Poços de Caldas/MG

2014

FICHA CATALOGRÁFICA

G859e Grillo, Rodolfo Henrique Freitas.

Estudo da influência de aditivos redutores de água em concretos da construção civil./Rodolfo Henrique Freitas Grillo. - Poços de Caldas, 2014.

73 fls.: il.; 30 cm.

Orientador: Sylma Carvalho Maestrelli.

Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais). – Universidade Federal de Alfenas- Poços de Caldas, MG, 2014.

Bibliografias: fls. 63-67

1. Cimento. 2. Defloculação. 3. Concreto civil. I. Maestrelli, Sylma Carvalho (orient.). II. Universidade Federal de Alfenas- UNIFAL. III. Título.

CDD 691.3

RODOLFO HENRIQUE FREITAS GRILLO

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DE ADITIVOS REDUTORES DE
ÁGUA EM CONCRETOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL**

A Banca examinadora abaixo-assinada aprova a Dissertação apresentada como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais pela Universidade Federal de Alfenas. Linha de Pesquisa: Materiais e Compósitos Cerâmicos.

Poços de Caldas, 29 de julho de 2014.

Banca Examinadora:

Profa. Dra. Sylma Carvalho Maestrelli
Orientador
Universidade Federal de Alfenas

Prof. Dra. Patrícia Neves Mendes
Universidade Federal de Alfenas

Profa. Dra. Claudia Gibertoni
Centro Cerâmico do Brasil

Dedico este trabalho à minha querida esposa Aline, aos meus pais, Francisco de Assis Grillo e Neide Freitas Grillo, aos meus irmãos Gustavo e Karín. As minhas madrinhas Lucí e Terezinha Falcão e com carinho especial e um sentimento muito grande de gratidão, aos meus avós, Carlos Freitas, Elba Alves Freitas, Vó Filinha, Maria Paschoal, Adelayde Bortolin e Silvío Grillo, que estiveram sempre presente nas minhas difíceis conquistas.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer a Deus, por ter me iluminado neste caminho dando-me força para enfrentar as dificuldades e sabedoria para superá-las.

Agradeço à minha esposa pelo apoio, compreensão e amparo nos momentos de dificuldades e tristeza, onde sempre se apresentou oferecendo ajuda, conselho e principalmente me fazendo enxergar sempre o melhor caminho.

A todos os meus familiares que de forma direta estiveram sempre presentes ao meu lado nesta conquista.

Agradecimento especial à minha orientadora Dra. Sylma Carvalho Maestrelli por ter acreditado e confiado em mim, dando-me a oportunidade de desenvolver um trabalho que pudesse enriquecer meus conhecimentos e principalmente, me proporcionado oportunidades de trilhar novos caminhos para minha vida, do qual sei que serei muito feliz.

À professora Dra. Patrícia Neves Mendes no auxílio das análises dos resultados. Estendo meus agradecimentos a todos os professores do PPG-CEM, pois sempre se mostraram muito prestativos.

À Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais (PUC) – Poços de Caldas, em especial aos professores Dr. Jose Gabriel Maluf Soler e M.Sc. Luiz Antônio dos Reis pelo auxílio na parte experimental, disponibilizando-me gentilmente o Laboratório de Construção Civil.

À CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, pelo auxílio financeiro.

À indústria de refratários TOGNI S/A pela contribuição na caracterização química dos cimentos e à indústria BASF S/A (segmento dispersantes), pela colaboração na doação dos aditivos.

“Sem sonhos, as perdas se tornam insuportáveis,
as pedras do caminho se tornam montanhas,
os fracassos se transformam em golpes fatais.
Mas se você tiver grandes sonhos ...
seus erros produzirão crescimento,
seus desafios produzirão oportunidades,
seus medos produzirão coragem.
Por isso, meu ardente desejo é que você
nunca desista de seus sonhos.”

Augusto Cury

RESUMO

Os aditivos redutores de água para concretos são dispersantes de alta eficiência que promovem uma redução na viscosidade das suspensões, minimizando a quantidade de água utilizada na hidratação do cimento; contudo, além das características reológicas do sistema, os aditivos influenciam no processo de hidratação do cimento, com conseqüente formação de uma microestrutura diferenciada e com excelentes propriedades como um todo, permitindo assim a obtenção de concretos menos porosos com elevada resistência mecânica e maior durabilidade. Os grupos funcionais das moléculas dos aditivos geram cargas ao adsorverem na superfície da partícula do cimento, promovendo a defloculação por repulsão eletrostática, ou simplesmente, adsorverem na superfície da partícula do cimento e gerar a defloculação, criando barreiras físicas causadas pelas cadeias longas dos polímeros, fenômeno conhecido como efeito estérico. Entretanto, uma série de ocorrências causada pela incompatibilidade entre aditivo e o cimento vem sendo relatada, pois o processo de interação que ocorre entre o aditivo e o cimento ainda não está consolidado. Verifica-se, em muitos casos, a ocorrência de incompatibilidade entre o cimento e o aditivo, exigindo uma avaliação criteriosa de combinações únicas, levando em consideração o tipo e a marca do cimento e do aditivo, uma vez que é observada diferentes formas de interações entre eles. Neste trabalho, investigou-se o efeito de um aditivo redutor de água de última geração nas propriedades de um concreto no estado fresco e endurecido, formulado a partir do cimento CII E-32. As propriedades analisadas dos concretos foram: determinação do abatimento (Slump Test), determinação do tempo de início de pega, fim de pega e tempo em aberto (método Vicat) e resistência mecânica à compressão aos 7, 14 e 28 dias. As dosagens dos concretos envolveram combinações entre dois fabricantes de cimento, três dosagens de aditivo superplastificante (0,2%, 0,4%, 0,6%), e quantidade de água específica para cada dosagem de aditivo. Os resultados mostraram que o aditivo superplastificante possui forte influência nas características do concreto final, uma vez que sua presença aumenta o tempo de trabalhabilidade para as formulações investigadas tanto com cimento Cauê como o cimento Holcim. A presença do aditivo permitiu menores dosagens de água para a hidratação do cimento, ocasionando uma melhoria na plasticidade e nas propriedades de resistência mecânica em geral. Quando comparada as duas marcas de cimento nas

propriedades dos concretos, observou-se uma superioridade, em termos de resultados nas formulações envolvendo o cimento Holcim. A análise de variância comprovou a forte influência do tipo de cimento, bem como do teor de aditivo presente nas formulações nas propriedades mecânicas do produto. O cimento Cauê apresentou maior tempo para a hidratação, o que, no canteiro de obras, se torna uma vantagem em termos de aplicação e adensamento do concreto. Em contrapartida, a maior plasticidade e resistência mecânica, obtidas com a utilização do cimento Holcim, tornam este último mais atrativo sob o ponto de vista da obra, já que o mercado atual tem exigido a execução destas obras em tempos cada vez mais reduzidos.

Palavras- Chave: Cimento, Aditivo Redutor de Água, Defloculação, Concreto Civil.

ABSTRACT

Water-reducing admixtures for concrete are high efficiency dispersants that promote viscosity reduction of suspensions, minimizing the amount of water used to hydrate the cement. However, besides rheological characteristics of the that system, the additives influence the hydration process of the cement, with consequent formation of a microstructure differentiated and with excellent properties, thus allowing for the attainment of less porous concretes with elevated mechanical resistance and greater durability. Once adsorbed to the surface of the concrete particle, the molecular functional groups of these additives create charges that promote deflocculation by electrostatic repulsion or may simply cause deflocculation by creating physical barriers through the long polymer chains phenomenon known as steric effect. Nonetheless, a series of occurrences caused by incompatibility between additive and cement are being reported, since the interaction process between them is still not consolidated. There is, in many cases, the incompatibility between cement and additive is detected, a rigorous evaluation of unique combinations is warranted considering the type and brand of both cement and additives, given that different interactions between them can occur. In this work, It was investigated the effect of a last generation water reduced additive on the properties of concrete in fresh and hardness status, dosed with cement CP II E-32. The properties of concrete analyzed were: determination of rebatement (*Slump Test*), determination of the initial setting time, final setting time and open time (Vicat method) and mechanical resistance after 7, 14 e 28 days. The dosages of concretes involved combinations between two cement types, three dosages of superplasticizer additives (0,2%, 0,4%, 0,6%), and specific amount of water to each dosage of additive. Our results show that the superplasticizer additive has strong influence in the final characteristics of the concrete, given its presence increases the workability time frame of the investigated formulations, both with Cauê and Holcim cements. The additive enabled low water dosages for cement hydration, resulting in better mechanical properties and plasticity. Comparing both cement brands, formulations with Holcim cement performed better. Analysis of variance confirmed the strong influence of the cement type – as well as the level of additive in the formulations – in the mechanical properties of the product. Cauê cement showed greater hydration time, what in the construction site becomes an advantage in terms of concrete application and

desification. On the other hand, the greater plasticity and mechanical resistance obtained with Holcim cement makes it more attractive in terms of construction time, as current construction markets demand constructions delivered faster.

Keywords: Cement, Water-reducing admixtures, deflocculation, Concrete Civil.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Propriedade dos compostos principais do cimento Portland.	22
Tabela 2: Principais tipos de Cimento Portland utilizados na construção civil.	23
Tabela 3: Classificação dos Aditivos em função da redução de água, do aumento da resistência à compressão e da dosagem típica.....	32
Tabela 4: Identificação das composições dos concretos.	46
Tabela 5: Dosagem por betonada.	47
Tabela 6: Classificação da consistência do concreto.	50
Tabela 7: Moldagem dos corpos de prova. (NBR 5738:2003)	51
Tabela 8: Caracterização física dos cimentos.....	53
Tabela 9 : Resistência à compressão do cimento Cauê.....	54
Tabela 10: Resistência à compressão do cimento Holcim.....	54
Tabela 11: Análise química dos cimentos obtidos por fluorescência de Raios X.	56
Tabela 12: Caracterização granulométrica do pó de brita.	57
Tabela 13: Caracterização granulométrica da brita 1.	58
Tabela 14: Resultado dos tempos de pega inicial e final, tempo em aberto da pasta de consistência normal em função do aditivo utilizado e tipo de cimento.	59
Tabela 15: Resultados da consistência (abatimento) do concreto.....	60
Tabela 16: Resultado dos ensaios de resistência à compressão do concreto.....	62
Tabela 17: Resultado médio da resistência à compressão e desvio padrão.	62

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Representação esquemática da floculação de partículas de cimento quando hidratadas e a dispersão com adição do aditivo surfactante redutor de água.	26
Figura 2: Surfactante com vários grupos aniônicos na cadeia de hidrocarbonetos adicionado ao sistema cimento-água	27
Figura 3: Estrutura molecular (monômero) do Lignossulfonato.....	29
Figura 4: Processo eletrostático de dispersão de partículas.	29
Figura 5: Estrutura molecular (mero) do Naftaleno Sulfonato.	30
Figura 6: Estrutura molecular (mero) do Policarboxilato.	31
Figura 7: Processo estérico de dispersão de partículas.....	31
Figura 8: Representação dos estágios de hidratação do cimento.	34
Figura 9: Hidratação dos Silicatos.....	35
Figura 10: Hidratação do C_3S em CSH.	36
Figura 11: Gel de CSH e CH após 15 horas da hidratação do cimento.	37
Figura 12: Sulfoaluminato de Cálcio na pasta de cimento hidratada.....	37
Figura 13: Grão de clínquer parcialmente hidratado.	38
Figura 14: Influência das condições de cura sobre a resistência mecânica.	40
Figura 15: Contribuição de resistência dos compostos hidratados individualizados.	41
Figura 16: Calor liberado na hidratação dos componentes.	42
Figura 17: Aparelhagem para ensaio de Vicat.	48
Figura 18: Classificação do módulo de finura para agregados miúdos.	49
Figura 19: Deformação do concreto após ensaio de tronco de cone.	50
Figura 20: Prensa utilizada no rompimento dos corpos de prova.....	52
Figura 21: Curva granulométrica do pó de brita.	57
Figura 22 : Curva granulométrica da brita 1.	58

LISTA DE SIGLAS

UNIFAL - Universidade Federal de Alfenas

PPG-CEM - Programa de Pós Graduação em Ciência e Engenharia de materiais.

CPII E-32 - Cimento Portland Classe 2 com escórias de alto forno e resistência de 32 MPa.

ABNT - Associação Brasileira Normas Técnicas

ABNT-NM - Associação Brasileira normas técnicas, norma MERCOSUL.

CSH- Gel de silicato hidratado de cálcio.

CA \bar{S} H - Agulhas de etringita

CH - Portlandita, hidróxido de cálcio.

CAS \bar{H} - Monossulfoaluminato de cálcio hidratado.

C₃S - Silicato tricálcio.

C₂S - Silicato dicálcio.

C₃A - Aluminato tricálcio.

C₄AF- Ferro aluminato tetracálcio.

a/c - relação água cimento.

Aditivo PC s.p.c – Consumo do aditivo Policarboxilato sobre peso do cimento.

LISTA DE ABREVIATURAS

cm - Centímetro.

°C - Grau célsius

g/cm³ - Grama por centímetro cúbico.

kg/m³ - Quilo por metro cúbico.

kg - Quilo.

kN - Quilo newton.

kgf - Quilograma força

L - Litro.

m²/kg - Metro quadrado por quilo

mm - Milímetro.

m²/g - Metro quadrado por grama.

nº - Número

MPa - Mega Pascal

µm - Micrômetro.

µ - Mícron

tf - Tonelada força.

sig.- Significativa

ñ sig. - Não é significativa

SUMÁRIO

1- INTRODUÇÃO	18
1.1- OBJETIVO	19
1.2 – JUSTIFICATIVA	20
2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1 - CONCRETO.....	20
2.1.1 - Tipos de concreto	21
2.2- COMPONENTES DO CONCRETO	22
2.2.1- O Cimento Portland	22
2.2.2 - Agregados	24
2.2.3 - Água	24
2.2.4 - Aditivos de origem mineral	25
2.2.5 - Aditivos Redutores de Água para Concretos	25
2.2.5.1 - Aditivo de base Lignossulfonato	28
2.2.5.2 - Aditivo de base Naftaleno ou Melamina Sulfonato	30
2.2.5.3 - Aditivo à base de Policarboxilato.....	30
2.2.5.4 - Dosagem dos Aditivos.....	32
2.3 - HIDRATAÇÃO E PERÍODO DE DORMÊNCIA DO CIMENTO	32
2.4 - MICROESTRUTURA DA PASTA DE CIMENTO HIDRATADA.....	34
2.4.1 - Sólidos na pasta de cimento hidratada.....	35
2.4.1.1 - Silicato de cálcio hidratado (CSH).....	36
2.4.1.2 - Hidróxido de cálcio	36
2.4.1.3 - Sulfoaluminato de cálcio.....	37
2.4.1.4 - Grãos de clínquer não hidratado	38
2.4.2 - Vazios na pasta de cimento hidratada.....	38
2.4.3 - Processo de cura do concreto	39
2.4.4 - Cálculo da resistência à compressão do concreto em laboratório	40
2.4.5 - Resistência dos concretos atuais	40
2.5 - REOLOGIA DO CONCRETO.....	43
2.6 - TRABALHABILIDADE DO CONCRETO	43
2.7- CONCRETO: PERSPECTIVAS FUTURAS	44
3- MATERIAIS E MÉTODOS	45
3.1- MATERIAIS UTILIZADOS.....	45

3.2 - METODOLOGIA	45
3.2.1 - Caracterização dos cimentos	47
3.2.2 - Determinação dos tempos de pega do cimento.....	47
3.2.3 - Caracterização dos agregados miúdos e graúdos.....	48
3.2.4 - Caracterização do concreto.....	49
3.2.5 - Preparação do concreto em laboratório.....	49
3.2.6 - Determinação do abatimento do concreto	49
3.2.7- Moldagem, Cura e Capeamento dos corpos de prova	50
3.2.8 - Determinação da resistência mecânica à compressão do concreto	51
3.2.9 - Análises de variância e correlação	52
4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO	52
4.1 - CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	52
4.1.1 - Caracterização dos cimentos Cauê e Holcim	52
4.1.2 - Caracterização dos Agregados: Miúdos e Graúdos	56
4.1.2.1 - Caracterização dos agregados miúdos	56
4.1.2.2- Caracterização dos agregados graúdos.....	58
4.2-DETERMINAÇÃO DO TEMPO DE PEGA (MÉTODO VICAT).....	59
4.3 - DETERMINAÇÃO DO ABATIMENTO DO CONCRETO (SLUMP TEST)	60
4.4 - DETERMINAÇÃO DO CÁLCULO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AOS 7, 14 E 28 DIAS.....	61
5 – CONCLUSÕES	63
6- REFERÊNCIAS	64
APÊNDICE A - Análise de variância dos cimentos	68
APÊNDICE B - Análise química e composto de Bogue	70
APÊNDICE C - Correlação entre os fatores: Água, Aditivo, Slump Cauê e Slump Holcim.	72
APÊNDICE D - Análise de variância dos concretos	73

1- INTRODUÇÃO

A tecnologia do concreto nos últimos tempos difundiu-se com o desenvolvimento dos aditivos, com maior importância aos aditivos redutores de água, os quais são empregados de maneira geral em todo concreto com aplicações tecnológicas.

Os aditivos redutores de água são responsáveis pela defloculação do sistema, permitindo também uma redução da quantidade de água para hidratar o concreto, o que geralmente promove um aumento considerável de resistência mecânica, sendo possível à obtenção de concretos com elevada resistência mecânica (acima de 50 MPa) (HARTMANN & HELENE, 2003).

Apesar da vantagem anteriormente citada, uma série de ocorrências em relação à incompatibilidade entre aditivos e os cimentos são relatadas (HARTMANN & HELENE, 2003); no que concerne os aditivos redutores de água, estes problemas também acontecem.

As possíveis incompatibilidades podem ocorrer entre:

- aditivo e cimento de marcas diferentes.
- aditivo e cimento de mesma marca, mas de lotes diferentes.
- cimento e aditivo de marcas diferentes.

Os fatores que justificam essa incompatibilidade são muitos: os cimentos, por exemplo, podem ser compostos por adições minerais variadas, tanto em composição como em quantidade (escória de alto-forno, pozolana, e fíller).

