

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

ALGACIR DA SILVA DIAS FILHO

**ANÁLISES REOLÓGICAS NO ESTADO FRESCO E MECÂNICAS DE CALDAS DE
CIMENTO PORTLAND PRODUZIDAS COM ADITIVOS QUÍMICOS DE ÚLTIMA
GERAÇÃO**

**Alegrete
2015**

ALGACIR DA SILVA DIAS FILHO

**ANÁLISES REOLÓGICAS NO ESTADO FRESCO E MECÂNICAS DE CALDAS DE
CIMENTO PORTLAND PRODUZIDAS COM ADITIVOS QUÍMICOS DE ÚLTIMA
GERAÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia Civil
da Universidade Federal do Pampa, como
requisito parcial para obtenção do Título de
Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Simone Dornelles Venquiaruto

Coorientador: Ederli Marangon

**Alegrete
2015**

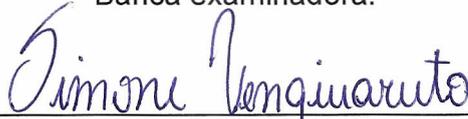
ALGACIR DA SILVA DIAS FILHO

ANÁLISES REOLÓGICAS NO ESTADO FRESCO E MECÂNICAS DE CALDAS DE CIMENTO PORTLAND PRODUZIDAS COM ADITIVOS QUÍMICOS DE ÚLTIMA GERAÇÃO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Civil.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 04 de dezembro de 2015.

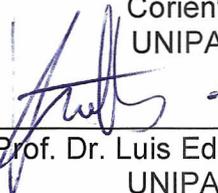
Banca examinadora:



Prof. Msc. Simone Dornelles Venquiaruto
Orientadora
UNIPAMPA



Prof. Dr. Ederli Marangon
Orientador
UNIPAMPA



Prof. Dr. Luis Eduardo Kostas
UNIPAMPA



Msc. Eng. Marcelo de Jesus Dias de Oliveira
UNIPAMPA

Dedico este trabalho aos meus pais, Algacir e Edna, que sempre me apoiaram, ampararam e deram suporte em todos os momentos da minha vida.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por sempre ter me dado coragem para vencer os desafios que me foram propostos.

Agradeço a minha família por toda compreensão, carinho, amor e conforto ao longo da minha vida. Pelo suporte que deram durante todo meu curso. Por sempre apoiarem minhas decisões e me aconselharem quando preciso.

Agradeço a Profa. Simone Venquiaruto, minha orientadora, ao Prof. Ederli Marangon, meu coorientador, pelos ensinamentos passados, pela paciência, pelo apoio e pela dedicação ao longo desse trabalho.

Agradeço ao Eng. Marcelo de Oliveira e a Técnica Raquel Machado por todo auxílio e apoio durante meus ensaios de laboratório, pelas experiências trocadas, pelos ensinamentos e pela paciência que tiveram ao transmiti-los.

Agradeço ao Msc. Eng. Fábio André Vicili pela doação dos aditivos superplastificantes.

Agradeço a colaboração do meu colega e amigo Marco Tulio pelo auxílio durante os ensaios, pelas boas conversas, pelo entusiasmo e companheirismo.

Agradeço aos colegas e amigos que fiz durante minha vida acadêmica, aos bons momentos que passamos juntos e principalmente por terem sido uma família para mim.

Agradeço especialmente aos meus Tios e Irmãos e do Capítulo Alegrete, que involuntariamente e sem conhecimento me ampararam e deram suporte psicológico durante toda minha jornada acadêmica. Agradeço pelos ensinamentos, pelos aprendizados, pelas horas de conversa, pelas brincadeiras, congressos e convivência. Agradeço por me proporcionarem uma evolução intelectual e filosófica e principalmente por terem sido verdadeiros Irmãos.

“Só se pode alcançar um grande
êxito quando nos mantemos fiéis a
nós mesmos”
Friedrich Nietzsche

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo analisar o tempo de vida útil, a compatibilidade, o ponto de saturação e as propriedades mecânicas de três aditivos superplastificantes a base de policarboxilatos em caldas de cimento Portland. Para esse estudo foram confeccionadas caldas com dois tipos de cimento Portland (CP IV e CP II E) e uma relação de água/cimento de 0,35. Foram analisados os comportamentos das caldas em misturas contendo diferentes teores de aditivo. Os teores eram relacionados com o peso de sólidos dos aditivos pelo peso de cimento, variando de 0,2% a 0,8. Foram realizados ensaios de Funil Marsh e Mini abatimento, onde através da curva de saturação (ponto em que o aditivo deixa de proporcionar melhorias e ocorre um decréscimo de fluidez) pode-se analisar a compatibilidade e o ponto de saturação dos aditivos para cada tipo de cimento. As caldas foram analisadas em diferentes tempos de controle, trinta minutos, uma hora, duas horas, três e quatro horas após a mistura, com o objetivo determinar seu tempo de vida útil (quando o aditivo deixa de exercer melhorias plásticas a calda). As características mecânicas foram determinadas através de ensaios de compressão axial e de tração na flexão na flexão para idades de 7 e 28 dias. Após análises dos resultados observa-se que o ponto de saturação para os três aditivos nas misturas com CP IV ficou entre 0,4% e 0,5%. Para as caldas com cimento CP II E o ponto de saturação ficou entre 0,5% e 0,6%. O Aditivo 03 apresentou melhor compatibilidade e vida útil dentre os aditivos analisados, promovendo ganhos de plasticidade até o último período analisado (quatro horas após a mistura). Nos ensaios de resistência à compressão axial o Aditivo 03 apresentou os melhores resultados para ambas as idades de controle (7 e 28 dias). Para os ensaios de tração na flexão na flexão nas 7 e 28 dias os Aditivos 01 e 02 apresentaram as melhores resistências.

Palavras-chave: superplastificante; vida útil; ponto de saturação; resistência; cimento Portland.

ABSTRACT

This paper aims to analyze the lifetime, compatibility, saturation point and the mechanical properties of three polycarboxylate based superplasticisers additives, on Portland cement mixtures. For this study, mixtures with two types of Portland cement (CP IV and CP II E) were prepared and a water/cement ratio of 0.35. The behavior of the samples were analyzed in mixtures containing different additive levels. The levels were related to the solids weight of the additive by weight of cement, ranging from 0.2% to 0.8%. Marsh Funnel and Mini abatimento tests were performed, where through the saturation curve (the point at which the additive fails to provide improvements, and start to decrease the flow) is possible to analyze compatibility and additives saturation point for each type of cement. The mixtures were analyzed at different time control, thirty minutes, one hour, two hours, three and four hours after mixing, in order to determine their useful lifetime (when the additive is no longer providing plastic improvements to the mixture). The mechanical characteristics were determined by axial compressive and tensile tests for 7 and 28 days. After analysis of the results it is noted that the saturation point for both additives in the mixtures with CP IV was between 0.4% and 0.5%. For the mixtures with cement CP II E the saturation point was between 0.5% and 0.6%. The additive 03 showed the best compatibility and lifetime among the analyzed additives, providing plasticity gains until the last reporting period (four hours after mixing). for the axial compressive strength tests, the additive 03 showed the best results for both time control (7 and 28 days). For the tensile tests on 7 and 28 days the additives 01 and 02 showed the best resistance.

Key words: superplasticisers; lifetime; saturation point; strength; Portland cement.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Estrutura Química de um Lignossulfato	18
Figura 2 – Estrutura Química de um Melanina Sulfanato	19
Figura 3 – Estrutura Química de um Naftaleno Sulfanato	19
Figura 4 – Estrutura Química de um Policarboxilato	20
Figura 5 – Misturador Tipo Planetário/ Misturas	26
Figura 6 – Equipamento e Execução do Ensaio.....	27
Figura 7 – Cone de mini abatimento	27
Figura 8 – Execução do Ensaio de Mini abatimento	28
Figura 9 – Execução do Ensaio de Exsudação	30
Figura 10 – Forma e Moldagem do Corpo de Prova	30
Figura 11 – Máquina Universal de Ensaios e Acessórios	31
Figura 12 – Ensaios de Tração na flexão e Compressão axial	32
Figura 13 – Corpo de Prova no Estado Líquido.....	32
Figura 14 – Corpo de Prova após Desmoldagem	33
Figura 15 – Detalhes Interno dos Corpos de Prova	33

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dados Técnicos dos Cimentos	24
Tabela 2 – Dados Técnicos dos Superplastificantes	24
Tabela 2 – Dados do Teor de Sólido dos Superplastificantes	25

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 01 – Resultados do Ensaio de Funil Marsh – CP IV – Aditivo 01	36
Gráfico 02 – Resultados do Ensaio de Funil Marsh – CP II E – Aditivo 01	36
Gráfico 03 – Resultados do Ensaio de Funil Marsh – CP IV – Aditivo 02	37
Gráfico 04 – Detalhe do Ensaio de Funil Marsh CP IV no ponto de Saturação	38
Gráfico 05 – Resultados do Ensaio de Funil Marsh – CP II E – Aditivo 02	38
Gráfico 06 – Resultados do Ensaio de Funil Marsh – CP IV – Aditivo 03	39
Gráfico 07 – Resultados do Ensaio de Funil Marsh – CP II E – Aditivo 03	40
Gráfico 08 – Resultados do Ensaio de Mini abatimento – CP IV – Aditivo 01	41
Gráfico 09 – Resultados do Ensaio de Mini abatimento – CP II E – Aditivo 01	41
Gráfico 10 – Resultados do Ensaio de Mini abatimento – CP IV – Aditivo 02	42
Gráfico 11 – Resultados do Ensaio de Mini abatimento – CP II E – Aditivo 02.....	43
Gráfico 12 – Resultados do Ensaio de Mini abatimento – CP IV – Aditivo 03	43
Gráfico 13 – Resultados do Ensaio de Mini abatimento – CP II E – Aditivo 02.....	43
Gráfico 14 – Índice de Exsudação – CP IV	44
Gráfico 15 – Índice de Exsudação – CP II E	45
Gráfico 16 – Resistência à compressão axial para a idade de controle de 7 dias...	46
Gráfico 17– Resistência à compressão axial para a idade de controle de 28 dias..	46
Gráfico 18 – Resistência à tração na flexão para a idade de controle de 7 dias.	47
Gráfico 19 – Resistência à tração na flexão para a idade de controle de 28 dias...	47
Gráfico 20– Resistência à compressão axial para a idade de controle de 7 dias....	48
Gráfico 21 – Resistência à compressão axial para a idade de controle de 28 dias. 48	
Gráfico 22 – Resistência à tração na flexão para a idade de controle de 7 dias.....	49
Gráfico 23 – Resistência à tração na flexão para a idade de controle de 28 dias ...	49
Gráfico 24 – Comparativo resistência à compressão axial – Aditivo 01 – 7 dias	50
Gráfico 25 – Comparativo resistência à compressão axial – Aditivo 02 – 7 dias	50
Gráfico 26 – Comparativo resistência à compressão axial – Aditivo 03 – 7 dias	51
Gráfico 27 – Comparativo resistência à compressão axial – Aditivo 01 – 28 dias...	51
Gráfico 28 – Comparativo resistência à compressão axial – Aditivo 02 – 28 dias...	52
Gráfico 29– Comparativo resistência à compressão axial – Aditivo 03 – 28 dias....	52
Gráfico 30 – Comparativo resistência à tração na flexão – Aditivo 01 – 7 dias.....	53
Gráfico 31– Comparativo resistência à tração na flexão – Aditivo 02 – 7 dias.....	53

Gráfico 32 – Comparativo resistência à tração na flexão – Aditivo 03 – 7 dias.....	54
Gráfico 33 – Comparativo resistência à tração na flexão – Aditivo 01 – 28 dias.....	54
Gráfico 34 – Comparativo resistência à tração na flexão – Aditivo 02 – 28 dias.....	55
Gráfico 35 – Comparativo resistência à tração na flexão – Aditivo 03 – 28 dias.....	55

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

a/c – Água/Cimento

ABNT - Associação Brasileiras de Normas Técnicas

ACI – Committee on High Strenght Concrete

CAD – Concreto de Alto Desempenho

cm³ - Centímetros cúbicos

cm – Centímetros

dm³ - Decímetro cúbico

Esd – Índice de exsudação

g – gramas

KN – Kilonewton

min- Minutos

mm – milímetros

MPa – Megapascal

NBR – Norma Brasileira

Rpm – Rotações por minuto

s – Segundos

SP- Superplastificante

Vf – Volume final

Vi – Volume inicial

Vs – Volume sólido

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Objetivo Geral	16
1.2	Objetivos Específicos	16
1.3	Justificativa	16
1.4	Limitações da Pesquisa	17
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1	Superplastificantes	18
2.1.1	Superplastificante de Última geração	20
2.2	Áreas de Atuação	21
2.2.1	Concreto de Alta Resistência	21
2.2.2	Concreto Auto-Adensável	21
2.2.3	Concreto de Alto Desempenho	22
3	METODOLOGIA	23
3.1	Caracterização dos Materiais	23
3.1.1	Cimento	23
3.1.2	Água	24
3.1.3	Aditivo Superplastificante	24
3.2	Dosagens e Misturas	24
3.3	Determinação do Índice de Fluidez e Vida Útil	26
3.3.1	Ensaio de Escoamento - Funil Marsh	26
3.3.2	Ensaio de Mini abatimento	27
3.4	Índice de exsudação	29
3.5	Resistência à Compressão Axial e Resistência à Tração na flexão	30
4	CURIOSIDADES DO PONTO DE SATURAÇÃO	32
5	<u>ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS</u>	34
5.1	<u>ENSAIOS REOLÓGICOS NO ESTADO FRESCO</u>	34
5.1.1	<u>Índice de Fluidez e Vida Útil através do Funil Marsh</u>	34
5.1.1.1	<u>Resultados para o Aditivo 01</u>	34
5.1.1.2	<u>Resultados para o Aditivo 02</u>	36
5.1.1.3	<u>Resultados para o Aditivo 03</u>	38
5.1.2	<u>Abatimento e Vida Útil através do Mini abatimento</u>	39
5.1.2.1	<u>Resultados para o Aditivo 01</u>	40

<u>5.1.2.2 Resultados para o Aditivo 02</u>	41
<u>5.1.2.3 Resultados para o Aditivo 03</u>	43
<u>5.1.3 Análise do Índice de Exsudação</u>	44
<u>5.2 ENSAIOS MECÂNICOS</u>	45
<u>5.2.1 Resultados para Resistência à Compressão Axial – CP IV</u>	45
<u>5.2.2 Resultados para Resistência à Tração na flexão – CP IV</u>	47
<u>5.2.3 Resultados para Resistência à Compressão Axial– CP II E</u>	48
<u>5.2.4 Resultados para Resistência à Tração na flexão – CP II E</u>	49
<u>5.2.5 Comparativo entre as resistências à compressão axial</u>	50
<u>5.2.6 Comparativo entre as resistências à tração na flexão</u>	53
<u>6 CONCLUSÕES</u>	56
<u>6.1 Índice de Fluidez</u>	56
<u>6.2 Abatimento da Calda</u>	57
<u>6.3 Índice de Exsudação</u>	57
<u>6.4 Resistência à Compressão Axial</u>	58
<u>6.5 Resistência à Tração na flexão</u>	58
<u>REFERÊNCIAS</u>	59

1 INTRODUÇÃO

Na atualidade uma das principais formas de construir é utilizando concreto. O concreto tem uma produção estimada em 11,5 bilhões de toneladas por ano e sua indústria é considerada a maior consumidora de recursos naturais do mundo (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Com o grande crescimento das cidades, cada vez mais são exigidas novas tecnologias de construção para satisfazer as expectativas das grandes obras. Com isso, surge a necessidade de evolução das técnicas construtivas.

Os concretos que antes eram dosados no próprio canteiro de obra, por pequenas betoneiras ou de forma manual, passaram cada vez mais a serem fabricados em centrais dosadoras e muitas vezes em grandes volumes.

As novas tecnologias têm permitido um constante aperfeiçoamento da produção de concretos. Neste cenário, entram com um papel importante os aditivos químicos e as adições minerais, que servem para melhorar as propriedades do concreto tanto no estado fresco como no endurecido, otimizando sua produção e aumentando sua vida útil.

Com a evolução dos aditivos químicos, por exemplo, foi possível tornar viável o transporte do concreto fresco por quilômetros até o seu destino, sem que ocorressem modificações, perda ou comprometimento de suas propriedades.

No mercado brasileiro existe uma grande diversidade de aditivos para a produção de concretos, com as mais diversas finalidades. Acredita-se que boa parte dos concretos produzidos para obras de grande porte fazem uso de algum tipo de aditivo químico. No entanto, a maioria dos produtos quando analisados na prática não apresentam o desempenho informado pelo fabricante, seja por incompatibilidade com o tipo de cimento ou por influência das condições climáticas onde a obra está sendo construída.

A escolha de aditivos superplastificantes se justifica pelo fato de serem muito utilizados para a produção de concretos de autodesempenho, concretos bombeados, caldas de cimento para proteção, entre outros.