Para o mesmo tipo de cimento, a norma estabelece um intervalo grande que pode conter seus compostos principais:

- Silicato tricálcio: de 18 a 66%,
- Silicato dicálcio: de 11 a 53%,
- Aluminato tricálcio: de 5 a 20%
- Ferro aluminato tetracálcio: de 4 a 14 % (MEHTA & MONTEIRO, 2008).

Outro fator em relação aos compostos é que eles podem apresentar diferença entre si, causadas pelo local de extração ou pelo processo de fabricação (um composto de uma região pode não ser igual ao de outra região).

Ainda em relação ao cimento, um fator preponderante é sua granulometria; uma marca de cimento pode ter partículas mais finas de cimento em relação a outra marca. Para cimentos com granulometria mais fina, o processo de hidratação é mais

rápido; granulometria mais grosseira proporciona uma hidratação mais lenta, já que a reatividade do pó é menor.

Em relação aos aditivos, as empresas trabalham em sigilo e tentam proteger ao máximo seus produtos que levaram anos de pesquisa para serem desenvolvidos. Isso faz com que se tenha o mínimo de informações possíveis sobre estes produtos. Diante de tantos fatores físicos como químicos, o processo de interação do aditivo com a partícula do cimento segue de uma forma desconhecida, onde não se consegue ter uma uniformidade de resultados.

O que as empresas fabricantes de aditivos procuram fazer para diminuir essas incompatibilidades é adaptar seus produtos com as principais marcas de cimento que se encontram no mercado, e assim, terem um campo de atuação maior de seus produtos. Desta forma, é sempre recomendável e coerente, que ao se fazer uso de aditivos para concretos, em especial aditivos redutores de água, deve-se fazer testes em laboratório para avaliação do processo de interação entre a partícula do cimento e o aditivo (MELO *et al.*, 2009).

Neville (1970) fez severas críticas em relação à falta de embasamento científico que explicasse essa desuniformidade de resultados em relação aos aditivos redutores de água nas propriedades do concreto fresco (SANTOS, 2011).

[...] O problema surge desta maneira, um pouco mal definido, e isto é devido ao surgimento dos aditivos no cenário do concreto não como um agente químico cuidadosamente preparado que apresenta uma reação conhecida, mas como “medicamento” com uma composição secreta e supostamente com efeitos benéficos. Não é surpresa, entretanto, que muitos efeitos colaterais dos aditivos no concreto são desconhecidos. [...] (NEVILLE, 1970, p44).

1.1- Objetivo

Esta pesquisa teve como objetivo avaliar a compatibilidade (comportamento químico e reológico) do cimento Portland CP II-E 32 com aditivos redutores de água para concreto de base policarboxilato, conhecidos também como aditivos superplastificantes de terceira geração. Como consequência direta desta avaliação, fez-se uma análise das propriedades finais dos concretos de construção civil utilizando-se cimento Portland CP II-E 32 e aditivos redutores de água em sua

formulação. Em paralelo foi feita a análise de variância e os estudos das correlações para identificar quais fatores influenciam de forma direta a resistência mecânica e se existe uma relação linear entre eles.

1.2 – Justificativa

O projeto justificou-se pela busca de uma maior compreensão da fenomenologia associada à hidratação de concretos e propriedades decorrentes da evolução dessa hidratação. O superplastificante também foi estudado, tanto sob o ponto de vista da interação química deste com a matriz do concreto, como também da eficiência do mesmo no que tange a diminuição do teor de água adicionado à massa e posterior caracterização do produto.

O projeto buscou ainda compreender como interagem as variáveis: teor de superplastificante, teor de água, tempo de pega, resistência mecânica a compressão através da utilização de ferramentas estatísticas.

2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 - Concreto

O concreto pode ser definido como um material compósito, composto por agregados particulados ou fragmentados (reforço) que se encontra em um meio aglomerante contínuo, denominada matriz, cuja característica é de estar presente em maior quantidade (GAVA *et al.*, 2001).

O meio aglomerante é composto por cimento hidráulico e água; os agregados são constituídos por diversas granulometrias que podem ser: areia natural, brita, pedregulho, pedriscos entre outros, onde são classificados como grãos e miúdos (GAVA *et al.*, 2001).

O agregado grão refere-se a partículas maiores que 4,75mm (malha n^o4 Mesh), e agregados miúdos referem-se às partículas de agregados menores que 4,75 mm (malha n^o200 Mesh) (MEHTA & MONTEIRO, 2008).

As combinações corretas das quantidades de aglomerante e agregados que formam o concreto definem suas propriedades, tanto no estado fresco, como no estado endurecido. No estado fresco, o material tem que atingir a trabalhabilidade e coesão, ou seja; condições para que o concreto seja bombeado e moldado nas formas. No estado endurecido, a principal propriedade é a resistência mecânica necessária para suportar as cargas solicitadas em serviço (REIS, 2008).

De acordo com Brunauer e Copeland (1964) apud (MEHTA & MONTEIRO, 2008), o concreto é o material de construção mais utilizado; estima-se que o consumo atual de concreto no mundo seja da ordem de 11 bilhões de toneladas métricas ao ano; em alguns países, seu consumo, quando comparados com o aço, chega a ser de dez para um

Um produto com um consumo tão elevado mundialmente, justifica por si só, o elevado número de pesquisas voltadas para o desenvolvimento de novas tecnologias, com o intuito de aperfeiçoar suas propriedades e ampliar, por conseguinte, sua área de aplicação.

2.1.1 - Tipos de concreto

Os concretos são classificados em relação à sua massa específica ou resistência à compressão.

Em relação à massa específica, tem-se o concreto de densidade normal (areia natural, pedregulho ou agregados britados com massa específica na ordem de 2.400 kg/m³; este concreto é o mais utilizado para fins estruturais), concreto leve (massa específica menor que 1.800 kg/m³, utilizado, por exemplo, na regularização de contra piso), concreto pesado (concreto produzido com agregados de alta densidade e geralmente possui massa específica maior que 3.200 kg/m³, sendo utilizado por exemplo, em barragens, blocos de fundação de grandes dimensões, entre outros) (MEHTA & MONTEIRO, 2008).

Em relação à resistência a compressão, tem-se o concreto de baixa resistência (menor que 20 MPa), concreto de resistência moderada (entre 20 e 40 MPa) e concreto de alta resistência (maior que 40 MPa) (MEHTA & MONTEIRO, 2008).

Pode-se ter ainda outros tipos de concreto, quando alterada a dosagem dos seus componentes principais. Nesse sentido, é possível a obtenção de concretos com características específicas, tais como: concreto auto escoante (auto adensável), concreto de alto desempenho, concreto de alta resistência inicial, concreto resfriado com gelo, concreto com adições de fibra, concreto impermeável e concreto colorido (MEHTA & MONTEIRO, 2008).

2.1.2 - Durabilidade das estruturas de concreto

Em se tratando da durabilidade das estruturas de concreto, há que se considerar dois fatores; o primeiro está relacionado com os materiais utilizados na

estrutura (concreto e aço). No caso do concreto, leva-se em consideração os elementos que o compõem (cimento, água, agregados, adições minerais e aditivos), bem como a dosagem destes elementos.

O segundo fator, leva em consideração o meio em que esta estrutura está inserida. São vários os fatores referentes ao meio ambiente que podem causar desgastes em estruturas de concreto, o clima (quente ou frio), variações de temperaturas, ambientes ácidos (causados pelas indústrias) e poluentes como dióxido de carbono presente na atmosfera, que é um dos principais fatores do processo de carbonatação do concreto, causando corrosão nas armaduras. No entanto, faz-se necessário um levantamento criterioso dos agentes de degradação, bem como as condições do concreto em serviço, para que se tenha uma estrutura bem dimensionada capaz de suportar as solicitações de degradação (ISAIA, 2011).

2.2- Componentes do concreto

2.2.1- O Cimento Portland

O cimento Portland é um cimento hidráulico, pois sua resistência se desenvolve por meio de reações químicas durante o processo de hidratação; é um produto formado por clínquer moído e, adicionado a ele, um teor mínimo de gipsita (sulfato de cálcio) para controlar o tempo de pega, ou seja, o tempo de início das reações do aglomerante com a água (TAVARES, 2010). A tabela 1 indica as principais propriedades dos compostos do cimento Portland (MELLO, 2009).

Tabela 1: Propriedade dos compostos principais do cimento Portland.

Compostos	Formula Química	Símbolo	% no Clínquer	Propriedades
ALITA Silicato Tricálcio	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_3S	50 a 65	Endurecimento rápido Alto calor de hidratação Alta resistência inicial
BELITA Silicato Dicálcio	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_2S	15 a 25	Endurecimento lento Baixo calor hidratação Baixa resistência inicial
CELITA Aluminato Tricálcio	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A	6 a 10	Acelera pega - Alto calor de hidratação Sensível a ataques de sulfatos Aumenta a retração e reduz resistência
FERRITA Ferro Aluminato Tetracálcio	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF	3 a 8	Endurecimento lento Não contribui p/ resistência mecânica Resistência a sulfatos
CAL LIVRE	CaO	C	0,5 a 1,5	Em elevadas quantidades provocam expansibilidade e fissuração

(MELLO, 2009)

O clínquer é produzido através do aquecimento a altas temperaturas (1450°C) de uma mistura de calcário e argila, que correspondem a silicato, aluminatos e outros compostos de menor importância (SILVA, 2000).

O cálculo destes principais constituintes do cimento pode ser determinado aplicando-se a “**composição potencial**” ou “**composição de Bogue**” a partir das quantidades dos óxidos determinados por análise química. No entanto, a análise química deve ser feita no clínquer para determinação do óxido de cálcio combinado (NEVILLE & BROOKS, 2013):

O cálculo da “**composição potencial**” ou “**composição de Bogue**” é feito através das equações (NEVILLE & BROOKS, 2013):

$$C_3S = 4,07 (CaO) - 7,6 (SiO_2) - 6,72 (Al_2O_3) - 1,43 (Fe_2O_3) - 2,85 (SO_3) \quad (1)$$

$$C_2S = 2,07 (SiO_2) - 0,75 (3 CaO \cdot SiO_2) \quad (2)$$

$$C_3A = 2,65 (Al_2O_3) - 1,69 (Fe_2O_3) \quad (3)$$

$$C_4AF = 3,04 (Fe_2O_3) \quad (4)$$

No Brasil, há vários tipos de cimento utilizados na construção civil, essa variedade está relacionada com os compostos que são utilizados no seu processo de fabricação. Os cimentos utilizados no Brasil são normatizados pela ABNT e são apresentados na Tabela 2 (BEZERRA, 2006).

Tabela 2: Principais tipos de Cimento Portland utilizados na construção civil.

Tipo de Cimento	Resistência (MPa)	Clínquer + Gesso	Composição (%)			Norma Brasileira
			Escórias de Alto-Forno	Pozolana	Fíller	
CP I	25-32-40	100	0			NBR 5732
CP I-S		95-99	1-5 %			
CP II-E	25-32-40	56-94	6-34 %	0	0-10 %	NBR 11578
CP II-Z	25-32-40	76-94	0	6-14 %	0-10 %	
CP II-F	25-32-40	90-94	0	0	6-10 %	
CP III	25-32-41	25-65	35-70 %	0	0-5 %	NBR 5735
CP IV	25-32-42	45-85	0	15-50 %	0-5 %	NBR 5736
CP V ARI		95-100	0	0	0-5 %	NBR 5733

(BEZERRA, 2006)

Em termos de propriedades físicas e composição mineralógica, a diferença entre os diversos tipos de cimento Portland está relacionada com o tamanho de

grãos (já abordado anteriormente) e as quantidades dos quatro compostos principais (TAVARES, 2010).

Ao observar a tabela anterior, verifica-se que para o mesmo tipo de cimento, a composição pode não ser a mesma, pois a norma estabelece um intervalo mínimo e máximo muito grande dos componentes que formam o cimento (BEZERRA, 2006).

2.2.2 - Agregados

Os agregados são materiais inertes (não reagem com a água e nem com os produtos de hidratação), ocupando cerca de 60 a 80% do volume do concreto. Desempenham um papel importante no custo do concreto, uma vez que quanto maior o volume de agregados em relação ao de cimento, mais barato será este concreto.

A resistência mecânica e a trabalhabilidade do concreto também estão diretamente relacionadas com os agregados. As características dos agregados tais como porosidade, distribuição granulométrica, absorção de água, forma e textura superficial, também são importantes, pois influenciam de uma maneira direta as propriedades do concreto (SILVA, 2000).

2.2.3 - Água

A água é um dos principais componentes utilizados para o preparo do concreto, sendo responsável por desencadear todo o processo de reações físico-química que ocorre na partícula do cimento anidro. Processos de hidratação, propriedades reológicas, retração, fluência e mecanismos de transportes são influenciados diretamente pela água utilizada no preparo do concreto (ISAIA, 2011).

Os produtos sólidos formados pela hidratação do cimento Portland (etringita, gel de CSH, hidróxido de cálcio, monossulfoaluminato de cálcio) ocupam o espaço inicialmente ocupado pela água; quando se reduz muito a quantidade de água, também se diminui o espaço para que estes produtos de hidratação sejam formados. Assim, uma relação água/cimento de 0,32 é o mínimo que se deve utilizar para que haja espaço suficiente para a formação dos produtos de hidratação (MEHTA & MONTEIRO, 2008).

A partir desse ponto, toda a água adicionada ao sistema estará em excesso, causando algum tipo de prejuízo em sua propriedade, seja no estado fresco, como exudação, retração superficial, perda de coesão, perda da trabalhabilidade e/ou no

estado endurecido, onde o excesso de água aumenta a porosidade, diminuindo consideravelmente sua resistência mecânica. Um concreto poroso permite que a estrutura tenha um tempo de vida útil menor, pois está mais suscetível a ataques químicos, penetração de água, causando diversos tipos de patologias na estrutura (FILHO, 2008).

2.2.4 - Aditivos de origem mineral

Os aditivos de origem mineral são classificados de acordo com suas propriedades, podendo ser de dois tipos: adições minerais com efeito *filler* e adições minerais com efeito pozolânico ou cimentante.

O efeito *filler* envolve uma adição mineral com granulometria muito fina, mais fina que a do cimento, causando um preenchimento da curva granulométrica na faixa inferior a granulometria do cimento, que em média, apresenta valores na faixa de 75 µm (peneira malha N. 325 Mesh) e 45 µm (peneira malha N.200 Mesh) (SICHERI & ALMEIDA, 2006). Este efeito está diretamente relacionado com o empacotamento de partículas, não possuindo interação com os produtos de hidratação. Exemplos típicos; o calcário, o pó de quartzo, entre outros (SANTOS, 2011).

O efeito pozolânico ou cimentante envolve as adições minerais que reagem com os produtos de hidratação, alguns como hidróxido de cálcio que mantém propriedades cimentícias, independentes do cimento. Inserem-se neste contexto a argila calcinada, cinza volante, metacaulin, escórias de alto forno, sílica ativa.

As propriedades do concreto com as adições minerais são: aumento de resistência, melhora da trabalhabilidade, diminuição de porosidade e do calor de hidratação (SANTOS, 2011).

2.2.5 - Aditivos Redutores de Água para Concretos

Os aditivos redutores de água são largamente empregados no preparo do concreto, sendo que a principal função do aditivo é aprimorar as propriedades do concreto no estado fresco ou endurecido.

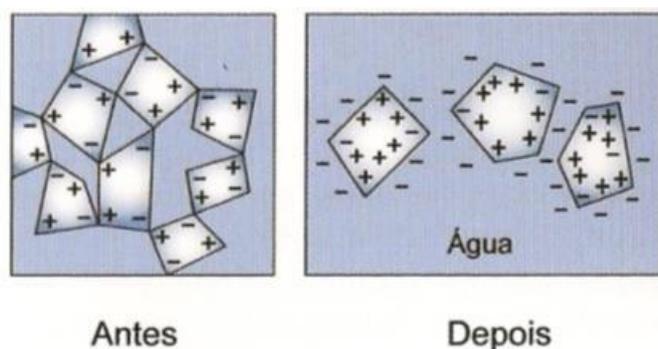
Os aditivos atuam diretamente nas partículas de cimento, pois quando este entra em contato com a água, líquido polar, existe uma tendência muito forte à floculação. Estes flocos aprisionam água no seu interior, que por sua vez compromete muito a trabalhabilidade do concreto no estado fresco. O que

geralmente ocorre na tentativa de contornar o problema é a adição de mais água na mistura, uma vez que esta água aprisionada não será liberada mesmo no processo de homogeneização dos componentes (HARTMANN & HELENE, 2003).

Esta água só será liberada após cerca de quatro horas do início da hidratação, depois que a estrutura já foi concretada. O efeito que esta água causa quando liberada são diversos: ela pode se estabelecer embaixo de um agregado com dimensões maiores, causando ali uma porosidade localizada. Caso ela caminhe até a superfície, vai causar um vazio por toda a extensão do percurso onde, na superfície, esse excesso de água, ao secar, causa uma retração superficial, podendo levar à fratura. Todos estes efeitos causam um aumento de porosidade na microestrutura do concreto, diminuindo sua resistência à compressão.

Para evitar os problemas anteriormente mencionados, é necessária a adição de aditivos que promovam a defloculação do sistema (cimento em hidratação). Como consequência, melhora-se a trabalhabilidade do concreto no estado fresco. Quando se tem um sistema defloculado, essa água, anteriormente aprisionada, agora será liberada para o sistema, fazendo com que se reduza a quantidade de água utilizada no preparo do concreto (Figura 1).

Figura 1: Representação esquemática da flocculação de partículas de cimento quando hidratadas e a dispersão com adição do aditivo surfactante redutor de água.



(MEHTA & MONTEIRO, 2008)

O processo de hidratação das partículas de cimento também acontece de uma maneira mais completa, uma vez que agora se tem as partículas dispersas no sistema e não flocculadas. Os dois processos de defloculação mais importantes são: a defloculação eletrostática e defloculação estérica (MELO *et al.*, 2009).