A estrutura do trabalho está organizada em 6 capítulos. O primeiro capítulo apresenta uma introdução sobre o assunto, expõem os objetivos e limitações do trabalho. O segundo capítulo aborda uma revisão bibliográfica sobre o tema (materiais, contextualização histórica e a atualidade). O terceiro capítulo discorre

sobre a metodologia, o programa experimental e os ensaios que foram realizados. O quarto capítulo expõem curiosidades sobre o ponto de saturação. O quinto capítulo apresenta a análise e discussão dos resultados e o capítulo seis trata sobre as conclusões do trabalho.

1.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo o estudo da influência de três superplastificantes de última geração nas propriedades reológicas de caldas de cimento Portland no estado fresco e em suas propriedades no estado endurecido.

1.2 Objetivos Específicos

Como objetivos secundários citam-se:

- Avaliar a vida útil e o ponto de saturação de caldas de cimento Portland através dos métodos: Funil de Marsh e Mini abatimento.
- Analisar a compatibilidade dos aditivos com os tipos de cimento.
- Verificar a exsudação de caldas de cimento Portland em função da variação dos teores de aditivos;
- Analisar as propriedades mecânicas (resistência a compressão axial e resistência à tração na flexão na flexão) de caldas de cimento Portland nas idades de controle de 7 e 28 dias.

1.3 Justificativa

Alguns aditivos superplastificantes podem apresentar problemas como a perda acentuada de fluidez e enrijecimento precoce do concreto. Quando excessivos teores de aditivos são utilizados, estes problemas passam a ser mais frequentes, acarretando além de problemas técnicos, aumento do custo do concreto.

Conforme exposto, a determinação do teor ótimo de aditivo utilizado, o tempo de vida útil e o seu comportamento em misturas com diferentes tipos de cimento é essencial para que problemas relacionados com a dosagem possam ser solucionados ou amenizados.

1.4 Limitações da Pesquisa

Como fatores limitantes da pesquisa, enumera-se:

- Tipos de cimento;
- Relação água/cimento;
- Tempo de mistura da calda;
- Controle da fluidez em relação ao tempo (frequência do ensaio);
- Temperatura ambiente de ensaios;

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O capítulo abordará o conceito de superplastificantes, propriedades, composição e aplicações.

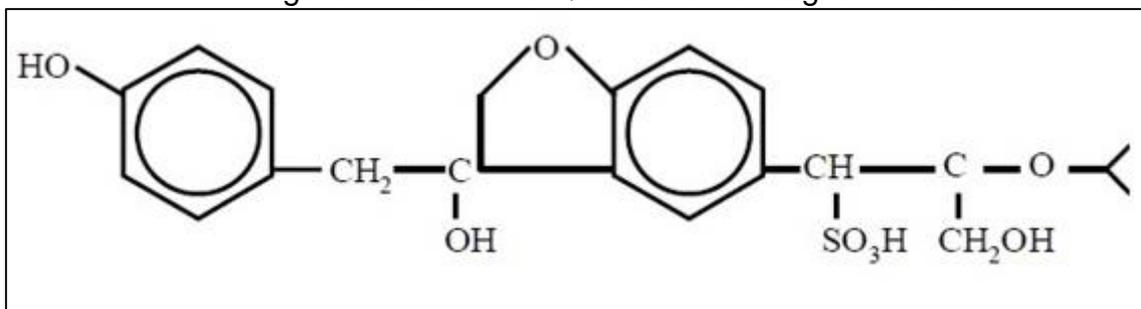
2.1 Superplastificantes

Em meados da década de 60, no Japão e na Alemanha, os superplastificantes começaram a ser utilizados, porém, foi durante os anos 80 que suas dosagens começaram a ser aumentadas e percebeu-se que eles eram excelentes redutores de água (AÏTCIN, 1998).

Os superplastificantes são considerados uma categoria especial de agentes redutores de água, são formulados a partir de materiais que permitem reduções de água muito superiores e trabalhabilidade extrema dos concretos aonde são incorporados (GOMES; BARROS, 2009).

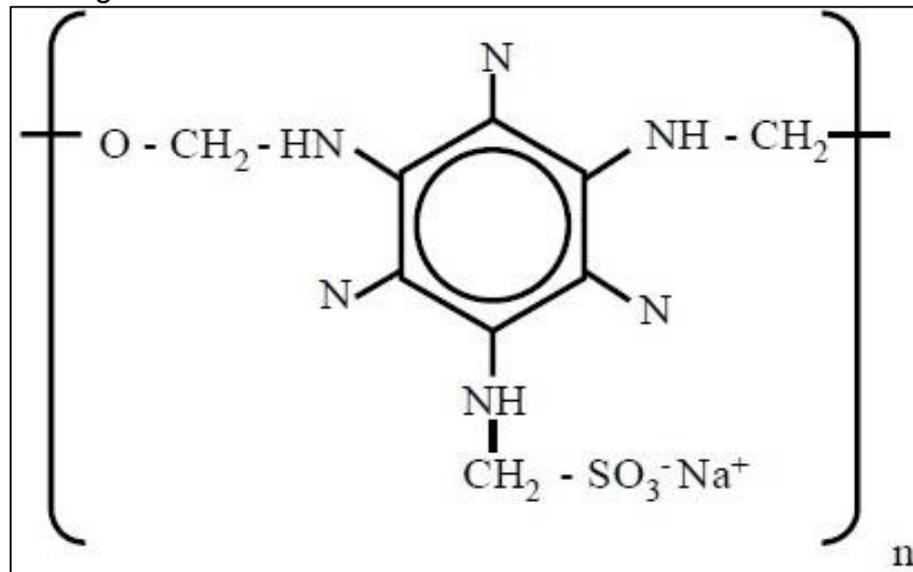
Os lignossulfatos são aditivos conhecidos como, superplastificantes de primeira geração. Estes, reduzem de 8 a 12% a relação a/c da mistura, já os superplastificantes de segunda geração, a base de melanina sulfanato e naftaleno sulfanato, reduzem a relação a/c em até 25%. Os hiperplastificantes, superplastificantes de terceira geração, a base de policarboxilatos, chegam a reduzir a relação a/c da água de amassamento em até 40% (HARTMANN, 2003). As Figuras 1, 2 e 3 apresentam a estrutura molecular dos aditivos a base de lignossulfatos, melanina sulfanato e naftaleno sulfanato, respectivamente.

Figura 1 – Estrutura Química de um Lignossulfato



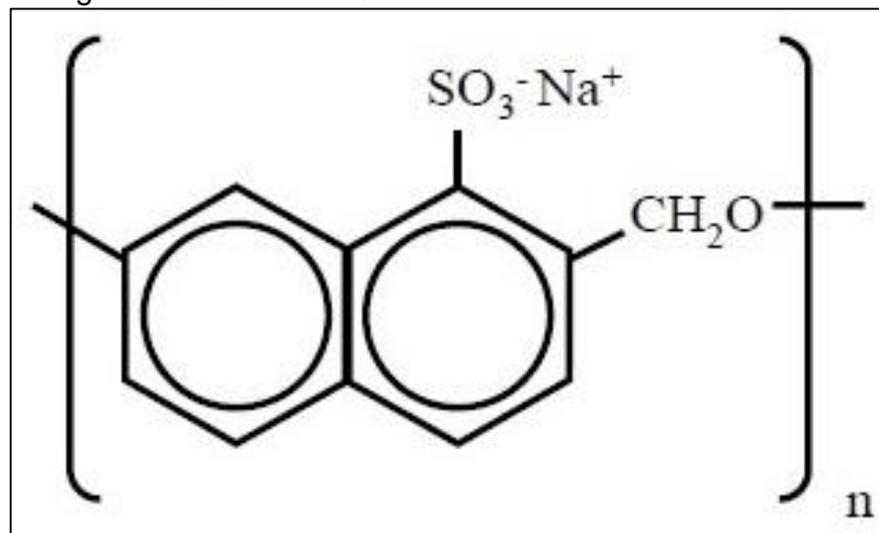
Fonte: Roncero (2000, p.7)

Figura 2 – Estrutura Química de um Melanina Sulfonato



Fonte: Roncero (2000, p7)

Figura 3 – Estrutura Química de um Naftaleno Sulfonato

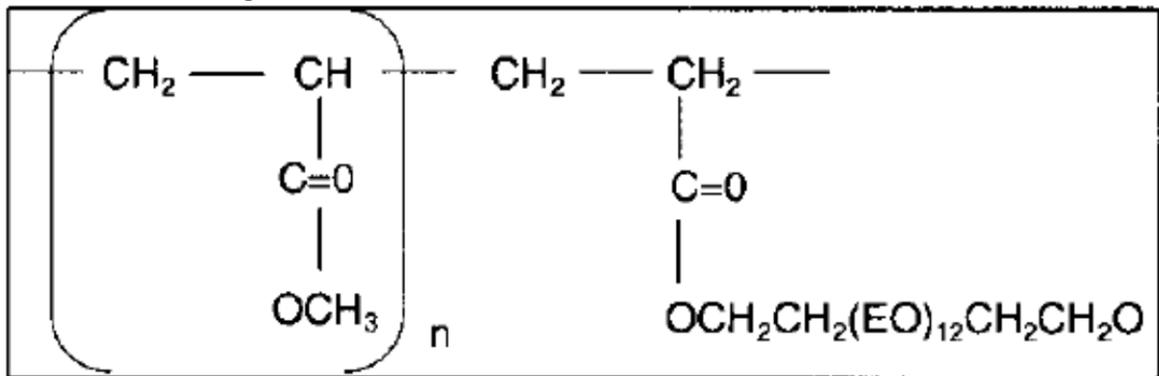


Fonte: Roncero (2000, p.7)

Aditivos superplastificantes a base de policarboxilatos são os mais utilizados, pois melhoram sensivelmente a dispersão das partículas de cimento quando comparados aos aditivos de primeira e segunda geração (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008). Os aditivos a base de lignossulfatos, melanina e naftaleno atuam na mistura principalmente por repulsão eletrostática, esse fenômeno ocasiona o aumento da fluidez e a redução da demanda de água de amassamento. (AÏTCIN, 1998). A repulsão eletrostática é gerada pela absorção das moléculas de superplastificante sobre as partículas de cimento, impedindo a sua floculação. (RONCERO, 2000).

Segundo Hartmann (2003), os aditivos a base de policarboxilatos, além de agirem por repulsão eletrostática agem também por repulsão estérica, que é produzida pela presença de uma longa cadeia lateral ligada à cadeia central do polímero, onde sua estrutura química pode ser observada na Figura 4.

Figura 4 – Estrutura Química de um Policarboxilato



Fonte: Ramachandran (1998 apud Hartmann, p. 3, 2003)

2.1.1 Superplastificantes de Última Geração

Ambos os aditivos utilizados nesse trabalho são à base de polímeros policarboxilatos, aditivos de última geração encontrados no mercado nacional. Dentre suas principais propriedades eles apresentam:

- Grande redução da quantidade de água;
- Rápida dispersão no concreto;
- Boa compatibilidade com aditivos incorporadores de ar;
- Boa estabilização em altas consistências;
- Dosagens mais econômicas.

Os superplastificantes de última geração foram desenvolvidos para proporcionar longo tempo de trabalhabilidade ao concreto, sem acarretar em prejuízos à resistência inicial. Devido à evolução do mecanismo de funcionamento, é possível a produção de concretos com conteúdo de água extremamente baixos e com excelente trabalhabilidade, reduzindo o tempo de mistura, tornando a produção mais rápida e econômica (MC-BAUCHEMIE, 2014).

2.2 Áreas de atuação

Nos itens 2.2.1, 2.2.2 e 2.2.3 foram abordadas e descritas algumas das principais aplicações de superplastificantes no mercado da construção civil.

2.2.1 Concreto de Alta Resistência

O concreto é definido de alta resistência apenas tendo como base a resistência a compressão a uma certa idade. Na década de 70 eram considerados de alta resistência concretos que apresentavam 40 MPa ou mais de resistência a compressão aos 28 dias, antes do advento dos superplastificantes a mistura. Posteriormente, começaram a aparecer no mercado concretos que apresentavam 60 a 120 MPa de resistência a compressão aos 28 dias, isso devido a novas dosagens com superplastificantes. Então, em 2002, o ACI (*Committee on High Strength Concrete*) revisou a definição para concretos de alta resistência, passando agora a concretos que apresentassem mais de 55 MPa aos 28 dias (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

2.2.2 Concreto Auto-Adensável

No decorrer dos anos, com a crescente utilização do concreto, surgiram também manifestações patológicas nas estruturas decorrentes de concretagens. As falhas ocorriam devido à elevada densidade de armadura, inadequação da plasticidade do concreto, entre outros fatores e ocasionaram problemas que afetavam a durabilidade e reduziam a qualidade das construções. Segundo Marangon (2006), objetivando eliminar tais deficiências de concretagem, o concreto auto-adensável foi desenvolvido em 1988.

Os concretos auto-adensáveis surgiram no mercado para atender a demanda da indústria de construção, concretos densamente armados que apresentassem alta resistência. O surgimento dos superplastificantes permitiu alavancar os valores de abatimento da ordem de 200 mm a 250 mm, sem utilizar excessivamente água. Isso gerou um concreto fluido no estado fresco e com alta resistência, sendo muito bem para aplicação de concretos armados (MEHTA; MONTEIRO, 2008)

2.2.3 Concreto de Alto Desempenho

Aïtcin (2000) descreve um concreto de alto desempenho (CAD) sendo essencialmente um concreto que apresente uma relação de água/água/aglomerante baixa. São considerados concretos de alto desempenho as misturas que apresentam alta trabalhabilidade, alta resistência e alta durabilidade, ou seja, “[...] misturas adequadamente proporcionadas e curadas de concreto superplastificado, com relação a/c de 0,4 ou menos, demonstram pouca ou nenhuma permeabilidade, [...]” (Mehta; Monteiro, 2008, p. 493). Ademais, cabe citar que a impermeabilidade é uma das propriedades mais desejadas para a longa durabilidade das estruturas expostas a ambientes corrosivos.

3 METODOLOGIA

Neste capítulo será apresentada a metodologia da pesquisa e os procedimentos que foram adotados para o desenvolvimento do experimento.

Os ensaios realizados nesse trabalho, com o intuito de analisar as propriedades reológicas das caldas de cimento Portland, foram desenvolvidos de acordo com os procedimentos normativos da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). As principais normas técnicas que serviram de embasamento para a pesquisa encontram-se listadas abaixo:

- ABNT NBR 7681-1:2013 – Calda de Cimento para injeção - Requisitos.
- ABNT NBR 7681-2:2013– Calda de Cimento para injeção – Determinação do índice de fluidez e vida útil.
- ABNT NBR 7681-3:2013– Determinação dos índices de exsudação e expansão.
- ABNT NBR 7681-4:2013– Calda de Cimento para injeção – Determinação da resistência à compressão.
- ABNT NBR 7215:1996– Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão.

3.1 Caracterização dos materiais

Este tópico apresenta a caracterização dos materiais utilizados para a produção da calda de cimento Portland.

3.1.1 Cimento

Para confecção das caldas foram utilizados dois tipos de cimento Portland, o CP IV e o CP II E. Os dados de caracterização e composição dos cimentos não foram fornecidos pelos fabricantes, apenas os dados mecânicos e físicos apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Dados técnicos dos cimentos

	3 dias	7 dias	28 dias
Resistência à Compressão (MPa)	≥ 10,0	≥ 20,0	≥ 32,0
Tempo de início de pega (horas)			≥ 1
Tempo de fim de pega (horas)			≤ 12

Fonte: Acervo do autor.

3.1.2 Água

A água utilizada para a produção da calda foi obtida pela rede pública através da concessionária local, potável e tratada, sem agentes agressivos ou contaminações.

3.1.3 Aditivo Superplastificante

Foram utilizados aditivos superplastificantes de última geração a base de polímeros policarboxilatos. Os aditivos foram adquiridos de um mesmo fabricante e diferem entre si na composição química e propriedades.

A Tabela 2 apresenta as informações técnicas dos aditivos superplastificantes que foram utilizados na pesquisa experimental, segundo os dados do fabricante.

Tabela 2 – Dados técnicos dos superplastificantes

Dados Técnicos				
Superplastificantes	Densidade (g/cm ³)	Dosagem recomendada*	Teor de cloretos	Teor de álcalis
Aditivo 01 - MC 2141	1,05	0,2 a 0,5	<0,1	<0,1
Aditivo 02 - MC 2150	1,05	0,2 a 0,5	<0,1	<0,1
Aditivo 03 -MC 3100	1,074	0,2 a 0,5	<0,1	<0,1

Fonte: Adaptado MC-Bauchemie (2014)

* (% sobre o peso do cimento)

3.2 Dosagens e misturas

As caldas de cimento foram executadas com um fator água/cimento constante de 0,35 em um misturador do tipo planetário. As misturas foram confeccionadas com cimentos distintos (CPIV e CPII E) e com diferentes teores de aditivos superplastificantes.

As dosagens dos superplastificantes nas misturas foram determinadas pela variação da relação do teor de sólidos dos aditivos pelo peso do cimento (teores de 0,2% a 0,8%).