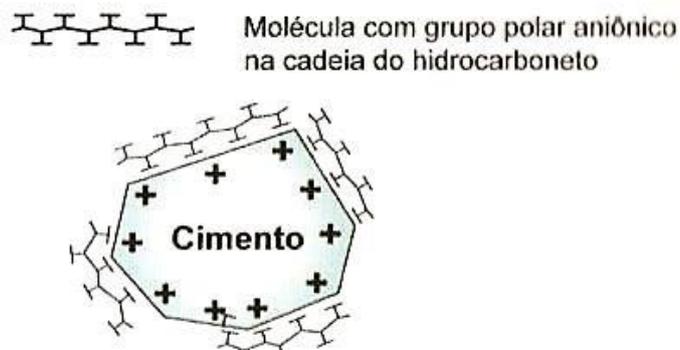
Dentre os aditivos normatizados, têm-se os aditivos plastificantes de primeira geração e superplastificantes de segunda e terceira gerações (ABNT 11768).

A norma referente aos aditivos para concreto no Brasil, ABNT NBR 11768, regulamenta uma série de aditivos, entre eles: os que aceleram ou retardam a pega do concreto, os redutores de água (plastificantes e superplastificantes), os incorporadores de ar, aceleradores de resistência e também se tem uma gama de aditivos que não foram normatizados, mas são usados com muita frequência, entre eles os redutores de retração, expansor (compensar retração), promotor de viscosidade, hidrofugantes, promotor de adesão e os pigmentantes.

Os principais aditivos redutores de água são os de base lignossulfonato, naftaleno sulfonato, melamina sulfonato e policarboxilato. O concreto teve um avanço tecnológico muito grande com o desenvolvimento dos aditivos superplastificantes, sendo desenvolvido concretos mais duráveis, de alta resistência e concretos mais fluídos (HARTMANN & HELENE, 2003).

A ação física dos aditivos redutores de água tensoativos, também conhecidos como surfactantes (Figura 2), promove a dispersão do sistema por repulsão eletrostática. São moléculas orgânicas com cadeias longas, com uma extremidade hidrofílica e outra hidrofóbica. A extremidade hidrofílica pode conter um ou mais grupos polares aniônicos ou catiônicos tais como -COO^- , -SO_3^- ou -NH_3^+ (MEHTA & MONTEIRO, 2008).

Figura 2: Surfactante com vários grupos aniônicos na cadeia de hidrocarbonetos adicionados ao sistema cimento-água.



(MEHTA & MONTEIRO, 2008)

A maioria dos aditivos redutores de água é aniônico, composto por moléculas que possuem extremidades altamente carregadas que neutralizam uma carga elétrica oposta na superfície da partícula de cimento, ajudando a diminuir a tensão superficial da água. A ação química deste processo consiste em três fases: adsorção superficial, carga eletrostática sobre a partícula de cimento e dispersão.

Outro modo de ação dos aditivos redutores de água consiste na adsorção superficial do polímero na superfície da partícula do cimento, formando uma barreira física ocasionada por longas cadeias moleculares (AÏTCIN, 2000).

Alguns fatores são de fundamental importância para que o aditivo promova a dispersão das partículas de maneira eficiente: a compatibilidade química e física entre o cimento e aditivo, a adsorção do aditivo na superfície da partícula do cimento e a dosagem do aditivo, pois o aditivo em excesso pode causar segregação do concreto, fluidez excessiva, ou retardo excessivo no tempo de pega (REPETTE, 2009).

O modo de ação dos aditivos redutores de água (plastificantes e superplastificantes) é muito complexo e razoavelmente conhecido, ficando assim difícil avaliar o potencial teórico do aditivo com um determinado cimento. No entanto, a melhor maneira de se avaliar esta compatibilidade é estudar as características reológicas do aditivo com o cimento em uma pasta de cimento ou em um concreto (AÏTCIN, 2000).

As principais famílias de redutores de água são:

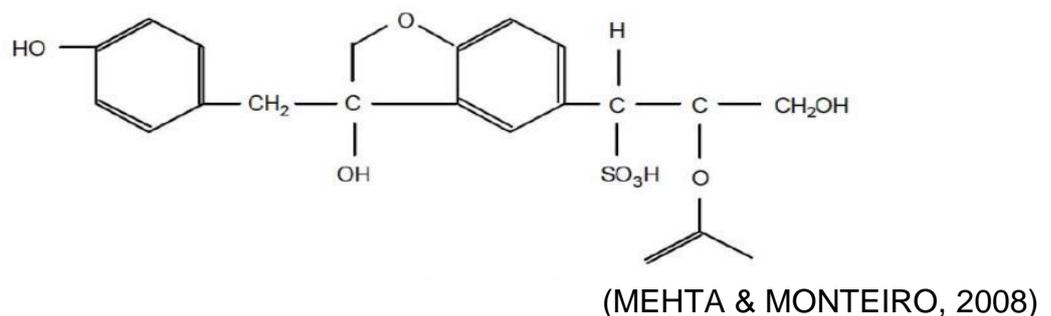
- Sais de ácido hidrocarboxílicos com teores muito baixos de açúcares e de surfactantes, mais conhecidos como lignossulfonatos.
- Sais sulfonados de policondensados de naftaleno e formaldeído, ou usualmente naftaleno sulfonato.
- Sais sulfonados de policondensados de melamina e formaldeído, usualmente denominado melamina sulfonato.
- Poliacrilatos ou policarboxilato-poliésteres (AÏTCIN, 2000).

2.2.5.1 - Aditivo de base Lignossulfonato

Os lignossulfonatos (Figura 3) são aditivos plastificantes de primeira geração comercializados no início da década de 1960. São polímeros que provem do rejeito líquido do processo de extração da celulose da madeira, lignina ou licor negro e que contém uma mistura de compostos químicos polares da lignina (20 a 30 %). Os

lignossulfonatos permitem uma redução em até 5% do volume de água utilizada no preparo do concreto; todavia, eles apresentam efeitos secundários que podem levar ao retardo do tempo de pega, causado pela quantidade de açúcares presentes, com provável incorporação de ar (produtos tensoativos). Eles também não permitem dosagens elevadas, podendo ocorrer segregação também em pequenas dosagens (MELO *et al.*, 2009).

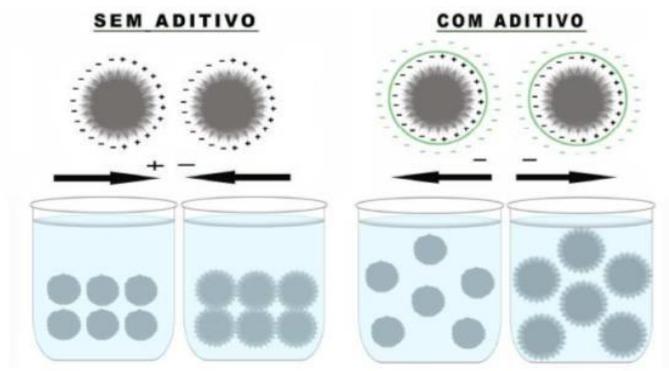
Figura 3: Estrutura molecular (monômero) do Lignossulfonato.



Os lignossulfonatos possuem grupos polares aniônicos. Quando estes grupos entram em contato com o sistema cimento-água, a cadeia polar do lignossulfonato é adsorvida na superfície da partícula do cimento, como consequência, formam-se ao redor da partícula do cimento um conjunto de cargas negativas (MEHTA & MONTEIRO, 2008).

Essa carga negativa causa um efeito repulsivo entre as partículas (Figura 4), fazendo com que elas se afastem, ocorrendo assim a defloculação do sistema por meio eletrostático (FRACALLOSSI, 2011).

Figura 4: Processo eletrostático de dispersão de partículas.



(FRACALLOSSI, 2011)

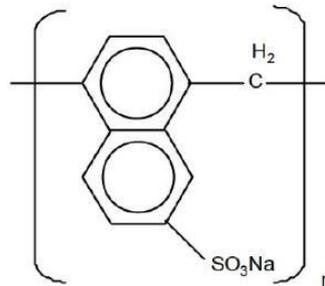
Além do efeito eletrostático, os lignossulfonatos podem também diminuir a tensão superficial da água promovendo um efeito de lubrificação das partículas de cimento (ISAIA, 2011).

2.2.5.2 - Aditivo de base Naftaleno ou Melamina Sulfonato

Os naftalenos sulfonatos e as melamina sulfonatos são aditivos superplastificantes de segunda geração. Desenvolvidos na década de 1970, são polímeros sintéticos que permitem uma redução em até 12% de água no preparo do concreto, sem apresentar retardo na pega, pois não contém açúcares (MELO *et al.*, 2009).

Esses aditivos permitem dosagens mais elevadas quando comparados com os lignossulfonatos; porém, seu tempo de ação ou de fluidificar é muito restrito, em torno de 15 a 30 minutos. Assim, os naftalenos e melaminas sulfonatos (Figura 5) são incorporados ao concreto imediatamente antes do seu lançamento (AÏTCIN, 2000).

Figura 5: Estrutura molecular (mero) do Naftaleno Sulfonato.



(ISAIA, 2011)

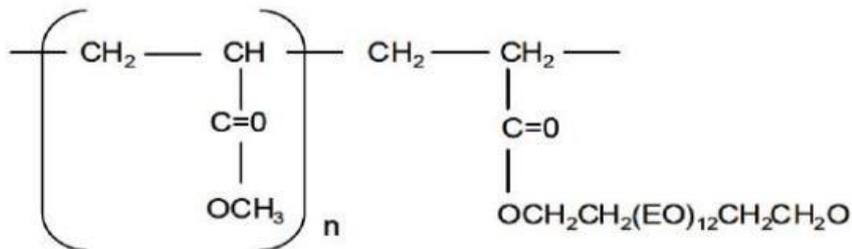
A defloculação do sistema quando se usa esse tipo de aditivo é de origem eletrostática, com pouca influência de repulsão estérica.

2.2.5.3 - Aditivo à base de Policarboxilato

Os policarboxilatos (Figura 6) são aditivos superplastificantes de terceira geração desenvolvidos na década de 1990. São polímeros sintéticos, porém com algumas diferenças. Possuem moléculas curtas com cadeias (laterais) longas; sua estrutura molecular permite muitos arranjos; sua massa molecular é maior quando

comparada com os aditivos de base lignossulfonato, naftaleno e melamina sulfonatos.

Figura 6: Estrutura molecular (mero) do Policarboxilato.



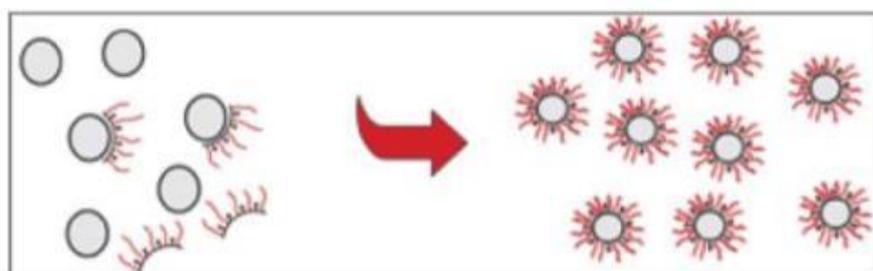
(ISAIA, 2011).

Os policarboxilatos tem capacidade de manter a trabalhabilidade da mistura até que suas longas cadeias poliméricas sejam aprisionadas e cobertas pelos produtos de hidratação do cimento. O tempo de ação estabelece um intervalo entre 45 e 90 minutos, com isso tem-se um tempo maior para o transporte e aplicação do concreto (MELO *et al.*, 2009) (ISAIA, 2011).

Os aditivos à base de policarboxilato são adsorvidos na superfície da partícula do cimento e promovem a defloculação do sistema através de dois mecanismos: o efeito estérico causado pelas longas cadeias (cadeia secundária) do polímero, que promove uma barreira física entre as partículas de cimento, e também pelo efeito eletrostático, com menor contribuição (Figura 7). Esse processo envolvendo os dois mecanismos de defloculação é mais eficiente, e é chamado de efeito eletroestérico (MELO *et al.*, 2009).

O efeito estérico está relacionado com o afastamento das partículas de cimento até o ponto em que não se tem o raio de ação das forças de Van der Waals (MEHTA & MONTEIRO, 2008).

Figura 7: Processo estérico de dispersão de partículas.



(MEHTA & MONTEIRO, 2008).

Yamada *et al* (2000) *apud* (ISAIAS, 2011) relataram os efeitos da estrutura química dos aditivos policarboxilatos na fluidez das pastas de cimento, e afirmaram que:

- Para a mesma dosagem de aditivo, o maior tamanho da cadeia do polímero pode estar relacionado à maior fluidez e ao menor tempo de pega da mistura.
- Quanto maior a quantidade de grupos sulfônicos e carboxílicos presentes na cadeia do polímero, maior será a fluidez da pasta para uma mesma dosagem de superplastificante (ISAIA, 2011).

2.2.5.4 - Dosagem dos Aditivos

A dosagem dos aditivos plastificantes estabelece uma relação que varia de 0,2% a 0,5% entre a quantidade de aditivos e a massa do material cimentício; para os aditivos superplastificantes (Tabela 3) o intervalo está entre 0,6% e 2%.

Tabela 3: Classificação dos Aditivos em função da redução de água, do aumento da resistência à compressão e da dosagem típica.

Tipo de Aditivo	Redução de água	Dosagem típica	Aumento da resistência
Plastificantes	5 -10 %	0,2 a 0,5 %	+/- de 10 %
Superplastificantes	15 - 40 %	0,6 a 2,0 %	+/- de 25 %

(ISAIA, 2011).

2.3 - Hidratação e período de dormência do cimento

O processo de hidratação do cimento inicia-se quando o cimento entra em contato com a água, desencadeando uma série de reações químicas, tais como variação de calor, variação de energia e cinética das reações.

O processo de hidratação pode ser dividido em 5 etapas, conforme apresentado na Figura 8:

Etapa 1- Período pré-indução: Inicialmente ocorrerá uma dissolução dos compostos de cimento anidro que satura o meio líquido. Essa etapa é caracterizada pela rápida e alta liberação de calor e pode durar cerca de 15 minutos.

Etapa 2 – Período de indução: Nesta fase ocorre a formação de um gel de CSH (silicato hidratado de cálcio) envolta da partícula de cimento. Esse gel formado na superfície da partícula do cimento desacelera o processo de hidratação.

Esse período também é chamado de dormência do cimento, pois nesta fase conseguimos manter a trabalhabilidade do concreto, uma vez que as fases são formadas de maneira lenta. Esse período pode levar entre 15 minutos e 4 horas, e a liberação de calor é mínima e desprezível.

Etapa 3 – Período de aceleração: Nesta etapa, a camada de gel de CSH já foi quase toda consumida pelo processo lento de hidratação da fase anterior. Nesta terceira etapa, o meio líquido encontra-se saturado de espécies iônicas e atravessa a camada fina de CSH entrando em contato com a partícula de cimento.

O processo de hidratação continua de forma acelerada, ocorrendo liberação de calor, formação e desenvolvimento do gel de CSH em agulhas de etringita ($CA\bar{S}H$) (Aft) e também, cristais de hidróxido de cálcio CH (portlandita). Este período pode levar entre 4 e 8 horas.

Etapa 4 – Continuação da formação de gel de CSH e $CA\bar{S}H$ e CH de uma forma mais lenta, não ocorrendo liberação de calor significativa. Com o desenvolvimento das agulhas de etringita e os cristais de hidróxido de cálcio, o cimento vai endurecendo e o concreto vai perdendo sua trabalhabilidade. A fase etringita neste período, pode se desestabilizar e formar placas hexagonais de $CAS\bar{F}$ monossulfato hidratado (Afm), que é uma fase mais estável. Este período pode levar entre 8 e 24 horas.

Etapa 5 - Nesta fase, ocorre a continuação da formação de CSH e $CA\bar{S}H$ e CH de uma forma mais lenta que na etapa anterior, a liberação de calor é mínima e desprezível. Esta etapa se estende até o vigésimo oitavo dia. Nesta idade, a microestrutura é formada por: agulhas finas de etringita entrelaçadas que podem se desestabilizar e formar monossulfoaluminato de cálcio hidratado (fase mais estável), cristais de hidróxido de cálcio, podendo ter ainda algumas partículas de cimento parcialmente hidratadas devido sua granulometria (partículas maiores que 75 μm), com isso, tem-se também a formação do gel de CSH.

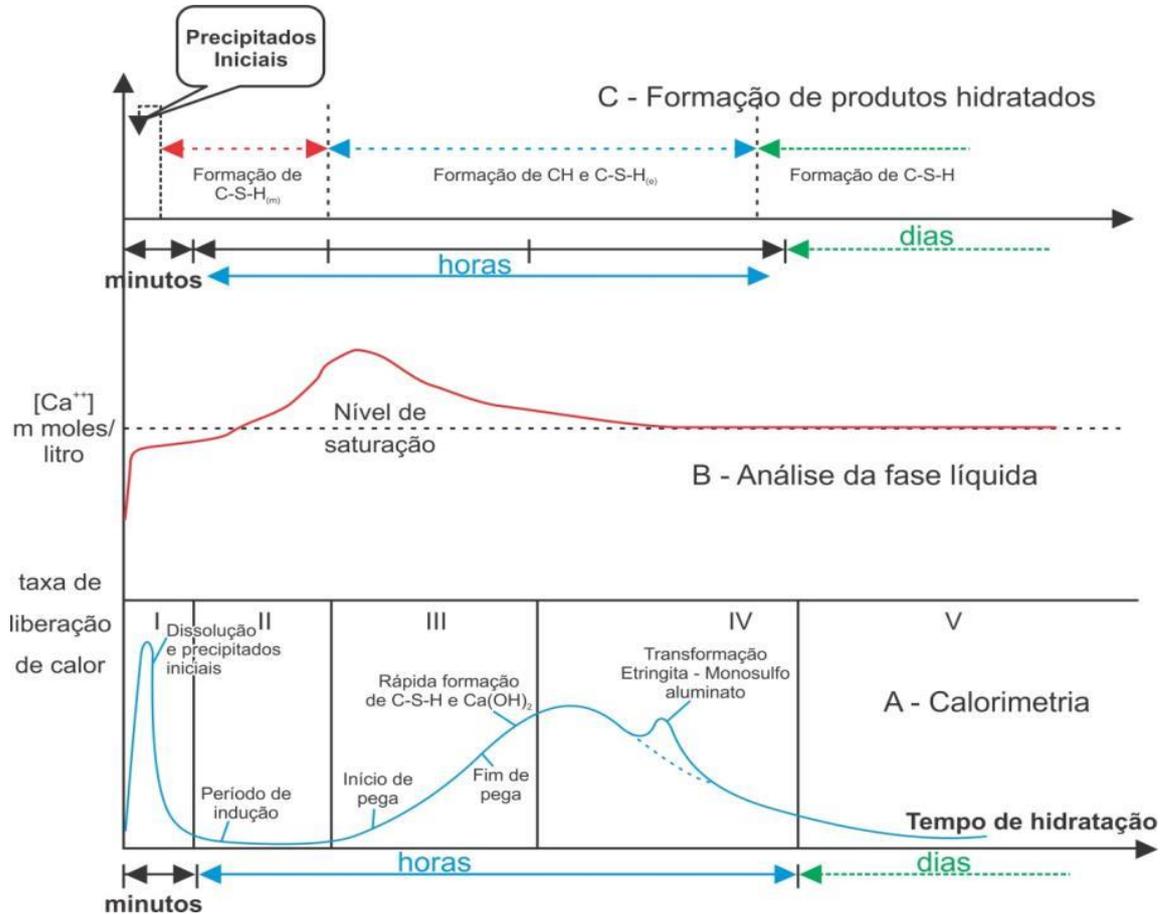
Esta fase teoricamente vai do segundo dia ao vigésimo oitavo dia; entretanto, alguns autores afirmam que a hidratação do cimento se estende ao longo dos doze meses, esta afirmação está relacionada a cimentos que apresentam granulometria mais grossa (GONÇALVES *et al.*, 2006).

A temperatura influencia de maneira direta todo o processo, podendo acelerar a pega quando a temperatura está muito alta ou retardar a pega em temperaturas

mais baixas (BEZERRA, 2006; TOMAZ, 2012; LIRA, 2010; LIRA *et al.*, 2012; CASTRO & PANDOLFELLI, 2009; COSTA *et al.*, 2009).

Figura 8 ilustra as etapas de hidratação do cimento já descritas.

Figura 8: Representação dos estágios de hidratação do cimento.



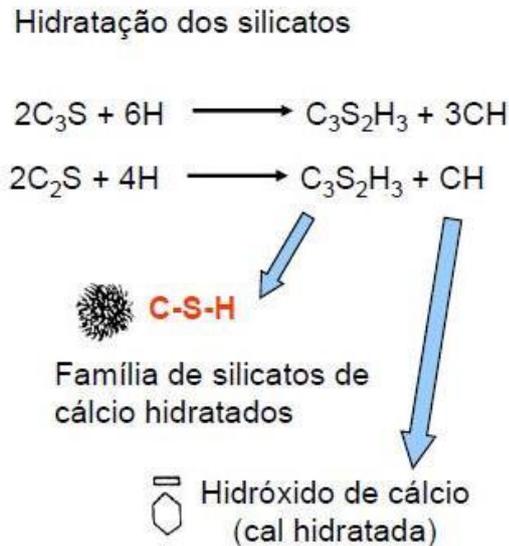
(SILVA, 2000).

2.4 - Microestrutura da pasta de cimento hidratada

As propriedades mais importantes do concreto como resistência à compressão, fluência, permeabilidade e durabilidade, são fortemente influenciadas pela formação, desenvolvimento e pelas propriedades da pasta de cimento hidratada, sendo sua microestrutura responsável por estas propriedades (SILVA, 2000).

A microestrutura da pasta de cimento hidratada (Figura 9) é formada pelos produtos sólidos, vazios e água. Os produtos sólidos correspondem aos produtos formados pela hidratação do cimento, como o gel de CSH, hidróxido de cálcio, etringita e monossulfoaluminato de cálcio. Os vazios são divididos em espaço lamelar entre os cristais de CSH, vazios capilares e volume de ar incorporado.

Figura 9: Hidratação dos Silicatos.



(ARAGÃO, 2012).

2.4.1 - Sólidos na pasta de cimento hidratada

Os silicatos C_2S e C_3S , depois de hidratados (Figura 9) contribuem em diferentes proporções para a formação de $C_3S_2H_3$ (CSH), que se apresenta como um gel rígido constituído de partículas (cristais fibrosos) muito pequenas, formando uma rede cristalina com superfície específica elevada (cerca de $200 \text{ m}^2/\text{g}$) e são fortemente ligados por forças de Van der Waals, sendo o principal responsável pela resistência mecânica da pasta de cimento (TUTIKIAN & CECCONELLO, 2012).

O hidróxido de cálcio (CH), também formado pela hidratação dos silicatos, possui formato de placas hexagonais e contribuem pouco na resistência mecânica da pasta.

A hidratação do aluminato tetracálcio (C_3A) é muito importante para as condições reológicas durante as primeiras horas de hidratação do cimento. Quando o C_3A reage com o gesso, ocorre a desaceleração do processo de hidratação, impedindo o que chamamos de falsa pega¹. Esse processo acelerado da hidratação contribui para a formação de bastões de gipsita na microestrutura, causando uma fragilidade mecânica excessiva da pasta de cimento hidratada (JUNIOR, 2006).

¹ Falsa Pega, caracterizada pela formação ou pela cristalização imediata de agulhas de gipsita (cristais de gesso), ocorre no início de hidratação e decorre de alguns fatores como: baixa reatividade do C_3A , ou uma relação imprópria entre C_3A e gesso, pois cimentos que apresentam pouca quantidade de C_3A e muita quantidade de gesso estão sujeitos a este fenômeno (TUTIKIAN & CECCONELLO, 2012).

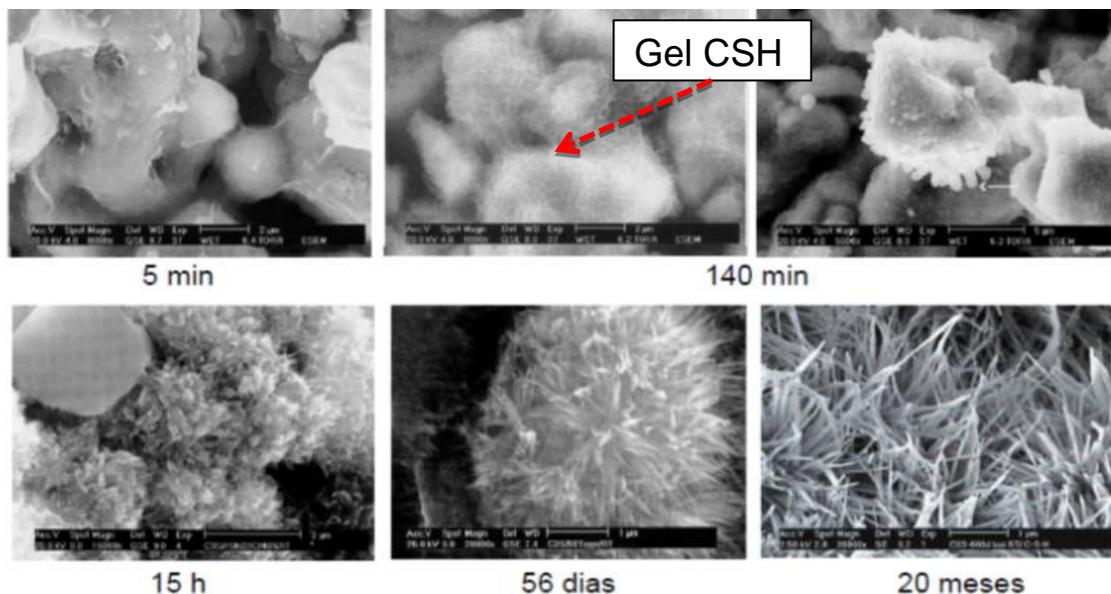
Compostos como aluminato e ferroaluminato de cálcio reagem com a água dando compostos hidratados que manifestam um endurecimento hidráulico com pouca contribuição de resistência mecânica (FUSCO, 2012).

2.4.1.1 - Silicato de cálcio hidratado (CSH)

A fase silicato de cálcio hidratado (CSH) corresponde a 55 % do volume de sólidos na pasta de cimento completamente hidratada. Esta fase é muito importante quando comparada com outras; entretanto, suas dimensões pequenas (coloidais) favorecem uma aglomeração, tornando o gel de CSH uma estrutura ainda pouco conhecida (Figura 10).

O modelo proposto por Powers-Brunauer apud (MEHTA & MONTEIRO, 2008) caracteriza o gel CSH como uma estrutura em camadas que apresenta uma grande área superficial da ordem de 100 a 700 m²/g, sendo sua ótima resistência atribuída às forças de Van der Waals.

Figura 10: Hidratação do C₃S em CSH.

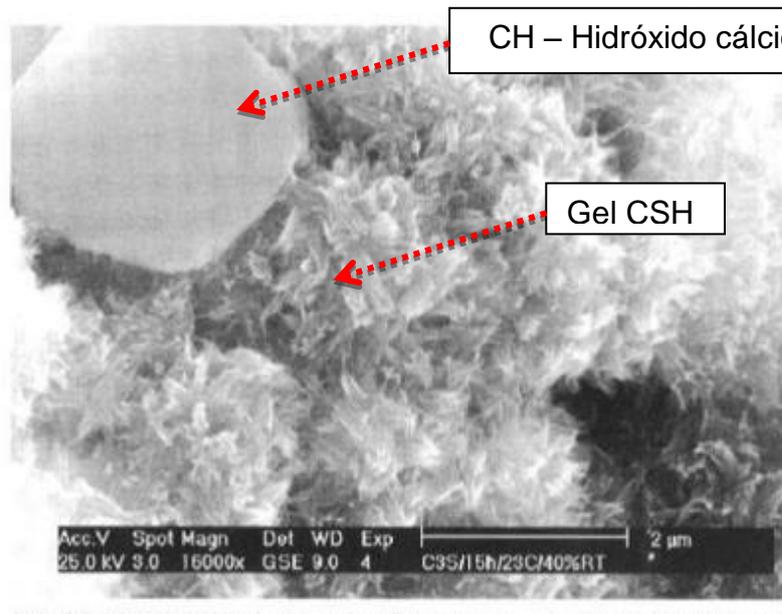


(THOMAZ, 2012).

2.4.1.2 - Hidróxido de cálcio

Também conhecido como Portlandita, os cristais de hidróxido de cálcio (CH) constituem cerca de 25% do volume de sólidos na pasta de cimento completamente hidratada (Figura 11). Quando comparado ao gel de CSH, sua contribuição à resistência é bem limitada devido a sua baixa área superficial (MEHTA & MONTEIRO, 2008).

Figura 11: Gel de CSH e CH após 15 horas da hidratação do cimento.

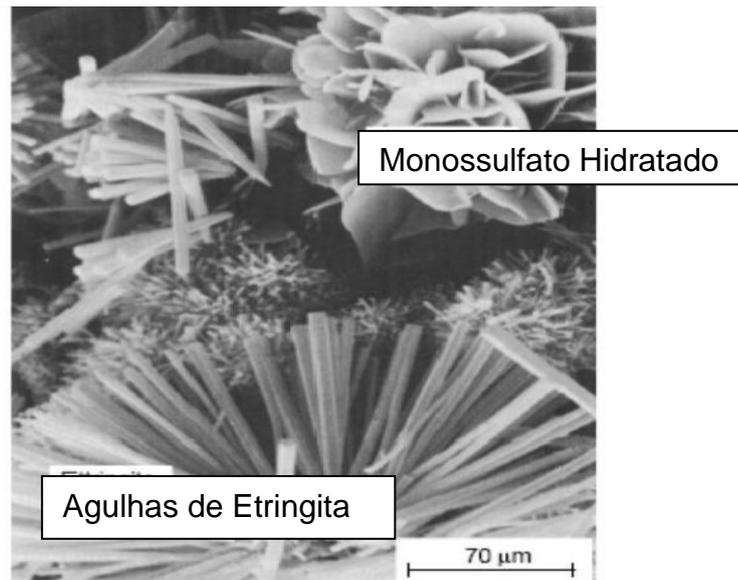


(THOMAZ, 2012).

2.4.1.3 - Sulfoaluminato de cálcio

O trissulfoaluminato de cálcio (etringita) e o monossulfoaluminato de cálcio correspondem a cerca de 15 % do volume de sólidos na pasta de cimento hidratada (Figura 12).

Figura 12: Sulfoaluminato de Cálcio na pasta de cimento hidratada.



(ARAGÃO, 2012).

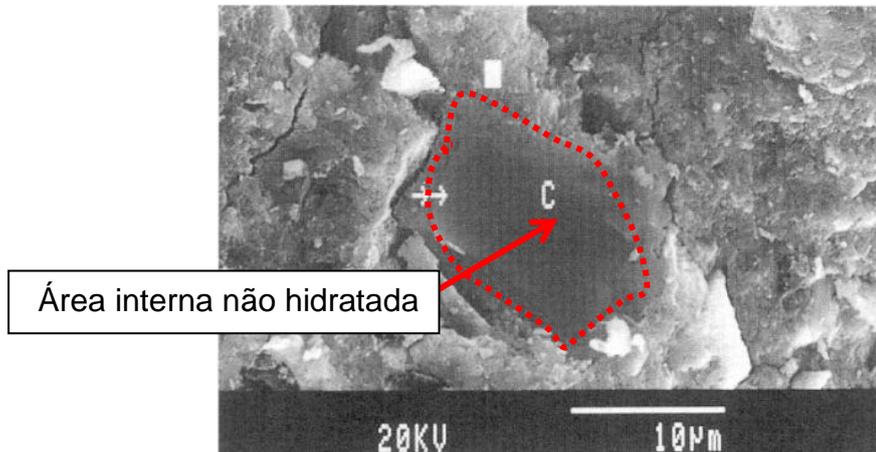
O trissulfoaluminato de cálcio, ao longo da hidratação pode se desestabilizar e formar o monossulfoaluminato de cálcio, que morfologicamente se apresenta como cristais de placas hexagonais. A presença de monossulfoaluminato de cálcio no concreto de cimento Portland torna-o vulnerável a ataques por sulfatos.

Observa-se também, que os sulfoaluminatos de cálcio contêm pequenas quantidades de ferro, que podem substituir os íons de alumínio na estrutura dos cristais (MEHTA & MONTEIRO, 2008) (ARAGÃO, 2012).

2.4.1.4 - Grãos de clínquer não hidratados

As partículas do clínquer que compõe o cimento anidro, apresentam tamanhos que varia de $1\mu\text{m}$ a $50\mu\text{m}$ (Figura 13). Com essa variação, grãos menores se hidratam mais rápido e grãos maiores tem uma hidratação mais lenta e dependendo do seu tamanho, em alguns casos a hidratação pode não ocorrer por completo (MEHTA & MONTEIRO, 2008) (THOMAZ, 2012).

Figura 13: Grão de clínquer parcialmente hidratado.



(THOMAZ, 2012).

2.4.2 - Vazios na pasta de cimento hidratada

A porosidade na pasta de cimento hidratada causa uma série de ocorrências como: diminuição da resistência mecânica, aumento da permeabilidade e o comprometimento da durabilidade ao longo do tempo. Estes vazios (poros) classificam-se em: espaço interlamelar no CSH, vazios capilares e ar incorporado. Essa classificação está relacionada com a posição onde o vazio se localiza.

Essas classificações são importantes, pois os poros causam diferentes efeitos negativos em função de sua localização. De forma geral, quando se estuda estes poros, leva-se em consideração duas situações: uma, é o volume total dos poros, e a outra, quando o material apresenta poucos poros, mas de forma concentrada. Um material com alta porosidade distribuída de forma homogênea, geralmente, é mais resistente que um material que apresenta baixa porosidade concentrada (MEHTA & MONTEIRO, 2008) (SILVA & LIBÓRIO, 1999).

2.4.3 - Processo de cura do concreto

Um processo de cura eficiente do concreto evita graves problemas como; não atingir a resistência de cálculo desejada ou obter um concreto menos durável (problemas relacionados à alta porosidade). A cura tem por finalidade proteger o concreto recém-moldado para não prejudicar a formação da sua microestrutura evitando prejuízo no desenvolvimento da resistência e durabilidade do concreto (MEHTA & MONTEIRO, 2008).

A falta de água nas primeiras idades do concreto fresco faz com que a zona de transição e a matriz cimentícia não desenvolvam produtos de hidratação com propriedades adequadas², podendo ocasionar uma secagem rápida da água causando retração autógena ou retração térmica. Essas retrações causam uma série de microfissuras por toda esta região (MEHTA & MONTEIRO, 2008).

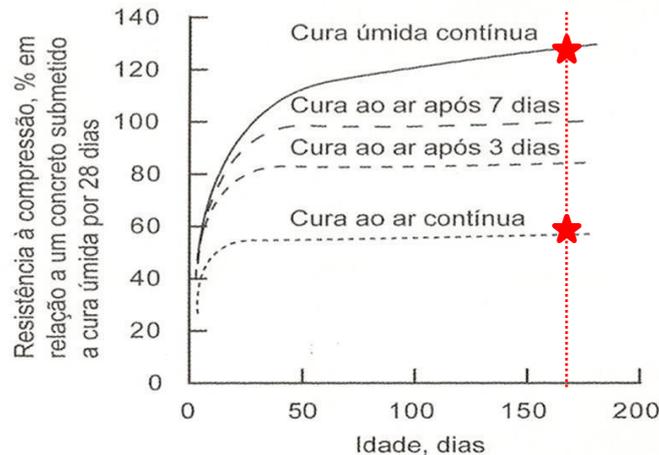
Depois de lançado e moldado, o concreto passa por um processo chamado de cura (úmida ou sob condições normais de temperatura). Essa prática permite abaixar o calor do concreto ocasionado pela reação exotérmica do cimento e também pelas condições do ambiente, como temperatura e umidade.

A cura úmida é mais eficiente, já que consiste em saturar com água toda a superfície do concreto evitando a perda da água da microestrutura do concreto para o meio ambiente. A cura, sob condições normais de temperatura, normalmente é utilizada em regiões mais frias e com umidade ambiente mais alta. Um fator relevante é a desforma antecipada, onde a perda de água da microestrutura acontece pela exposição do concreto ao meio ambiente nas primeiras idades (ISAIA, 2011).