O teor de sólidos dos aditivos foi determinado em laboratório por secagem. Os materiais foram acondicionados em estufa com temperatura controlada de aproximadamente 105°C durante uma semana. Esse procedimento foi necessário para que fossem eliminadas as partículas líquidas do aditivo, permanecendo apenas os sólidos.

Diferentemente dos demais aditivos, o Aditivo 02 necessitou permanecer duas semanas na estufa, para que ocorresse a evaporação total das partículas líquidas. Após esse período, ainda apresentou um teor de gordura por cima da camada.

A Tabela 3 apresenta os resultados dos teores de sólidos para os aditivos estudados.

Tabela 3 – Dados do Teor de Sólido dos Superplastificantes

Aditivos	Peso líquido (g)	Peso sólido (g)	Teor de sólidos (%)	Média (%)
Aditivo 1 amostra 1	103,98	29,08	29,97	29,42
Aditivo 1 amostra 2	94,23	29,09	30,87	
Aditivo 2 amostra 1	94,76	38,17	40,28	37,30
Aditivo 2 amostra 2	94,46	32,42	34,32	
Aditivo 3 amostra 1	94,79	29,23	30,84	30,92
Aditivo 3 amostra 2	94,35	29,26	31,01	

Fonte: Acervo do autor

O processo de mistura consiste em inserir o cimento no misturador, acionado a baixa rotação. Posteriormente, é inserido gradualmente a água contendo o aditivo dissolvido, mantendo a rotação baixa por 1 min e 30s. Após esse tempo a rotação é elevada e mantém a calda com o aditivo misturando por mais 3 min e 15s. O processo total de mistura será de 4 min e 45s.

A Figura 5 apresenta o misturador utilizado nos ensaios e algumas das misturas executadas com o Aditivo 01.

Figura 5 – Misturador Tipo Planetário/ Misturas



(a) Misturador do tipo Planetário



(b)Mistura em Execução



(c) Calda de cimento para mistura com 0,2%

Fonte: Acervo do autor

3.3 Determinação do índice de fluidez e vida útil

O índice de fluidez, vida útil e curva de saturação das misturas foram obtidos através dos ensaios descritos nos itens 4.3.1 e 4.3.2.

3.3.1 Ensaio de Escoamento - Funil Marsh

O ensaio estabelece a determinação do índice de fluidez e vida útil pelo método do funil Marsh.

O índice de fluidez é obtido através do tempo (em segundos), que a calda de cimento leva para escoar através do funil Marsh e preencher um recipiente com volume de 1 dm³.

A vida útil é obtida pelo tempo durante o qual a mistura tem ganhos de índice de fluidez. Será analisado o índice de fluidez logo após a mistura, passados 30 minutos, 1 hora, 2 horas, 3 e 4 horas. Para os tempos de análise de 30 minutos, 1, 2, 3 e 4 horas, o material que ficou em repouso passará novamente pelo misturador por mais 30 segundos, apenas para dar homogeneidade à mistura. A Figura 6 apresenta o equipamento de funil Marsh e a execução do ensaio.

Figura 6 – Equipamento e execução do ensaio.



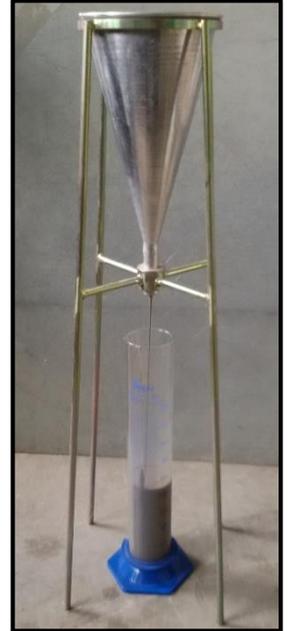
(a) Equipamento -Funil Marsh



(b) Preenchimento do Funil Marsh com calda de cimento



(c) Início do ensaio do Índice de Fulidez – Método Funil de Marsh



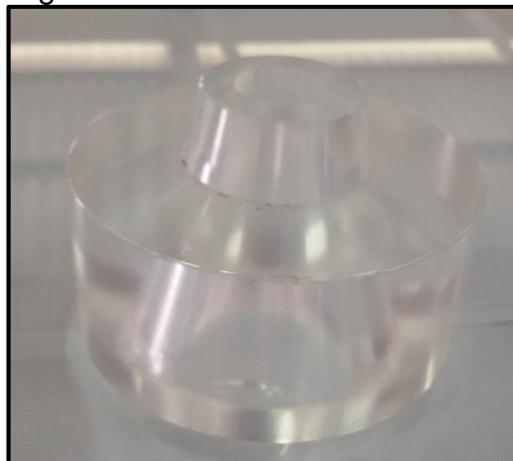
(d) Ensaio do índice de fluidez em andamento

Fonte: acervo do autor

3.3.2 Ensaio de Mini abatimento

Com o ensaio de mini abatimento (Figura 7) é possível verificar o abatimento da pasta, a vida útil e ponto de saturação, permitindo avaliar o efeito da dosagem do superplastificante e determinar a compatibilidade do cimento com o superplastificante. A Figura 7 apresenta um modelo de cone de mini abatimento que foi utilizado para realizar o ensaio de espalhamento.

Figura 7– Cone de Mini Abatimento



Fonte: Acervo do autor.

O ensaio consiste em posicionar o cone de mini abatimento em uma superfície de vidro lisa, limpa e nivelada, preenche-lo com a calda de cimento e içando de maneira que não interfira no escoamento da calda. Após a retirada do tronco mini slump e terminado o espalhamento da calda sobre a superfície, com o auxílio de um paquímetro foram realizadas duas medições perpendiculares para determinar o diâmetro. O espalhamento é determinado através da média dos diâmetros obtidos em mm.

A Figura 8 demonstra a execução do ensaio de abatimento para o tempo de controle de uma hora após a mistura inicial.

Figura 8 – Execução do ensaio de Mini abatimento.



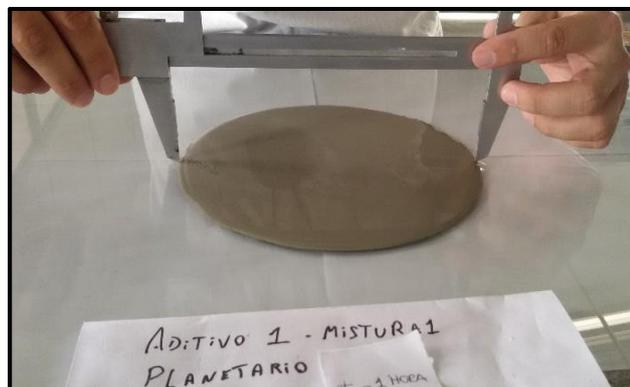
(a) Preenchimento do cone de abatimento



(b) Preenchimento do cone de abatimento



(c) Suspensão do cone para o espalhamento



(d) Medição do diâmetro

Fonte: acervo do autor

3.4 Índice de exsudação

Exsudação é um fenômeno no qual a manifestação externa é o surgimento de água na superfície após o concreto ter sido lançado e adensado, no entanto, isso ocorre antes de sua pega (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Segundo a NBR 7681-3 (ABNT, 2013) o índice de exsudação é obtido a partir do volume de água segregado de uma determinada mistura da calda de cimento em repouso durante um período de 2 horas, tempo esse contado a partir do preparo da calda. Este índice é expresso em porcentagem do volume inicial.

Depois de produzida a calda de cimento a amostra da mistura foi inserida em um recipiente volumétrico, ficando em repouso pelo período descrito na norma. Passadas as 2 horas, foram analisados o volume de água exsudada e o volume de calda de cimento. Com base nesses dados obtém-se o índice de exsudação utilizando-se a seguinte equação:

$$Esd = \frac{V_f - V_s}{V_i} \times 100 \quad \dots (1)$$

Onde:

Esd é o índice de exsudação, expresso em porcentagem.

V_s é o volume sólido, expresso em cm³.

V_f é o volume total da calda mais a água exsudada, expresso em cm³.

V_i é o volume inicial da calda introduzida no recipiente, expresso em cm³.

A Figura 9 mostra o modelo de recipiente graduado utilizado e a execução do ensaio de exsudação para o Aditivo 01 na mistura com 0,2%.

Figura 9 – Execução do Ensaio de Exsudação



(a) Recipiente graduado.
Fonte: VITLAB (2014, não paginado)

Fonte: acervo do autor



(b) Preenchimento do recipiente graduado



(c) Calda em descanso para exsudação

3.5 Resistência à Compressão axial e Resistência à Tração na flexão

Depois de misturados os materiais para a produção da calda de cimento e realizado os ensaios de fluidez, foram moldados corpos de prova para análise da resistência a compressão e resistência a tração na flexão nas idades de controle de 7 e 28 dias. Os corpos de prova foram moldados em formas retangulares, com dimensão de 16cmx4cmx4cm.

Na Figura 10 podem ser observados os moldes e o preparo dos corpos de prova.

Figura 10 – Forma e Moldagem do Corpo de Prova



(a) Forma para moldagem



(b) Moldagem dos corpos de prova



(c) Calda em processo de cura

Fonte: acervo do autor

A calda ficou dentro dos moldes por um período de 24 horas, armazenados em local arejado e fresco, depois foram desmoldados e foram mantidos em cura submersa em um tanque com água até atingirem as idades de controle para serem rompidos, conforme a NBR 72 15. Após o período de cura os corpos de prova foram rompidos utilizando a Máquina Universal de Ensaio Eletromecânica, cuja capacidade máxima é de 200KN.

Foram confeccionados para os ensaios de tração na flexão na flexão três corpos de prova para cada mistura e idade de controle analisada. Após a ruptura do corpo de prova no ensaio de tração na flexão na flexão ele se torna dois corpos de prova para o ensaio de compressão axial, sendo assim foram utilizados para o ensaio de compressão axial seis corpos de prova para cada mistura e cada idade de controle analisada. A Figura 11 apresenta a máquina e os acessórios utilizados para os ensaios de compressão axial e tração na flexão.

Figura 11 – Máquina Universal de Ensaio e Acessórios



(a) Máquina universal de ensaios



(b) Acessório de tração na flexão



(c) Acessório de compressão

Fonte: acervo do autor

A Figura 12 mostra os corpos de prova antes e depois da execução dos ensaios de tração na flexão na flexão e compressão.

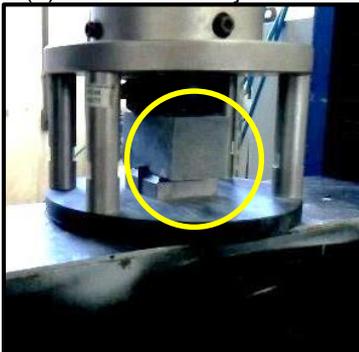
Figura 12 – Ensaio de Tração na flexão e Compressão axial



(a) Ensaio de tração na flexão



(b) Corpo de prova após ensaio



(c) Corpo de prova para ensaio de compressão



(d) Corpo de prova após ensaio de compressão

Fonte: acervo do autor

4 Curiosidades do Ponto de Saturação

Passado um tempo após a moldagem dos corpos de prova notou-se a presença de uma camada de gordura leitosa na superfície dos corpos de prova, isso ocorria em corpos de prova dosados com alto teor de aditivo, para as dosagens de 0,6% e 0,8%. A Figura 13 apresenta um comparativo entre corpos de prova com 0,2%, e 0,8% no estado líquido, para o cimento CP IV com o Aditivo 02.

Figura 13 – Corpo de Prova no Estado Líquido



(a) Mistura com teor de 0,2%



(b) Mistura com teor de 0,8%



(c) Detalhe da mistura com teor de 0,8%

Fonte: Acervo do autor

A superfície de gordura leitosa ainda era presente após o período de 24 horas em que os corpos de prova ficavam na forma. Na Figura 14 é possível ver a gordura nos corpos depois de desmoldados, para misturas com o Aditivo 02 e 0,8% do teor com cimento CP IV e cimento CP II E.

Figura 14 – Corpo de Prova após desmoldagem



(a) Teor 0,8% com CP IV
Fonte: acervo do autor

(b) Teor 0,8% com CP II E

Após a ruptura por tração na flexão também foi possível perceber diferenças entre as colorações internas dos corpos de prova.

A Figura 15 apresenta detalhes internos dos corpos de prova para misturas com o Aditivo 01 e os teores de 0,2%, 0,4%, 0,5%, 0,6% e 0,8% respectivamente.

Figura 15 – Detalhes Internos (alteração de tonalidade) dos Corpos de Prova



Corpo de Prova após ruptura
0,2%



Corpo de Prova após
ruptura 0,4%



Corpo de Prova após
ruptura 0,5%



Corpo de Prova após ruptura
0,6%

Fonte: Acervo do autor.



Corpo de Prova após
ruptura 0,8%

5 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo foram apresentados os resultados obtidos nos ensaios reológicos e de durabilidade, bem como a discussão e análise dos mesmos.

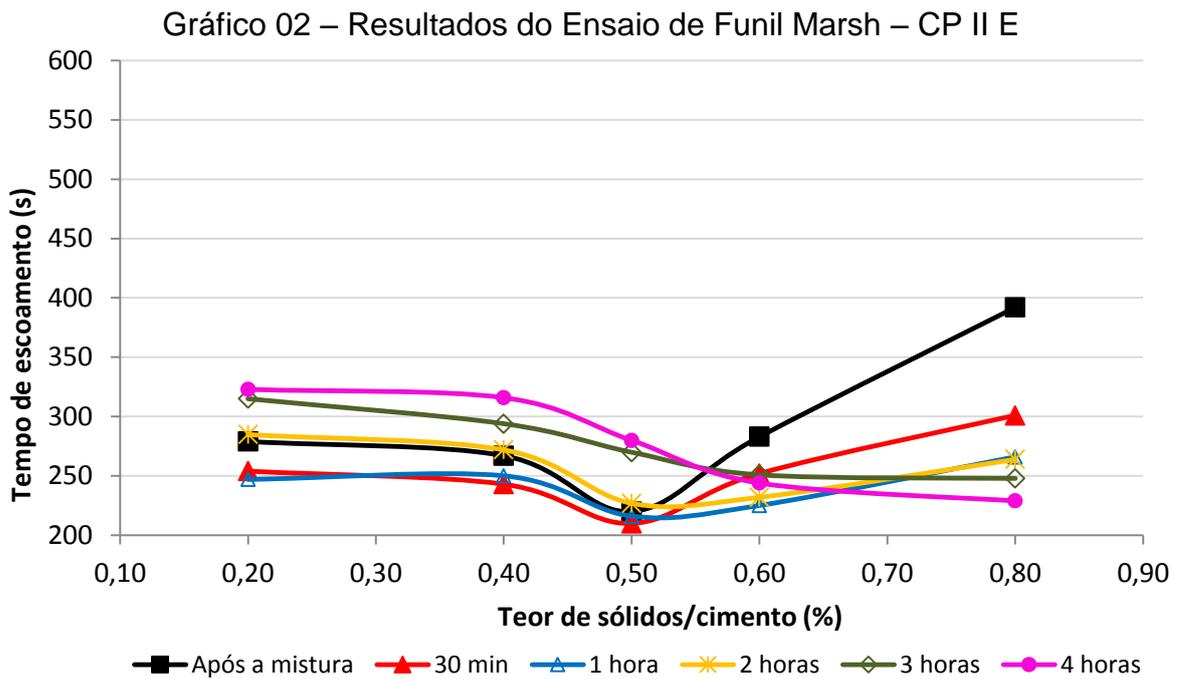
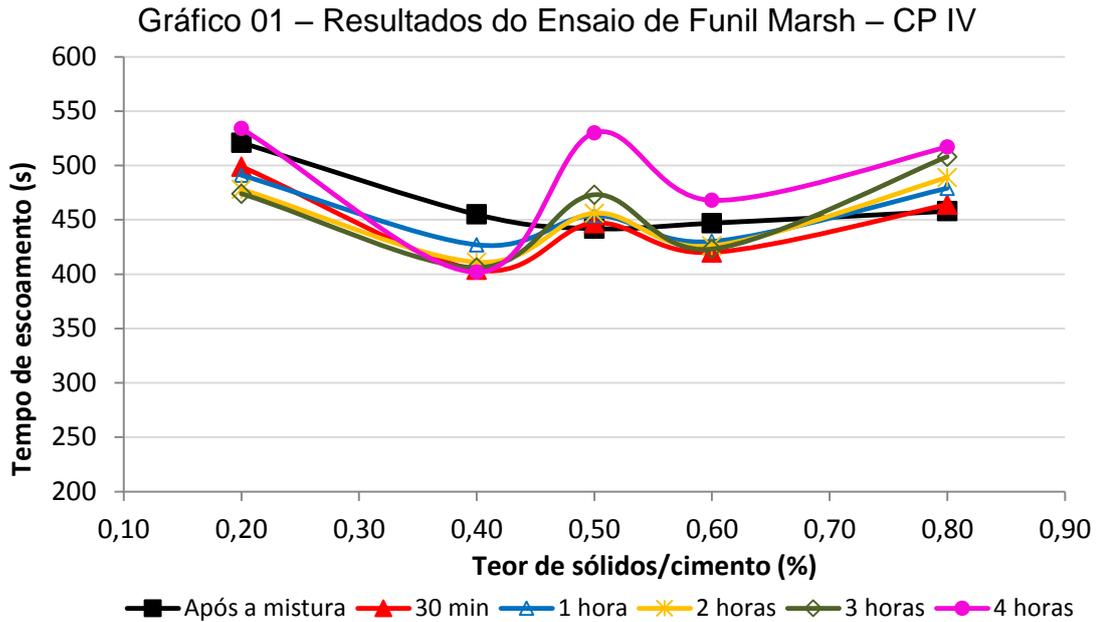
5.1 ENSAIOS REOLÓGICOS NO ESTADO FRESCO

5.1.1 Índice de Fluidiez e Vida Útil através do Funil Marsh

O ensaio foi realizado conforme descrito no item 3.3.1 utilizando o Funil Marsh. Os resultados apresentados nos próximos itens relacionam o tempo de escoamento (em segundo (s)) pela porcentagem do teor de sólidos do aditivo por peso de cimento, e referem-se às misturas com cimentos CP IV e CP II E.