²Iniciar cura com elevadas temperaturas ocasiona o crescimento rápido dos produtos de hidratação mais externos e resulta em uma construção rápida de uma microestrutura solta e fraca. (AÏTCIN,P.C, 2000, pag.408).

A Figura 14 indica a influência na resistência mecânica do concreto em relação ao processo de cura.

Figura 14: Influência das condições de cura sobre a resistência mecânica.



(MEHTA & MONTEIRO, 2008).

2.4.4 - Cálculo da resistência à compressão do concreto em laboratório

Para avaliar a resistência à compressão do concreto em laboratório, prepara-se o concreto; em seguida, o concreto é moldado em formas cilíndricas onde posteriormente é levado para o processo de cura.

Após curado, o corpo-de-prova é levado a uma máquina (prensa hidráulica) que irá aplicar uma força de compressão até que o corpo-de-prova se rompa.

A resistência à compressão deve ser calculada através da equação (5):

$$f_c = \left(\frac{4F}{\pi \cdot D^2} \right) \cdot 10 \quad (5)$$

Onde: f_c é a resistência à compressão (MPa).

F é a força máxima alcançada (KN).

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

2.4.5 - Resistência dos concretos atuais

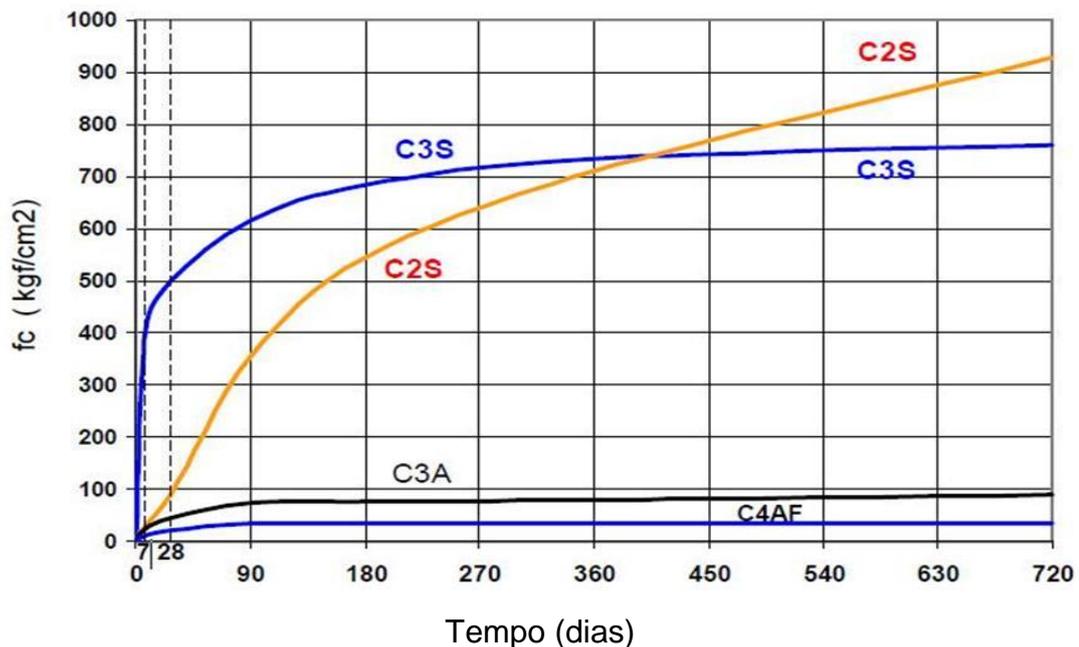
O processo de execução das obras atuais vem sofrendo muito com as imposições do mercado, ou seja, exigindo prazos cada vez menores nas etapas da construção. Neste cenário, alguns materiais como o cimento, vem sofrendo

alterações significativas em suas composições para se adequarem neste contexto. Nos dias atuais, os cimentos apresentam-se com partículas mais finas (rápida hidratação) e com uma quantidade maior de C_3S e menor de C_2S . Essa substituição dos silicatos aumenta significativamente a resistência do concreto com pouca idade³.

Essa mudança se tornou possível graças ao avanço no método de fabricação do cimento, motivada pelas “vantagens” desse ter um cimento mais “forte” e beneficiando-se de alguns fatores atribuídos à evolução do concreto, tais como: desforma mais rápida da estrutura, redução da quantidade de cimento para uma dada resistência, e de maneira geral, executando estruturas de concreto de forma mais eficiente (Figuras 15 e 16).

Infelizmente, todos os avanços visam a resistência do concreto em um período curto de tempo, o qual ocorre entre o 7º e o 28º dia; o ganho de resistência após o 28º dia é bem reduzido.

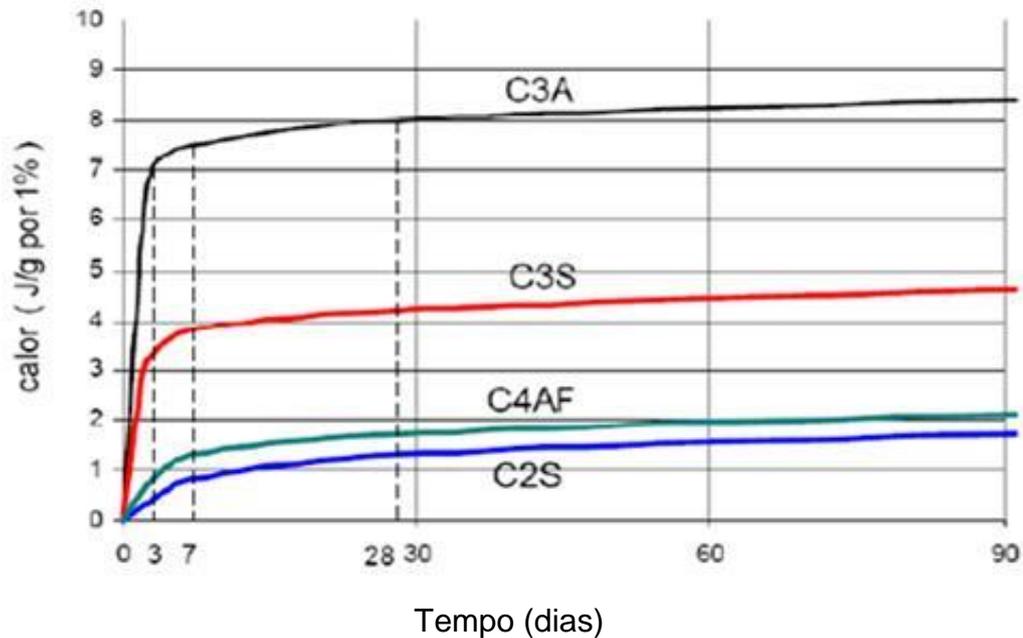
Figura 15: Contribuição de resistência dos compostos hidratados individualizados.



(THOMAZ, 2012).

³ Na hidratação o C_3S apresenta uma contribuição maior de resistência quando comparado com o C_2S .

Figura 16: Calor liberado na hidratação dos componentes.



(THOMAZ, 2012).

Nos concretos mais antigos, as formulações do cimento (C_3S e C_2S) proporcionavam a fabricação de concreto com aumento de resistência mais lento, mas que se estendia além do 28º dia; com isso, tinham-se estruturas mais duráveis, com uma segurança adicional, a melhoria da resistência aumentava ao longo do tempo, concreto se apresentava com menos fissuras, atribuído à baixa liberação de calor na hidratação do C_3S (THOMAZ, 2012).

[...] O concreto moderno é um concreto menos durável, não há um crescimento significativo da resistência do concreto após 28 dias, o que elimina a melhora da qualidade das estruturas de concreto a longo prazo.[...] Neville,1994

[...] É sabido que concreto feito com cimento Portland anteriores a 1930 desenvolviam a resistência muito lentamente, os grãos de cimento eram grossos e continham uma quantidade relativamente pequena de silicato tri-cálcico, C_3S , menos que 30 %. [...] Mehta & Burrows,1999

2.5 - Reologia do concreto

O modelo reológico do concreto segue o modelo de Bingham, ou seja, o concreto necessita de uma tensão mínima inicial para que ele possa fluir ou escoar. Estas propriedades reológicas do concreto no estado fresco são muito importantes, pois etapas de lançamento e escoamento do concreto na forma, estão diretamente ligadas à capacidade do concreto fluir a partir da aplicação de uma força apropriada (REIS, 2008) (CASTRO, 2007).

O concreto no estado fresco pode ser considerado um tipo de suspensão com concentração de sólidos maior que 5% do volume do material. Neste caso, o comportamento reológico do concreto passa a depender de fatores como a concentração volumétrica dos materiais sólidos, a característica do meio líquido, a temperatura e as características físicas das partículas. Assim, o comportamento reológico do concreto está diretamente relacionado com as características de cada suspensão e a magnitude da taxa de cisalhamento aplicada; de uma maneira geral, a reologia do concreto no estado fresco se resume em trabalhabilidade (CASTRO & PANDOLFELLI, 2009).

2.6 - Trabalhabilidade do concreto

A trabalhabilidade do concreto é definida pela ASTM C-125 como a propriedade que determina o esforço exigido para manipular⁴ uma quantidade de concreto fresco, sem que haja perda de homogeneidade, ou seja, o concreto tem que ser transportado, bombeado e moldado nas formas (MEHTA & MONTEIRO, 2008).

Os principais métodos utilizados para medir a trabalhabilidade do concreto no estado fresco são: ensaio de abatimento de tronco de cone, ensaio Vebe, ensaio de fator de compactação e ensaio Tattersall. Todavia, o ensaio ideal depende de dois fatores: característica do concreto (fluido ou denso) e o modo como ele será transportado e aplicado (lançado, injetado ou simplesmente moldado) (MEHTA & MONTEIRO, 2008).

Os dois métodos recomendados para dosagem do concreto convencional são: método do volume absoluto (traço é dado em volume) mais preciso e método do

⁴ Na manipulação do concreto fresco, admite-se as etapas de transporte, lançamento, adensamento e acabamento se fizer necessário.

peso (traço é dado em peso) menos preciso, mas que não requer informações sobre massa específica dos materiais usados na produção do concreto.

Os dois procedimentos envolvem uma sequência de passos dos quais alguns são comuns a ambos os procedimentos. Algumas informações são importantes para iniciar os cálculos e se obter um concreto com propriedade específica.

- granulometria dos agregados (gráudos e miúdos), módulo de finura.
- massa unitária do agregado gráudo no estado compactado seco.
- massa específica dos materiais.
- capacidade de absorção ou umidade livre no agregado.
- variação aproximada da água de amassamento, teor de ar e granulometria dos agregados disponíveis.
- relação entre a resistência e a relação água/cimento (a/c) para as combinações disponíveis de cimento e agregado.
- especificações da obra, se existentes, com relação máxima de água/cimento, teor de ar mínimo, abatimento mínimo, entre outras.

Em relação às etapas, tem-se: escolha do abatimento, escolha da dimensão máxima e característica do agregado, estimativa dos aditivos e adições, estimativa do consumo da água de amassamento e teor de ar, seleção da relação água/cimento, estimativa do consumo de cimento, estimativa do consumo de agregados, correção da umidade dos agregados e o ajuste entre os componentes para uma combinação ideal.

Todo o procedimento de cálculo é experimental; ou seja, vai se estabelecendo uma relação dos componentes e fazendo os ensaios convenientes até que se consiga um traço satisfatório (MEHTA & MONTEIRO, 2008).

2.7- Concreto: Perspectivas futuras

Um grande progresso se difundiu no desenvolvimento do concreto com a possibilidade de estudos de ordem micrométrica (μm) da estrutura do concreto.

Nos dias atuais, muito tem se falado em nanotecnologia; o setor de construção civil é um ambiente onde se tem muito a explorar. Acredita-se que a tecnologia do concreto vai ser impulsionada com grandes descobertas nesta área tão pouco conhecida, mas que vem sendo alvo de muitos pesquisadores.

Em fevereiro de 2013 foi publicado um artigo intitulado “Nanotecnologia Impulsiona o Futuro da Construção Civil” no qual é relatado o desenvolvimento de

cimento nanoestruturado com nanotubos de carbono. O cimento nanoestruturado não possui gesso no clínquer mas sim, nanotubos de carbono em substituição. O material se mostrou com grande potencial para aplicações em propriedades mecânicas; em especial, resistência à tração.

Existe uma grande expectativa por parte dos pesquisadores, que o nanotubo de carbono possa fazer o papel do aço e se tornar um reforço de tração em nível nanoscópico no concreto (LADEIRA & CALIXTO, 2013).

3- MATERIAIS E MÉTODOS

3.1- Materiais utilizados

Para fabricação dos concretos foram utilizadas as seguintes matérias primas:

- Cimento tipo CII E 32 (C) de dois fabricantes: Cauê (CC) e Holcim (CH).
- Pó de brita da região de Poços de Caldas, como agregado miúdo ou matriz (sem fornecedor específico).
- Brita 1 da região de Poços de Caldas como agregado graúdo (dimensões máximas de 19 mm, sem fornecedor específico).
- Aditivo superplastificantes de terceira geração de nome comercial Glenium 51 do fabricante Basf S.A., que são classificados em relação a base química como éter policarboxílico, com densidade variável de 1,067 a 1,107 g/cm³.

3.2 - Metodologia

Inicialmente os dois tipos de cimentos (Cauê e Holcim) foram caracterizados quanto à sua composição química, suas principais propriedades físicas e mecânicas, além do tempo de pega. O detalhamento, características e condições destes ensaios estão discriminados nos itens 3.2.1 e 3.2.2.

Foi realizado o estudo comparativo entre os ensaios em concreto no estado fresco e endurecido, utilizando-se dois tipos de cimento e diferentes dosagens de aditivo superplastificante, onde foi verificado o grau de compatibilidade química entre estes. Também foi investigada a influência da presença do aditivo superplastificante nas propriedades finais dos concretos (resistência mecânica, plasticidade e tempo de pega).

Foram estabelecidas oito formulações para estudo, sendo quatro delas envolvendo o cimento Cauê e as demais utilizando o cimento Holcim. As formulações foram determinadas a partir de dosagem padrão utilizada no setor civil. A Tabela 4 refere-se à nomenclatura adotada no presente trabalho para a identificação das composições dos concretos.

Tabela 4: Identificação das composições dos concretos.

C	Cimento Portland CP II E- 32
CC	Concreto com cimento fabricante - Cauê
CH	Concreto com cimento fabricante - Holcim
Pc	Aditivo Policarboxilato - Linha Glenium 51 Basf. S.A
CC-Pc 0,2%	Concreto com cimento Cauê e aditivo (0,2%) Policarboxilato Basf.
CC-Pc 0,4%	Concreto com cimento Cauê e aditivo (0,4%) Policarboxilato Basf.
CC-Pc 0,6%	Concreto com cimento Cauê e aditivo (0,6%) Policarboxilato Basf.
CH-Pc 0,2%	Concreto com cimento Holcim e aditivo (0,2%) Policarboxilato Basf.
CH-Pc 0,4%	Concreto com cimento Holcim e aditivo (0,4%) Policarboxilato Basf.
CH-Pc 0,6%	Concreto com cimento Holcim e aditivo (0,6%) Policarboxilato Basf.

(Fonte: Autor, 2014)

A Tabela 5 indica a quantidade de cada matéria prima utilizada, o tipo de cimento, o teor de aditivo e o teor de água utilizado na conformação dos concretos por betonada⁵. Para cada formulação foram preparados aproximadamente 40 litros de concreto por betonada, moldando-se 18 corpos de prova; ou seja, 6 corpos de prova para cada idade (7,14 e 28 dias), utilizando-se aproximadamente a quantidade de 28,26 litros, levando-se em consideração a marca do cimento (Cauê e Holcim) e a dosagem do aditivo (0,2%, 0,4% e 0,6%), conforme Tabela 4.

⁵ Betonada- produção unitária máxima ou mínima (por vez) de concreto que uma betoneira consegue homogeneizar. A cada betonada se produz uma masseira de concreto.

Tabela 5: Dosagem por betonada.

Dosagem por betonada (aproximado 40 litros)							Aditivo PC
Identificação	a/c	Cimento (kg)	Areia (kg)	Pedra (kg)	Água (L)	Diferença	s.p.c (g)
CC	0,386	23,080	23,447	39,466	8,920	0	0
CH	0,386	23,080	23,447	39,466	8,920	0	0
CC-Pc 0,2%	0,343	23,080	23,447	39,466	7,920	-0,13%	46
CC-Pc 0,4%	0,328	23,080	23,447	39,466	7,560	-0,18%	92
CC-Pc 0,6%	0,305	23,080	23,447	39,466	7,040	-0,27%	138
CH-Pc 0,2%	0,343	23,080	23,447	39,466	7,920	-0,13%	46
CH-Pc 0,4%	0,328	23,080	23,447	39,466	7,560	-0,18%	92
CH-Pc 0,6%	0,305	23,080	23,447	39,466	7,040	-0,27%	138

(Fonte: Autor, 2014)

3.2.1 - Caracterização dos cimentos

A caracterização física dos cimentos empregados na fabricação dos concretos foi realizada na ABCP, Associação Brasileira de Cimento Portland - São Paulo e a análise química semiquantitativa (fluorescência de Raios X) foi feita na indústria de Refratários TOGNI S/A - Poços de Caldas.

Com relação ao tempo de pega do cimento, além do ensaio realizado na ABCP (**cimento sem aditivo**), também foi feito no laboratório de Construção Civil da PUC – Poços de Caldas, o ensaio de pega do **cimento com aditivo** (0,2%,0,4% e 0,6%). Na ABCP também foi realizado o ensaio de resistência mecânica à compressão do cimento sem aditivo para cada fabricante, onde foram moldados 4 corpos de prova para cada idade (3,7 e 28 dias).

3.2.2 - Determinação dos tempos de pega do cimento

Para a determinação dos tempos de pega preparou-se a pasta de consistência normal, de acordo com a norma NBR NM 43.

A massa (500g) foi ensaiada em concordância à norma NBR NM 65, a qual estabelece o método de determinação do tempo de pega da pasta de cimento Portland utilizando o aparelho Vicat (Figura 17). O ensaio de determinação dos tempos de pega foi realizado para os cimentos Cauê e Holcim com e sem a presença de aditivos.

Figura 17: Aparelhagem para ensaio de Vicat.



(ARAGÃO, 2012)

3.2.3 - Caracterização dos agregados miúdos e graúdos

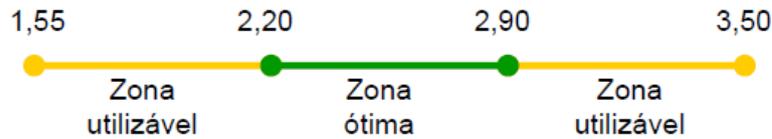
Para a determinação da distribuição granulométrica de agregados miúdos e graúdos para concretos foi utilizada a norma NBR NM 248:2001.

Para os agregados miúdos, usou-se pó de brita (1kg) e, como agregado graúdo, usou-se brita 1 (1,4 kg). Para o pó de brita, usou-se peneiras com abertura de 9,5 mm a 0,15 mm; para análise da brita usou-se peneiras com abertura de 25 mm a 0,15 mm.

A dimensão máxima característica do agregado corresponde ao agregado que apresentar uma porcentagem retida acumulada igual ou imediatamente inferior a 5% em massa. O módulo de finura é a somatória das porcentagens retidas acumuladas em massa de um agregado nas peneiras de série normal dividido por 100; quando maior for o módulo de finura, mais graúdo é o agregado.

A Figura 18 classifica o agregado miúdo através do seu módulo de finura, apresentando três intervalos, compreendidos entre duas zonas. Para valores inferiores à zona ótima, o agregado miúdo está muito fino e, para valores acima da zona ótima, o agregado está muito grosso; o ideal é trabalhar sempre na faixa da zona ótima.

Figura 18: Classificação do módulo de finura para agregados miúdos.



(ARAGÃO, 2012)

3.2.4 - Caracterização do concreto

Para o concreto no estado fresco, foi realizado o ensaio de abatimento de tronco de cone NBR NM 67 para determinação da consistência. No estado endurecido, realizou-se o ensaio para determinação de resistência mecânica a compressão NBR 5739:2007.

A resistência mecânica de compressão estimada no desenvolvimento do traço⁶ do concreto com aditivo foi de 35 MPa.

3.2.5 - Preparação do concreto em laboratório

Os concretos foram preparados de acordo com o procedimento padrão, utilizando-se as normas NBR NM 12655, a qual estabelece o preparo e controle da resistência do concreto, e a norma NBR NM 33, a qual estabelece o procedimento para coleta e a preparação de amostra de concreto fresco, sobre as quais foram realizados ensaios que permitiram determinar suas propriedades. Para cada formulação (Tabela 5) foram preparados 6 corpos de prova para cada idade (7, 14 e 28 dias), totalizando 144 corpos de prova.

3.2.6 - Determinação do abatimento do concreto

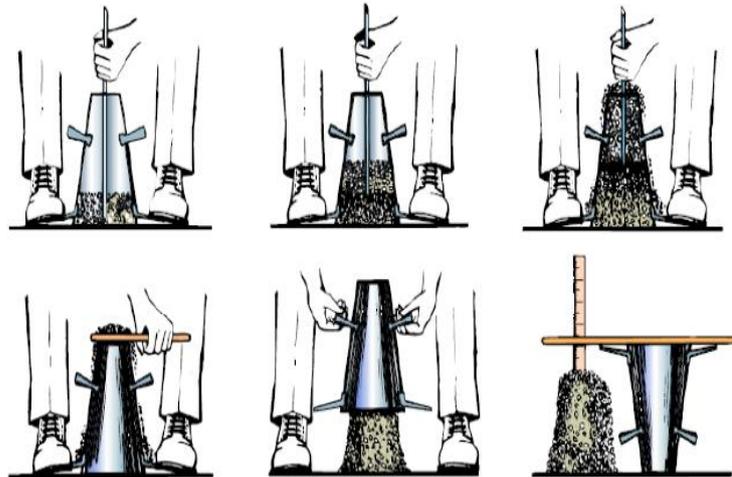
A NBR NM 67 especifica um método para determinar a consistência do concreto fresco (Figura 19) através da medida do seu assentamento, em laboratório ou obra, denominado *Slump Test*.

O ensaio, consiste em preencher (três camadas) de concreto um equipamento com formato cônico, o adensamento é feito individualmente para cada camada. Em seguida, com um tempo total de oito segundos, retira-se o molde e faz-se a medição da consistência do concreto, tomando como base a altura do cone metálico

⁶ Traço: Quantidade dos materiais (em peso ou volume) que será usado na fabricação do concreto (cimento, agregado miúdo, gráúdo, água e aditivos e, em alguns casos, as adições minerais).

(equipamento) e a parte mais alta do cone de concreto, conforme Figura 19. A Tabela 6 foi utilizada para classificar a consistência do concreto.

Figura 19: Deformação do concreto após ensaio de tronco de cone.



(ARAGÃO, 2012)

Tabela 6: Classificação da consistência do concreto.

Consistência	Abatimento (cm)
Seca	0 - 2
Firme	2 - 5
Média	5 - 12
Mole	12 - 18
Fluída	18 - 25

(NBR NM 67)

3.2.7- Moldagem, Cura e Capeamento dos corpos de prova

As normas NBR 5738 e NBR 5739 especificam, respectivamente, o método para moldagem e cura de corpos de prova, e o ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos.

Para o processo de moldagem dos corpos de prova, foi utilizado um molde cilíndrico de 10 x 20 (cm), “untado” com óleo vegetal para facilitar a desforma.

O preenchimento foi feito em duas camadas, sendo cada camada, adensada com 12 golpes. A última camada foi moldada com excesso de concreto, de forma que, ao ser adensada, completasse todo o volume do molde, para que, em seguida, fosse feito o rasamento do molde, eliminando todo o excesso de concreto.

A Tabela 7 relaciona o tipo de molde (dimensões) com o tipo de adensamento (número de camadas e os golpes para o adensamento).

Tabela 7: Moldagem dos corpos de prova (NBR 5738:2003).

Tipo de de corpo-de-prova	Dimensão básica d (mm)	Número de camadas em função do tipo de adensamento		Número de golpes para adensamento
		Mecânico	Manual	
Cilíndrico	100	1	2	12
	150	2	3	25
	200	2	4	50
	250	3	5	75
	300	3	6	100
	450	5	9	225
Prismático	150	1	2	75
	250	2	3	200
	450	3	-	-

Obs. Para concretos com abatimento superior a 160 mm, consultar NBR 5738:2003
(Fonte: Autor, 2014)

Após vinte e quatro horas da moldagem, foi iniciada a cura, sendo os corpos de prova desmoldados e submersos em tanque com água em temperatura em torno de 21^oC.

3.2.8 - Determinação da resistência mecânica à compressão do concreto

Para o ensaio mecânico, segundo a NBR 5739, foi utilizada uma prensa hidráulica EMIC (equipamento para ensaios mecânicos destrutivos) modelo PC 100, capacidade de 100.000 kgf (100 tf). A Figura 20 ilustra a prensa hidráulica de compressão utilizada.

A dosagem de referência do concreto para realização dos ensaios, inicialmente calculada para o concreto sem o uso de aditivo policarboxilato, foi aquela que apresentasse as seguintes propriedades: abatimento de 8 cm (pouca plasticidade) e resistência mecânica à compressão de 35MPa ao vigésimo oitavo dia de cura úmida.

Nas formulações que envolveram o uso de aditivos dosados com 0,2%, 0,4% e 0,6%, o teor de cimento e de agregados se mantiveram; mudou-se apenas a

quantidade de água em função da dosagem do aditivo, justificada pelas propriedades do aditivo, que permitem uma redução de até 20% de água.

Figura 20: Prensa utilizada no rompimento dos corpos de prova.



(Fonte: Autor, 2014)

3.2.9 - Análises de variância e correlação

Análises de variância foram realizadas com o intuito de se verificar se existe uma diferença significativa entre os valores obtidos, e as possíveis interações entre os fatores: tipo de cimento, teor de defloculante utilizado e tempo de cura (idade); a variável resposta, em todos casos, foi à resistência mecânica. Para esta análise de variância, o nível de significância adotado foi de 0,05 e o teste para comparação das médias foi o teste de *Scott Knott*, o delineamento foi o DIC e fatorial.

A correlação (coeficiente de correlação de Pearson), por sua vez, foi avaliada em termos da quantidade de água adicionada, teor de aditivos e valor do abatimento (*Slump Test*). O tipo de correlação avaliada foi a linear; de modo a se ter a análise dos valores obtidos, se próximos a 1 (correlação linear diretamente proporcional) ou a -1 (correlação linear inversamente proporcional).

4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 - Caracterização dos Materiais

4.1.1 - Caracterização dos cimentos Cauê e Holcim

A Tabela 8 apresenta o resultado da caracterização física dos cimentos.

Tabela 8: Caracterização física dos cimentos.

	Normas	Resultado		Limites da
		Cauê	Holcim	NBR 11578/91
Finura na peneira de 75 μ (%)	NBR 11579/91	4,3	4,4	≤ 10
Água da pasta de consistência normal (%)	NBR NM 43/03	28,2	25,0	--
Início de pega (h:min.)	NBR NM 65/03	05:05	03:45	$\geq 1h$
Fim de pega (h:min.)	NBR NM 65/03	06:30	05:00	$\leq 10 h$
Tempo em aberto (h:min)	--	01:25	01:15	--
Permeabilidade ao ar (Blaine m^2/kg)	NBR NM 76/98	357	385	≥ 380
Massa específica (g/cm^3)	NBR NM 23/01	2,99	3	--
Expansabilidade (mm)	NBR NM 11582/91	0	0,5	≤ 5

(Fonte: Autor, 2014)

Analisando-se a massa específica e o ensaio de finura na peneira de 75 μm , observou-se que os cimentos são bastante semelhantes; entretanto, ao ser avaliado o tempo de hidratação de ambos - tempos de pega inicial, final e tempo em aberto - observou-se um tempo de pega menor utilizando-se o cimento Holcim.

Os cimentos que possuem partículas mais finas tendem a hidratar-se mais rápido e, conseqüentemente, apresentar uma resistência mecânica inicial maior quando comparado com a hidratação mais lenta dos cimentos com partículas maiores. Esta afirmação é justificada com o resultado apresentado no ensaio de pasta de consistência normal; ou seja, para uma mesma consistência, o cimento Holcim utilizou 25% de água em 500 g de cimento, e o cimento Cauê utilizou 28,2% de água para atingir a mesma consistência.

As Tabelas 9 e 10 apresentam os resultados de resistência mecânica dos cimentos Cauê e Holcim. Observou-se uma semelhança aparente nos resultados, ocorrendo uma ligeira superioridade na resistência mecânica dos corpos de prova utilizando-se cimento Holcim.

Tabela 9: Resistência à compressão do cimento Cauê.

CIMENTO CAUÊ - Resistência à Compressão (Mpa) - (NBR 7215/96)							
Idade (dias)	Corpo-de-prova número				Média	Desvio relativo máximo (%)	Limites NBR 11578/91
	1	2	3	4			
3	20,1	20,5	19,8	20,2	20,2	2,0	≥ 10,0
7	28,5	28,1	28,2	28,6	28,4	1,1	≥ 20,0
28	35,3	34,3	37,5	36,6	35,9	4,5	≥ 32,0

(Fonte: Autor, 2014)

Tabela 10: Resistência à compressão do cimento Holcim.

CIMENTO HOLCIM - Resistência à Compressão (Mpa) - (NBR 7215/96)							
Idade (dias)	Corpo-de-prova número				Média	Desvio relativo máximo (%)	Limites NBR 11578/91
	1	2	3	4			
3	21,1	21,2	21,3	21,9	21,4	2,3	≥ 10,0
7	29,3	29,9	28,5	27,9	29,9	3,5	≥ 20,0
28	38,6	39,8	38,5	37,7	38,7	2,8	≥ 32,0

(Fonte: Autor, 2014)

Por meio da análise de variância (Apêndice A) verificou-se os fatores simples (cimento e idade) e a interação dupla (cimento x Idade) foram significativo em relação à variável resposta (resistência mecânica); ou seja, o valor-P é menor que 0,05 (nível de significância), como indicado na Tabela A1 - Apêndice A. Assim, pode-se afirmar, que tanto o cimento, como a idade isoladamente, bem como, o cimento e a idade juntos, influenciam as características/propriedades do produto final em termos de resistência mecânica.

No desdobramento do fator Cimento dentro de cada nível do fator Idade (3, 7 e 28 dias), observou-se a significância do teste somente para as idades de 3 (três) e 28 (vinte e oito) dias (Tabela A2 - Apêndice A). Nestas idades, o cimento Holcim apresentou valores médios de resistência mecânica superiores aos do cimento Cauê (Tabelas A3 e A4 - Apêndice A).

Para a idade de 7 (sete) dias, observou-se que a resistência mecânica não é influenciada pela marca de cimento utilizado. Avaliando-se a evolução da hidratação nos cimentos e tomando-se como referência o início do processo de hidratação e o

fim do processo (após 28 dias), torna-se nítido o efeito da marca do cimento na resistência mecânica. Assim, pode-se afirmar que as características químicas e físicas oriundas das duas marcas de cimento, afetam o processo de hidratação e conseqüentemente, as características/propriedades do produto acabado.

No desdobramento do fator Idade dentro de cada nível do fator cimento (Cauê e Holcim) (Tabela A5 - Apêndice A), observou-se a significância do teste para os dois níveis; ou seja, para cada cimento houve um acréscimo de resistência mecânica para todas as idades, onde na idade de 28 dias a resistência é maior nos dois cimentos.

Cabe ressaltar ainda que, apesar da superioridade do cimento Holcim em termos de resistência mecânica, ambas composições mostraram valores em conformidade aos exigidos em norma.

A Tabela 11 apresenta a análise química dos cimentos Cauê e Holcim.

Aplicando-se a composição potencial ou composição de Bogue (Apêndice B), foi possível determinar os principais compostos cálcicos do cimento, principalmente o silicato tri cálcico e bi cálcico, responsáveis pelo endurecimento rápido, liberando alto calor de hidratação e promovendo alta resistência inicial. Os resultados indicaram que o cimento Holcim apresenta maior percentual dos silicatos responsáveis pela formação do gel de CSH, culminando em maior resistência inicial e final do produto, o que pode explicar possivelmente a superioridade dos resultados obtidos com a utilização deste cimento.

Tabela 11: Análise química dos cimentos obtidos por fluorescência de Raios X.

Elemento Químico (%)	Cimento Holcim	Cimento Cauê
PF	5,200	4,100
Al₂O₃	5,620	7,110
SiO₂	22,300	22,450
TiO ₂	0,270	0,300
Fe₂O₃	2,230	2,490
CaO	57,830	57,090
MgO	2,880	2,650
Na ₂ O	0,530	0,600
K ₂ O	0,740	0,710
P ₂ O ₅	0,160	0,000
ZrO ₂	0,020	0,300
Cr ₂ O ₃	0,070	0,040
F	0,734	0,956
I	0,045	0,039
MnO	0,238	0,372
Nb ₂ O ₅	0,022	0,024
SO₃	0,892	0,864
SrO	0,147	0,214
ZnO	0,027	0,000

(Fonte: Autor, 2014)

Outro fator que também pode contribuir para a maior resistência mecânica é o menor tamanho médio de partículas (abaixo de 75 microns). Quanto menor o tamanho destas, maior a reatividade do pó e menor a quantidade de água exigida no processo de hidratação, o que traz, como consequência direta, o aumento da resistência mecânica, já que, quanto menor o teor de água necessária para a hidratação do cimento, menor a porosidade do concreto.

4.1.2 - Caracterização dos Agregados: Miúdos e Graúdos

4.1.2.1 - Caracterização dos agregados miúdos

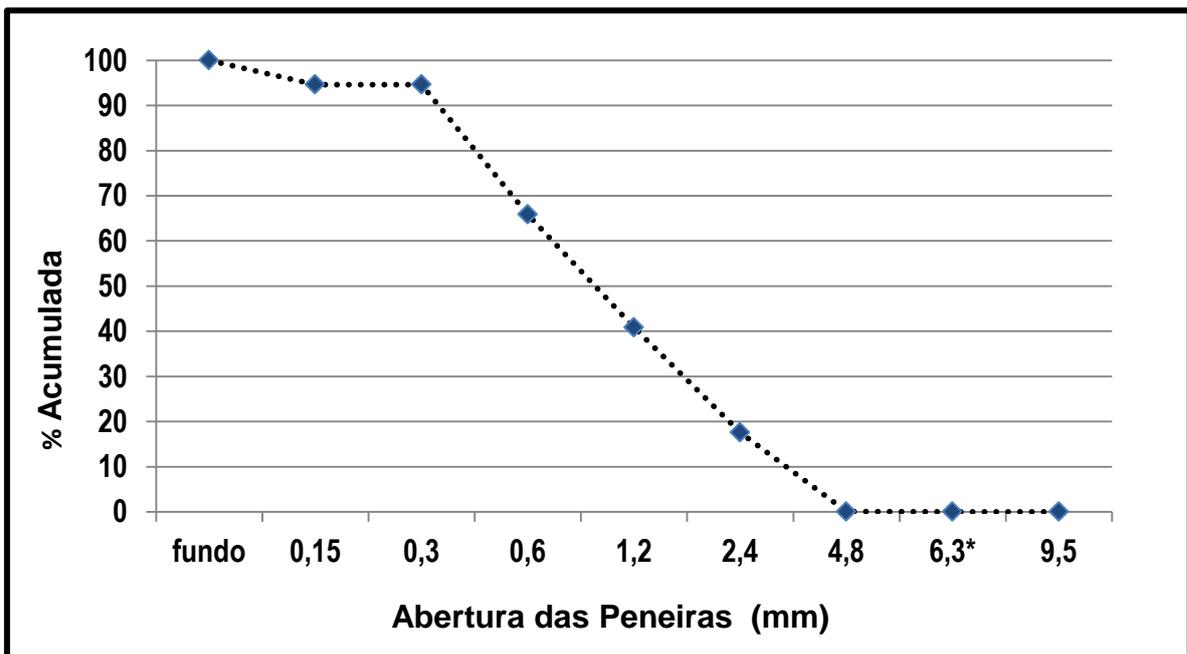
A Tabela 12 apresenta os resultados da distribuição granulométrica do agregado miúdo (pó de brita), já normalizados, bem como os valores de referência, de acordo com a norma NBR 7211:2009; a Figura 21 mostra a distribuição granulométrica do pó de brita obtida.