5.1.1.1 Resultados para o Aditivo 01

Os Gráficos 1 e 2 expõem os resultados do Aditivo 01 para os cimentos CP IV e CP II E, respectivamente.



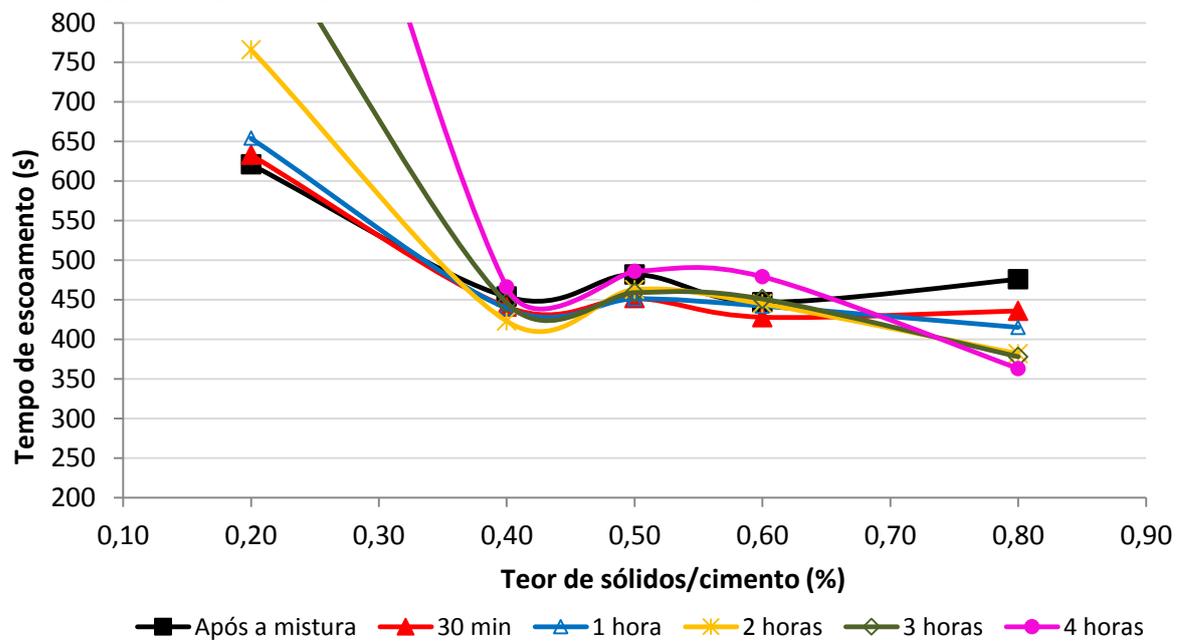
De acordo os Gráfico 1 e 2, observa-se que o Aditivo 01 apresenta melhor desempenho de fluidez para o cimento CP II E. O ponto de saturação, expresso através da curva de saturação, para o cimento CP IV ficou determinado em 0,4% (teor onde se obteve o menor tempo de escoamento no ensaio de Funil Marsh). Para o cimento CP II E (Gráfico 2), o ponto de saturação ficou estabelecido em 0,5%.

Analisando o tempo de vida útil do Aditivo 01 no ponto de saturação (teor de 0,4%), para o cimento CP IV, observa-se que as misturas apresentam aproximadamente o mesmo tempo de escoamento até quatro horas após a mistura. Para as misturas com cimento CP II E (Gráfico 2), o aditivo apresentou um período de vida útil de aproximadamente duas horas no ponto de saturação (teor de 0,5%), após esse período observou-se perda de fluidez das caldas.

5.1.1.2 Resultados para o Aditivo 02

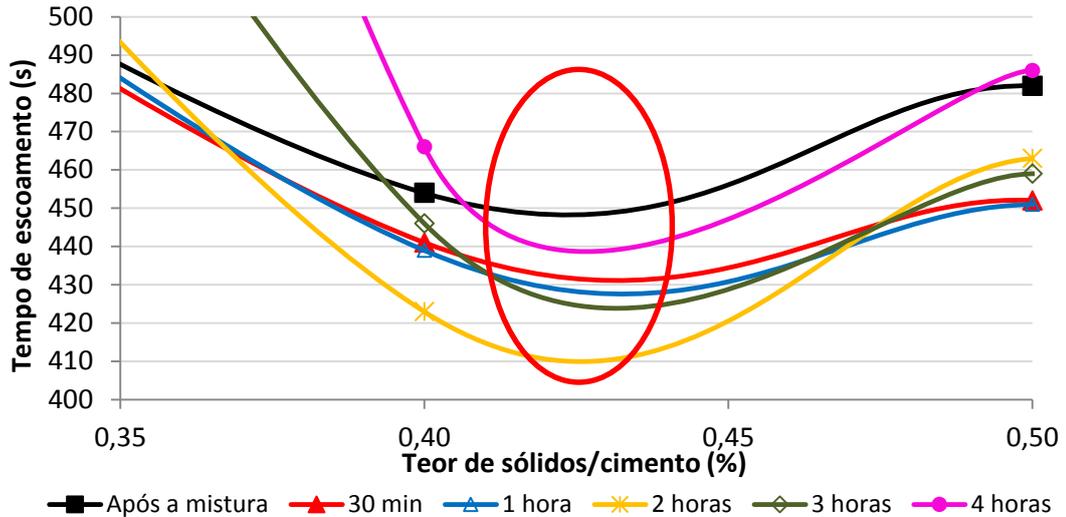
Os Gráficos 3 e 5 expõem os resultados do Aditivo 02 para os cimentos CP IV e CP II E, respectivamente. O Gráfico 4 apresenta um detalhe do Ensaio de Funil Marsh no ponto de Saturação.