Tabela 12: Caracterização granulométrica do pó de brita.

Peneiras (mm)	Massa Retida (g)	Massa Acumulada (g)	% retida (%)	% Acumulada (%)	Limite Inferior	Limite Superior
9,5	0	0,00	0,00	0,00	0	0
6,3*	0	0,00	0,00	0,00	0	7
4,8	0,63	0,63	0,06	0,06	0	10
2,4	174,79	175,42	17,48	17,54	10	25
1,2	232,90	408,32	23,29	40,83	20	50
0,6	250,03	658,35	25,00	65,84	35	70
0,3	287,86	946,21	28,79	94,62	65	95
0,15	0	946,21	0,00	94,62	90	100
fundo	53,78	1.000,0	5,38	100,00		
Total	1.000,0		100			

(Fonte: Autor, 2014)

Figura 21: Curva granulométrica do pó de brita.



(Fonte: Autor, 2014)

Foi possível observar que o pó de brita utilizado está dentro da norma exigida, a qual qualifica o pó para ser utilizado como agregado miúdo. O módulo de finura calculado foi de 3,13; esse valor também está dentro dos padrões exigidos pela norma, a qual estabelece os valores de 2,9 a 3,5, assegurando também a qualidade do pó (matéria prima) utilizado.

4.1.2.2- Caracterização dos agregados graúdos

A Tabela 13 apresenta os resultados da distribuição granulométrica do agregado graúdo, bem como os valores de referência, de acordo com a norma NBR 7211:2009; a Figura 22 indica a distribuição granulométrica da brita 1 obtida.

Foi possível observar que a brita 1 está dentro da norma exigida, a qual a qualifica para ser utilizada como agregado graúdo. O módulo de finura calculado foi de 6,81; entretanto, no caso do agregado graúdo, não há limites especificados para os valores desse módulo; ou seja, o material pode apresentar grande variedade em termos de dimensão.

Tabela 13: Caracterização granulométrica da brita 1.

Peneiras (mm)	Massa Retida (g)	Massa Acumulada (g)	% retida (%)	% Acumulada (%)
25*	0	0,00	0,00	0,00
19	22,25	22,25	1,59	1,59
12,5*	684,32	706,57	48,88	50,47
9,5	425,60	1.132,17	30,40	80,87
6,3*	226,21	1.358,38	16,16	97,03
4,8	28,94	1.387,32	2,07	99,09
2,4	10,09	1.397,41	0,72	99,82
1,2	0	1.397,41	0,00	99,82
0,6	0	1.397,41	0,00	99,82
0,3	0	1.397,41	0,00	99,82
0,15	0	1.397,41	0,00	99,82
fundo	2,59	1.400,0	0,19	100,00
Total	1.400,0		100	928

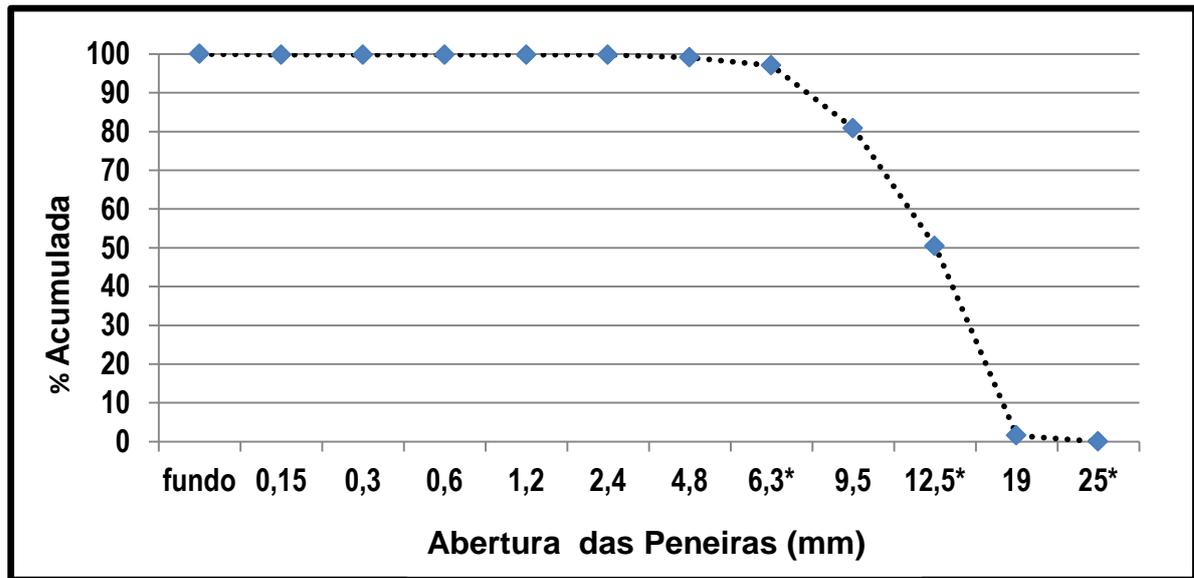
Diâmetro máximo - 19 mm

Módulo de finura calculdo - 6,81

* Peneiras intermediárias

(Fonte: Autor, 2014)

Figura 22 : Curva granulométrica da brita 1.



(Fonte: Autor, 2014)

4.2-Determinação do tempo de pega (Método Vicat)

A Tabela 14 apresenta o resultado do ensaio de pasta de consistência normal e tempo de início e fim de pega para cimento com aditivo Policarboxilato em três dosagens; ou seja, cimento dosado com 0,2%, 0,4% e 0,6% de aditivo.

Tabela 14: Resultado dos tempos de pega inicial e final, tempo em aberto da pasta de consistência normal em função do aditivo utilizado e tipo de cimento.

Pasta	Teor de Aditivo (%)	Água da pasta de consistência normal (%)	Tempos de pega (h:m)		Tempo em Aberto (h:m)
			Início	Fim	
C.C	0	28,2%	5:05	6:30	1:25
C.H	0	25,0%	3:45	5:00	1:15
CC-Pc 0,2%	0,2%	24,2%	5:55	10:35	4:40
CH-Pc 0,2%	0,2%	23,3%	4:33	8:45	4:12
CC-Pc 0,4%	0,4%	22,1%	6:35	12:30	5:55
CH-Pc 0,4%	0,4%	20,4%	6:10	11:20	5:10
CC-Pc 0,6%	0,6%	19,9%	7:22	15:14	7:51
CH-Pc 0,6%	0,6%	17,9%	7:50	14:21	6:31

(Fonte: Autor, 2014)

Foi observado que, com a presença do aditivo, ocorreu um significativo retardo nos tempos de pega inicial, final e tempo em aberto em todas as dosagens para as duas marcas de cimento, e que, com o aumento na dosagem, o retardo no tempo de pega se intensificou, o que é bastante interessante em termos de aplicação da formulação em construção civil.

O retardo de pega está relacionado com a aderência do aditivo em toda a superfície da partícula do cimento, criando uma barreira física ao acesso da água, dificultando assim o processo de hidratação, tornando o processo de dissolução das fases mais lento.

O cimento Cauê, em todas as dosagens, teve um retardo maior quando comparado com o cimento Holcim, o que pode estar relacionado à menor presença de silicatos hidratáveis e/ou maior tamanho médio de partículas finas.

Em relação ao ensaio da pasta de consistência normal para cimento com aditivo, verificou-se uma redução da quantidade de água à medida que se aumenta a dosagem do aditivo. Tal fato é justificado pelo processo de liberação de água no sistema pelo aditivo defloculante policarboxilato; quando maior a dosagem, maior a quantidade de água liberada no sistema.

Apesar do cimento Cauê apresentar maiores tempos para a hidratação, o que, no canteiro de obras, se torna uma vantagem em termos de aplicação e adensamento do concreto, o menor teor de água necessário para a hidratação do cimento e maior resistência mecânica obtida com a utilização do cimento Holcim tornam este último mais atrativo sob o ponto de velocidade na execução da obra.

4.3 - Determinação do abatimento do concreto (Slump Test)

Em relação ao abatimento do concreto, levando em consideração todas as composições, verificou-se que o concreto fabricado com o cimento Holcim obteve um abatimento maior em todas as dosagens quando comparado com o concreto fabricado com o cimento Cauê, conforme Tabela 15.

Através do estudo da correlação linear entre teor de água adicionada e teor de aditivo, foi possível observar uma elevada correlação entre as duas variáveis; o valor foi de aproximadamente -0,976 (Tabela C2 - Apêndice C), indicando que, quanto maior o teor de aditivo adicionado, menor a quantidade de água necessária para a preparação do concreto.

Ao avaliar a correlação entre teor de água e abatimento do concreto, tanto para o cimento Cauê como Holcim, observou-se uma fraca correlação linear entre as variáveis (Tabela C2 - Apêndice C), indicando que os valores obtidos no abatimento são pouco influenciados pelo teor de água adicionado; nesse ínterim, a presença do aditivo parece ter uma influência muito mais forte no abatimento do concreto, uma vez que os valores obtidos nesta correlação linear (para ambos cimentos) são maiores.

Tabela 15: Resultados da consistência (abatimento) do concreto.

Concreto sem aditivo		Concreto 0.2 % aditivo		Concreto 0.4 % aditivo		Concreto 0.6 % aditivo	
C. Cauê	C.Holcim	C. Cauê	C.Holcim	C. Cauê	C.Holcim	C. Cauê	C.Holcim
Água = 8,92 l		Água = 7,92 l (-13%)		Água = 7,56 l (-18%)		Água = 7,04 l (-27%)	
Aditivo = 0 g		Aditivo = 46 g		Aditivo = 92 g		Aditivo = 138 g	
Slump Teste (cm)		Slump Teste (cm)		Slump Teste (cm)		Slump Teste (cm)	
11,1	16,3	5,5	7,8	13,5	16,2	20,1	23,8

(Fonte: Autor, 2014)

Foi observada uma elevada correlação (aproximadamente 0,982) (Tabela C2 - Apêndice C) entre os valores de abatimento para os dois concretos (com cimento Holcim e Cauê), o que já era esperado, uma vez que ambos apresentam comportamento semelhante em função do teor de água e de defloculante adicionado, havendo uma superioridade nos valores de abatimento quando utilizado o cimento Holcim na formulação do concreto.

Os cálculos efetuados para determinação da correlação entre as variáveis aqui descritas podem ser vistas no Apêndice C.

4.4 - Determinação do cálculo da resistência à compressão aos 7, 14 e 28 dias

A Tabela 16 apresenta os resultados de resistência mecânica, ensaios de compressão dos concretos em função do teor de aditivo adicionado e do tipo de cimento utilizado. A Tabela 17 apresenta a média dos valores obtidos a partir da tabela anterior e seus respectivos desvios.

Tabela 16: Resultado dos ensaios de resistência à compressão do concreto.

idade (dias)	Concreto sem aditivo		Concreto 0,2 % aditivo		Concreto 0,4 % aditivo		Concreto 0,6 % aditivo	
	C. Cauê	C.Holcim						
	Resistência Mecânica (Mpa)		Resistência Mecânica (Mpa)		Resistência Mecânica (Mpa)		Resistência Mecânica (Mpa)	
7	33,04	36,45	38,65	32,85	49,97	54,80	47,89	56,59
	31,31	33,71	38,92	35,25	47,89	44,27	58,87	48,60
	33,62	33,94	32,28	41,31	40,69	44,75	48,39	60,46
	32,54	36,79	39,08	46,60	44,05	52,57	59,31	48,73
	31,69	32,70	36,92	39,71	48,69	50,04	48,59	59,52
	31,48	34,80	31,90	39,21	45,17	44,39	50,01	49,87
14	38,70	35,27	44,75	44,88	51,34	55,99	61,38	58,97
	34,65	38,00	36,09	44,94	46,18	45,32	49,41	50,93
	37,43	38,18	38,14	37,12	56,69	52,48	59,54	51,81
	34,45	38,69	41,75	46,11	55,70	53,30	61,02	61,55
	35,11	38,39	38,37	45,17	58,06	54,51	49,82	58,32
	33,86	35,53	43,86	38,15	55,25	55,24	50,92	63,07
28	42,41	41,97	45,77	48,80	57,36	58,79	64,42	63,48
	39,49	45,74	47,07	44,57	58,94	58,00	60,27	66,46
	40,61	43,03	38,15	46,59	53,22	58,68	63,22	67,92
	41,11	42,38	38,66	53,50	54,03	54,80	65,92	70,09
	39,22	39,61	47,10	48,84	46,85	57,36	65,41	69,26
	41,36	44,17	45,15	47,54	58,32	58,18	65,08	60,97

(Fonte: Autor, 2014)

Tabela 17: Resistência média à compressão e desvio padrão.

Idade (dias)	Concreto sem aditivo		Concreto 0,2 % aditivo		Concreto 0,4 % aditivo		Concreto 0,6 % aditivo	
	C. Cauê	C.Holcim	C. Cauê	C.Holcim	C. Cauê	C.Holcim	C. Cauê	C.Holcim
7	32,28 ± 0,93	34,73 ± 1,61	36,29 ± 3,35	39,16 ± 4,8	46,08 ± 3,44	48,47 ± 4,64	52,18 ± 5,4	53,96 ± 5,53
14	35,70 ± 1,92	37,34 ± 1,52	40,49 ± 3,48	42,73 ± 3,98	53,87 ± 4,39	52,81 ± 3,88	55,35 ± 5,86	57,44 ± 5,02
28	40,70 ± 1,2	42,82 ± 2,08	43,65 ± 4,14	48,31 ± 3	54,79 ± 4,52	57,64 ± 1,48	64,05 ± 2,07	66,36 ± 3,52

(Fonte: Autor, 2014)

A partir da análise de variância individual dos fatores, observou-se uma significância nos resultados; indicando a influência individual de cada fator em relação à variável resposta (resistência mecânica).

O cimento Holcim obteve resultados médios de resistência mecânica mais elevadas quando comparado com o cimento Cauê (Tabela D2 - Apêndice D).

Em relação ao Aditivo (0,2%, 0,4% e 0,6%), indicou um aumento de resistência mecânica à medida que se aumenta a dosagem do aditivo, obtendo-se uma resistência mecânica maior com a dosagem de 0,6% (Tabela D3 - Apêndice D). Tal fato pode ser explicado pelo princípio de ação do aditivo (defloculante); ou seja, em um sistema defloculado utiliza-se uma quantidade menor de água para hidratação, promovendo assim um ganho de resistência mecânica.

Finalmente através do desdobramento do fator Idade, observou-se um aumento de resistência mecânica ao longo da idade, o que para esta análise já era esperado, uma vez que o concreto adquire resistência ao longo do tempo (Tabela D4 - Apêndice D).

Através da análise de variância, verificou-se que as interações duplas e triplas entre os fatores (cimento, aditivo e idade) e seus níveis não foram significativos (Tabela D1 - Apêndice D), uma vez que o valor P foi maior que 0,05. A partir desse resultado é possível afirmar que a melhor formulação do concreto é obtida com o cimento Holcim e teor de aditivo de 0,6%, proporcionando maior resistência mecânica quando em uso. Além disso, o tempo de trabalhabilidade desta formulação é suficientemente alta, o que garante uma eficiência nos processos de aplicação: transporte, bombeamento e adensamento.

5 – CONCLUSÕES

Através dos ensaios e resultados obtidos, pode-se concluir que:

- O aditivo possui forte influência nas características do concreto final, uma vez que a presença deste permite um maior tempo de trabalhabilidade (retardo no tempo de pega), tanto para as formulações investigadas com cimento Cauê quanto Holcim. Além disso, a presença do aditivo faz com que o teor de água a ser adicionado seja otimizado devido à maior eficiência no processo de defloculação; ou seja, com o aumento do teor de aditivos na massa do concreto, tem-se uma diminuição do teor de água necessário para a hidratação do cimento, propiciando uma melhoria nas propriedades mecânicas em geral do concreto.
- Os resultados dos ensaios de Resistência Mecânica à Compressão, indicaram a superioridade dos resultados nas composições utilizando cimento Holcim nas três idades, o que pode estar associado à maior presença dos compostos de silicatos (calculadas pela Lei de Bogue - C_3S e C_2S), os quais são responsáveis

pela formação do gel de CSH e também à granulometria mais fina, promovendo maior reatividade do pó.

- Através da análise de variância, foi possível comprovar que tanto o cimento e idade, isoladamente, como juntos, afetam diretamente a resistência mecânica do produto final, indicando a forte influência destes dois fatores na propriedade.
- Para os resultados obtidos nas propriedades de resistência mecânica através da Análise de Variância, verificou-se que os fatores (cimento, aditivo e idade) analisadas individualmente são significativas; ou seja, elas influenciam de forma direta na resistência mecânica; já as interações duplas e tripla e seus níveis não foram significativos, o que permite concluir que, dentro do universo aqui investigado, os melhores resultados foram obtidos com o cimento Holcim e teor de aditivo de 0,6% para o tempo de 28 dias.

6- REFERÊNCIAS

AITCIN, P. C. **Concreto de Alto Desempenho**. Pini, 667p., 2000.

ABNT-NBR 5739: **Concreto- Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2007.

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

_____.-NBR 6467: **Agregados – Determinação do inchamento de agregados miúdos – Métodos de ensaio**. Rio de Janeiro, 2009.

_____.-NBR 8953: **Concreto para fins estruturais. Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência**. Rio de Janeiro, 2009.

_____.-NBR 11768: **Aditivos químicos para concreto de cimento Portland-requisitos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2011.

_____.-NBR 12655: **Concreto de cimento Portland- Preparo, controle e recebimento- Procedimentos**. Rio de Janeiro, 2006.

_____.-NBR 12821: **Preparação de concreto em laboratório- Procedimentos**. Rio de Janeiro, 2009.

_____.NM 9: **Concreto e argamassa- Determinação dos tempos de pega por meio de resistência à penetração**. Rio de Janeiro, 2003.

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

____.-NM 52: **Agregado miúdo – Determinação da massa específica, massa específica aparente.** Rio de Janeiro, 2009.

____.-NM 53: **Agregado graúdo – Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água.** Rio de Janeiro, 2009.

____. NM 65: **Cimento Portland- Determinação do tempo de pega.** Rio de Janeiro, 2002.

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

____.-NM 248: **Determinação da composição granulométrica.** Rio de Janeiro, 2003.

ARAGÃO, M. **Seção de Ensino de Engenharia de Fortificação e Construção, Materiais de Construção II.** apostila de aula, IME, INSTITUTO MILITAR EXERCITO, 2012.

BEZERRA, U. T. **Compósitos Portland-Biopolímero para cimentação de poços de petróleo.** 287f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia dos Materiais)- Universidade Federal do Rio Grande do Norte.Natal, 2006.

CASTRO, A. L. **Aplicação de conceitos reológicos na tecnologia dos concretos de alto desempenho.** 302f. Tese (Doutorado em Interunidades em Ciência e Engenharia de Materiais)- Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2007.

CASTRO, A. L.; PANDOLFELLI, V. C. **Revisão: Conceitos de dispersão e empacotamento de partículas para a produção de concretos especiais aplicados na construção civil.** Artigo publicado, Cerâmica 55 p.18-32, 2009.

COSTA, C.; CARVALHO, P.A.; BORDADO, J. C.; NUNES, A. **Estudo de argamassas de base cimentícia por microscopia electrónica de varrimento.** Artigo publicado, Ciência & Tecnologia dos Materiais, Vol. 21, n.º3/4, 2009.

CURY,A.; **Nunca desista dos seus sonhos.** Rio de Janeiro, Sexvante, 153p.,2004.

FILHO, J. H. **Sistemas cimento, cinza volante e cal hidratada: mecanismo de hidratação, microestrutura e carbonatação de concreto.** 247f. Tese (Doutorado em Engenharia de Construção Civil e Urbana) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2008.

FRACALOSSO, A. R. G. **Aditivos de base policarboxilatos: influência nos tempos de pega e na manutenção do abatimento em pastas de cimento Portland.** 70f. Trabalho de diplomação, Engenharia Civil, Universidade Federal Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

FUSCO, P. B. **Tecnologia do Concreto Estrutural.** 2º edição, São Paulo, Pini, 199p., 2012.

GAVA, P. P.; MENEGUETTI, L. C.; DALCANA, P. R.; POSSAN, E. **Concreto de normal e alta resistência – definição do teor de aditivo redutor de água e dosagem para materiais da região do oeste do Paraná.** Anais do 43º Congresso Brasileiro do Concreto, 2001.

GONÇALVES, J. P.; FILHO, R. D. T.; FAIRBAIRN, E. M. R. **Estudo da hidratação de pastas de cimento Portland contendo resíduo cerâmico por meio de análise térmica.** Artigo publicado, Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, v. 6, n. 4, p. 83-94, 2006

HARTMANN, C. T.; HELENE, P. R. L. **Avaliação de aditivos superplastificantes base policarboxilatos destinados a concretos.**Artigo publicado, Boletim Técnico Escola Politécnica Usp, 2003.

ISAIA, G. C. **Concreto: Ciência e Tecnologia**, Volumes I e II. São Paulo. IBRACON, 1902p., 2011.

JUNIOR, B. F. S. **Modificações morfológicas e estruturais de pasta de cimento aditivada com termofixo e base de epóxi para utilização em Poço de Petróleo.** 139f. Dissertação-(Mestrado em Física)- Universidade Federal de Sergipe- São Cristóvão-SE, 2006.

LADEIRA, L. O.; CALIXTO, J. M. **Nanotecnologia impulsiona o futuro da construção civil.** Artigo publicado, Revista Vértice CREA-MINAS, N.14, pag.16, issn-2177-5362, 2013.

LYRA, J. S.; ROMANO, R. C. O.; PILEGGI, R. G.; GOUVÊA, D. **Consolidação de pastas cimentícias contendo policarboxilatos um estudo calorimétrico e reológico.** Artigo publicado, Cerâmica 58 p.137-143, 2012.

MANUAL TÉCNICO, **Aditivos para Concreto BASF**, 2009.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades, e Materiais.** 2ª ed., São Paulo. IBRACON, 674p., 2008.

MELO, K. A.; MARTINS, V. C.; REPETTE, L. W. **Estudo de compatibilidade entre cimento e aditivo redutor de água.** Artigo publicado, Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, v.9, n.1, p.45-46, 2009.

MELLO, A. L. **Análise do comportamento reológico de pastas de cimento contendo resíduos de pneu para poços de petróleo.** 126f. Dissertação-(Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais)- Universidade Federal Rio Grande do Norte, Natal, 2009.

NEVILLE, A. M; BROOKS, J. J. **Tecnologia do Concreto.** 2ª ed. Porto Alegre. BOOKMAN, 448p., 2013.

REPETTE, W. L. **Aditivos para Concreto**, Material do Curso; Ciência e Tecnologia de Aditivos para Concreto e Argamassa, Curso Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, p.115, 2009.

REIS, J. F. A. **Determinação de parâmetros reológicos de concretos através do ensaio de abatimento de tronco de cone modificado : estudo de caso.** 177f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2008.

SANTOS, S. B. **Análise da fluência do concreto massa nas primeiras idades de carregamentos: influência de aditivos plastificantes e adições minerais.** 264f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil)-Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

SILVA, I. J.; LIBÓRIO, J. B. L. **Hidratação do Concreto de Alto Desempenho e suas Propriedades Mecânicas.** Anais do 43º Congresso Brasileiro de Cerâmica, p.30301, Florianópolis, 1999.

SILVA, I. J. **Contribuição ao estudo dos concretos de elevado desempenho: propriedades mecânicas, durabilidade e microestrutura.** 279f. Tese (Doutorado em Interunidades em Ciência e Engenharia de Materiais)- Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2000.

SICHERI, E. P.; ALMEIDA, A. E. F. **Propriedades microestruturais de argamassas de cimento Portland com adições minerais e poliméricas utilizadas na fixação de porcelanato.** Artigo publicado revista Cerâmicas 52 pag.174-179, 2006.

TAVARES, A. M. G. **Síntese e caracterização de pastas de cimento aditivadas com resinas epóxi – análises cinéticas, termodinâmicas e calorimétricas.** 155f. Dissertação-(Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2010.

THOMAZ, E. C. S. **Seção de Ensino de Engenharia de Fortificação e Construção, Hidratação do Cimento Portland Microscopia Eletrônica Ambiental.** apostila de aula, IME, INSTITUTO MILITAR EXERCITO, 2012.

_____.- **Inchamentos de agregados,** notas de aula IME, Instituto Militar Exercito, 2012.

_____. **Método Ensaio de Vicat,** notas de aula IME, Instituto Militar Exercito, 2012.

TUTIKIAN, B.; CECCONELLO, V. **A influência das baixas temperaturas na evolução das resistências do concreto.** Artigo revista IBRACON de ESTRUTURAS e MATERIAIS, Volume 5, Numero 1, Fevereiro, p. 68-83, ISSN 1983-4195, 2012.

APÊNDICE A - Análise de variância dos cimentos

Tabela A1: Resultados da análise de variância dos cimentos Cauê e Holcim.

FV	GL	SQ	QM	FC	Pr > Fc	Influência
Cimento	1	13,500000	13,500000	21,419	0,0002	sig.
Idade	2	1093,155833	546,577917	867,202	0,0000	sig.
Cimento x Idade	2	4,9575	2,478750	3,933	0,0383	sig.
Erro	18	11,345000	0,630278			
Total corrigido	23	1122,958333				
CV (%)	2,75					
Média geral	28,8916667					
Número de observações:	24					

Tabela A2: Valores do desdobramento do fator Cimento dentro de cada nível do fator Idade nos níveis (3,7 e 28 dias).

FV	GL	SQ	QM	FC	Pr > Fc	Influência
Cimento / 1	1	3,001250	3,001250	4,762	0,0426	sig.
Cimento / 2	1	0,605000	0,605000	0,960	0,3402	ñ sig.
Cimento / 3	1	14,851250	14,851250	23,563	0,0001	sig.
erro	18	11,345000	0,630278			
Codificação da Idade: 1 = 3 dias 2 = 7 dias 3 = 28 dias						

Tabela A3: Valores médios de resistência mecânica para os tratamentos Idade (fator) e 3 dias (nível).

Tratamentos	Médias (MPa)	
Cauê	20,150000	a1
Holcim	21,375000	a2

Tabela A4: Valores médios de resistência mecânica para os tratamentos, Idade (fator) e 28 dias (nível).

Tratamentos	Médias (MPa)	
Cauê	35,925000	a1
Holcim	38,650000	a2

Tabela A5: Tabela abaixo apresentada os valores do desdobramento do fator Idade dentro de cada nível do fator Cimento nos níveis (Cauê, Holcim).

FV	GL	SQ	QM	FC	Pr > Fc	Influência
Idade / 1	2	497,961667	248,980833	395,033	0,0000	sig.
Idade / 2	2	600,151667	300,075833	476,101	0,0000	sig.
erro	18	11,345000	0,630278			
Codificação do Cimento: 1 = Cauê 2 = Holcim						

Tabela A6: Valores médios de resistência mecânica para os tratamentos, Cimento Cauê (fator) e Idade 3,7 e 28 dias (níveis).

Tratamentos	Médias (MPa)	
3	20,150000	a1
7	28,350000	a2
28	35,925000	a3

Tabela A7: Valores médios de resistência mecânica para os tratamentos, Cimento Holcim (fator) e Idade 3,7 e 28 dias (níveis).

Tratamentos	Médias (Mpa)	
3	21,375000	a1
7	28,900000	a2
28	38,650000	a3

APÊNDICE B – Análise química e composto de Bogue

 Associação Brasileira de Cimento Portland	ÁREA DE TECNOLOGIA - LABORATÓRIO 1/1	 Ensaio NBR ISO/IEC 17025 CLF 0024
	RELATÓRIO DE ENSAIO Nº 90515	
Interessado: Rodolfo Henrique Freitas Grillo Endereço: Av. Prof. Olavo G. de Oliveira, 4800 – Pouso Alegre/MG CEP: 37550-000 Referência: Orçamento 59823		

Amostra nº: 176.438	Data de entrada: 25/03/2014
Material declarado: Cimento Portland Composto Cauê CP II-E 32	
Realização dos ensaios: 27.03.2014 a 25.04.2014	
Objetivo: Análise química de cimento e determinação do composto de Bogue	

TABELA - Análise química e composto de Bogue

Composição Química		Normas	Teor (% em massa)	Limites da ABNT NBR 11578/91
Perda ao Fogo	PF	NBR NM 19/12	5,61	≤ 6,5%
Dióxido de Silício	SiO ₂	NBR 14656/01	20,42	---
Óxido de Alumínio	Al ₂ O ₃	NBR 14656/01	5,59	---
Óxido de Ferro	Fe ₂ O ₃	NBR 14656/01	2,18	---
Óxido de Cálcio	CaO	NBR 14656/01	57,53	---
Óxido de Magnésio	MgO	NBR NM 18/12	3,05	≤ 6,5%
Anidrido Sulfúrico	SO ₃	NBR NM 16/04	2,59	≤ 4,0
Óxido de Sódio	Na ₂ O	NBR NM 17/12	0,14	---
Óxido de Potássio	K ₂ O	NBR NM 17/12	0,87	---
Anidrido Carbono	CO ₂	NBR NM 20/12	5,26	≤ 5,0%
Resíduo Insolúvel	RI	NBR NM 22/12	0,62	≤ 2,5%
Cal Livre	CaO (I)	NBR NM 13/12	1,57	---
(*) Compostos de Bogue	Silicato Tri Cálcico - C ₃ S		38,29	---
	Silicato Bi Cálcico - C ₂ S		29,67	---
	Aluminato Tri Cálcico - C ₃ A		11,13	---
	Ferroaluminato Tetra cálcico - C ₄ AF		6,63	---

(*) O cálculo potencial de Bogue foi desenvolvido para a determinação da composição mineralógica potencial em *clínqueres e farinhas*. De um modo geral, não se recomenda seu uso em *cimentos compostos*, podendo ser considerado apenas como uma primeira aproximação no caso de *cimentos CP V ARI*, onde predominam os teores de clínquer, calcário e gesso.


 Engº Rubens Curti
 Supervisor Técnico

São Paulo, 29 de maio de 2014


 Geol. Arnaldo Forti Battagin
 CREA 0600586647
 Chefe do Laboratório

Este documento tem significação restrita e diz respeito tão somente à(s) amostra(s) ensaiada(s). Sua reprodução só poderá ser total e depende da aprovação formal deste Laboratório.

APÊNDICE B – Análise química e composto de Bogue



ÁREA DE TECNOLOGIA - LABORATÓRIO

1/1

RELATÓRIO DE ENSAIO Nº 90516

Interessado: Rodolfo Henrique Freitas Grillo

Endereço: Av. Pref. Olavo G. de Oliveira, 4800 – Pouso Alegre/MG

CEP: 37550-000

Referência: Orçamento 59823



Amostra nº: 176.439

Data de entrada: 25/03/2014

Material declarado: Cimento Portland Composto Holcim CP II-E 32

Realização dos ensaios: 27.03.2014 a 25.04.2014

Objetivo: Análise química de cimento e determinação do composto de Bogue

TABELA - Análise química e composto de Bogue

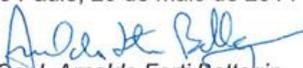
Composição Química		Normas	Teor (% em massa)	Limites da ABNT NBR 11578/91
Perda ao Fogo	PF	NBR NM 19/12	3,73	≤ 6,5%
Dióxido de Silício	SiO ₂	NBR 14656/01	23,28	---
Óxido de Alumínio	Al ₂ O ₃	NBR 14656/01	7,55	---
Óxido de Ferro	Fe ₂ O ₃	NBR 14656/01	2,45	---
Óxido de Cálcio	CaO	NBR 14656/01	54,41	---
Óxido de Magnésio	MgO	NBR NM 18/12	3,26	≤ 6,5%
Anidrido Sulfúrico	SO ₃	NBR NM 16/04	1,96	≤ 4,0
Óxido de Sódio	Na ₂ O	NBR NM 17/12	0,15	---
Óxido de Potássio	K ₂ O	NBR NM 17/12	0,79	---
Anidrido Carbono	CO ₂	NBR NM 20/12	3,47	≤ 5,0%
Resíduo Insolúvel	RI	NBR NM 22/12	1,88	≤ 2,5%
Cal Livre	CaO (l)	NBR NM 13/12	1,31	---
(*) Compostos de Bogue	Silicato Tri Cálcico - C ₃ S		(**)	
	Silicato Bi Cálcico - C ₂ S		74,06	
	Aluminato Tri Cálcico - C ₃ A		15,87	
	Ferroaluminato Tetra cálcico - C ₄ AF		7,45	

(*) O cálculo potencial de Bogue foi desenvolvido para a determinação da composição mineralógica potencial em **clínqueres e farinhas**. De um modo geral, não se recomenda seu uso em **cimentos compostos**, podendo ser considerado apenas como uma primeira aproximação no caso de **cimentos CP V ARI**, onde predominam os teores de clínquer, calcário e gesso.

(**) O teor determinado pelo cálculo de Bogue para o composto C₃S foi de **- 9,71%**. O valor negativo não possui significado físico indicando apenas um excesso de CaO na composição química do cimento em detrimento dos demais constituintes SiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O₃.


Eng. Rúbens Curti
Supervisor Técnico

São Paulo, 29 de maio de 2014


Geol. Arnaldo Forti Battagin
CREA 0600586647
Chefe do Laboratório

Este documento tem significação restrita e diz respeito tão somente à(s) amostra(s) ensaiada(s). Sua reprodução só poderá ser total e depende da aprovação formal deste Laboratório.

APÊNDICE C - Correlação entre os fatores: Água, Aditivo, Slump Cauê e Slump Holcim

Tabela C1: Resultado do abatimento dos concretos fabricados com cimento Cauê e cimento Holcim em função da dosagem de água e dosagem do aditivo.

Água (L)	Aditivo (g)	Slump Cauê (cm)	Slump Holcim (cm)
8,92	0	11,10	16,30
7,92	46	5,50	7,80
7,56	92	13,50	16,20
7,04	138	20,10	23,80

Tabela C2: Correlações existentes entre o Slump do concreto fabricado com cimento Cauê e cimento Holcim, levando em consideração a quantidade de água e a dosagem do aditivo.

Correlação	Resultado
Água x Aditivo	-0,9760034
Água x Slump (Cauê)	-0,5859068
Água x Slump (Holcim)	-0,4259630
Aditivo x Slump (Cauê)	0,74718809
Aditivo x Slump (Holcim)	0,61022046
Slump Cauê x Slump Holcim	0,98192500

APÊNDICE D - Análise de variância dos concretos

Tabela D1: Análise de variância dos concretos fabricados com cimento Cauê e Holcim.

FV	GL	SQ	QM	FC	Pr > Fc	Influência
Cimento	1	173,361111	173,361111	12,613	0,0005	sig.
Aditivo	3	9913,917100	3304,639033	240,426	0,0000	sig.
Idade	2	2131,333551	1065,666776	77,532	0,0000	sig.
Cimento x Aditivo	3	16,137656	5,379219	0,391	0,7593	ñ sig.
Cimento x Idade	2	19,073726	9,536863	0,694	0,5016	ñ sig.
Aditivo x Idade	6	140,523204	23,420534	1,704	0,1258	ñ sig.
Cimento x Aditivo x Idade	6	19,265607	3,210934	0,234	0,9648	ñ sig.
Erro	120	19,265607	13,744911			
Total corrigido	143	14063,00129				
CV (%)	7,82					
Média geral	47,382778					
Número de observações: 144						

Tabela D2: Valores médios de resistência mecânica para fator cimento

Tratamentos	Médias (MPa)	
Cauê	46,285556	a1
Holcim	48,480000	a2

Tabela D3: Valores médios de resistência mecânica para fator aditivo

Tratamentos	Médias (MPa)	
0	37,261944	a1
0,2%	41,770833	a2
0,4%	52,274167	a3
0,6%	58,224167	a4

Tabela D4: Valores médios de resistência mecânica para fator idade

Tratamentos (dias)	Médias (MPa)	
7	42,892917	a1
14	46,966458	a2
28	52,288958	a3