Gráfico 03 – Resultados do Ensaio de Funil Marsh – CP IV



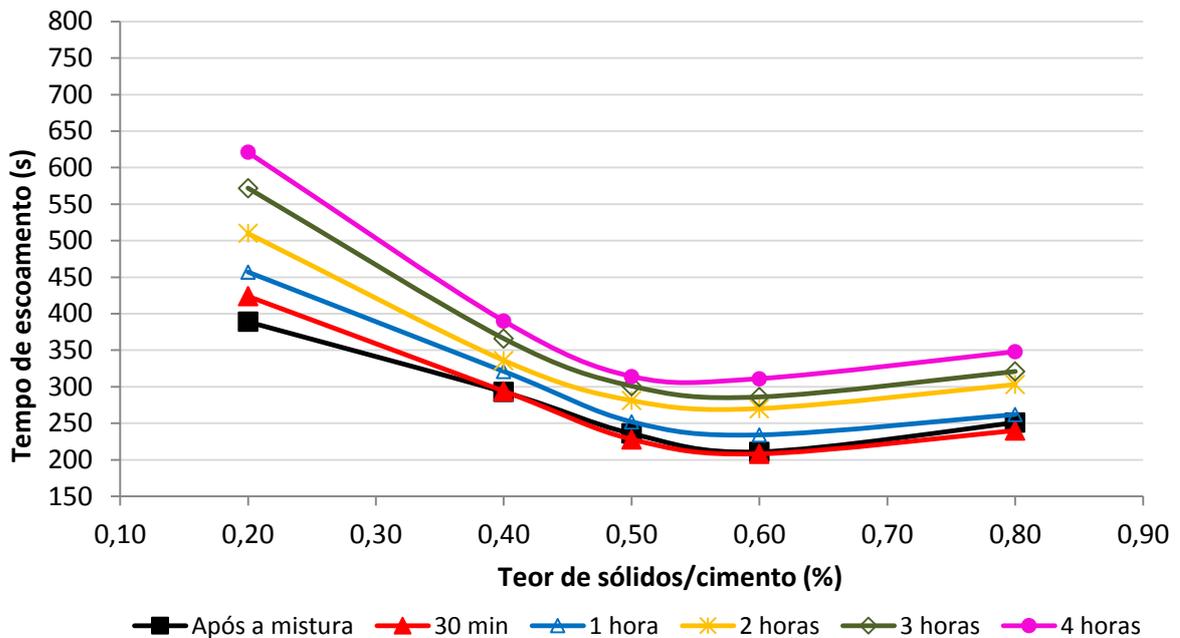
Fonte: própria autoria

Gráfico 04 – Detalhe do Ensaio de Funil Marsh CP IV no ponto de Saturação



Fonte: própria autoria

Gráfico 05 – Resultados do Ensaio de Funil Marsh – CP II E



Fonte: própria autoria

A análise dos Gráficos 3 e 5 mostra que o Aditivo 02 apresentou melhor desempenho de fluidez com o cimento CP II E. O ponto de saturação expresso através da curva de saturação para o cimento CP IV ficou entre os teores de 0,4% e 0,5%, já para o cimento CP II E em torno de 0,6% do teor de sólidos.

Para o cimento CP IV, considerando o teor de saturação de 0,2%, observa-se que os tempos de escoamento de três e quatro horas ultrapassaram 15 minutos. A leitura para o tempo de quatro horas não pode ser concluída, pois após 20 minutos a

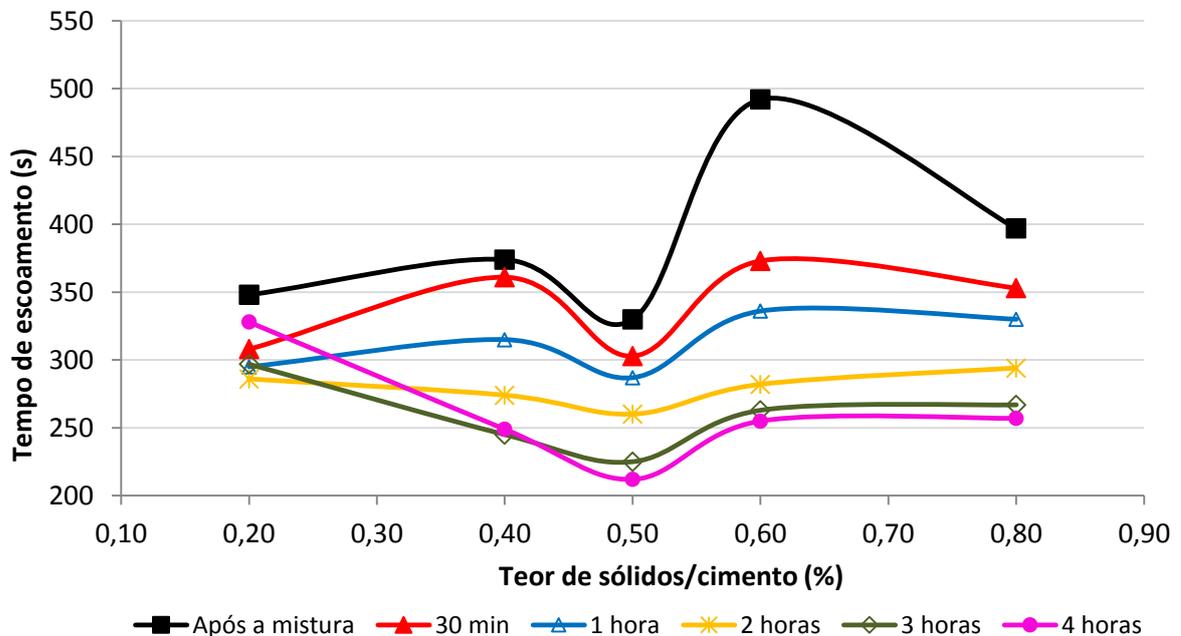
calda não escoou no funil. Também se observa no Gráfico 3 um novo ganho de fluidez para o teor de 0,8%, acredita-se que esse resultado pode ser sido influenciado pela oscilação de temperatura observada durante os ensaios (variação 7°C e 8°C, aproximadamente).

Com relação ao tempo de vida útil do Aditivo 02 confeccionado com cimento CP IV (Gráfico 03), verifica-se que para o ponto de saturação determinado (entre 0,4% e 0,5% do teor de sólidos), as caldas tendem a manter a fluidez aproximadamente por até duas horas após a mistura. Para as caldas confeccionadas com cimento CP II E observa-se que no ponto de saturação (0,6% do teor de sólidos), a vida útil do aditivo (tempo de escoamento) se mantém aproximadamente entre 30 minutos e uma hora após esse período inicia o processo de perda de fluidez.

5.1.1.3 Resultados para o Aditivo 03

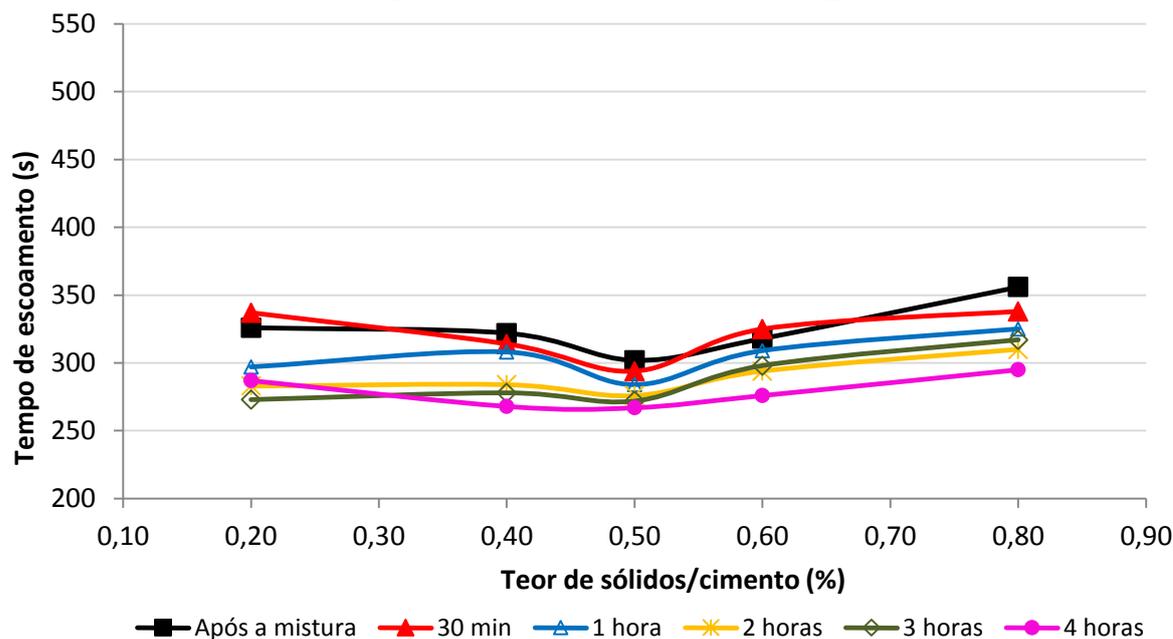
Os Gráficos 6 e 7 expõem os resultados do Aditivo 03 para os cimentos CP IV e CP II E, respectivamente.

Gráfico 06 – Resultados do Ensaio de Funil Marsh – CP IV



Fonte: própria autoria

Gráfico 07 – Resultados do Ensaio de Funil Marsh – CP II E



Fonte: própria autoria

Analisando os Gráfico 6 e 7 verifica-se que o Aditivo 03 apresenta melhor desempenho de fluidez para as misturas com o cimento CP II E. O ponto de saturação expresso através da curva de saturação para ambos os cimentos, CP IV e CP II E, permaneceu em 0,5% do teor de sólidos/cimento (teor onde foram observados os menos tempos de escoamento pelo método do Funil Marsh). Para os ensaios com cimento CP IV observou-se variações de temperatura durante a execução do ensaio, fato que pode explicar a maior dispersão dos resultados (Gráfico 06).

A análise gráfica também mostra que em geral, o tempo de escoamento do Aditivo 03 para os dois tipos de cimento manteve-se decrescente até aproximadamente quatro horas após a mistura. Esses resultados indicam que o aditivo apresenta maior vida útil, uma vez que as caldas permaneceram plásticas por um período de tempo significativo.

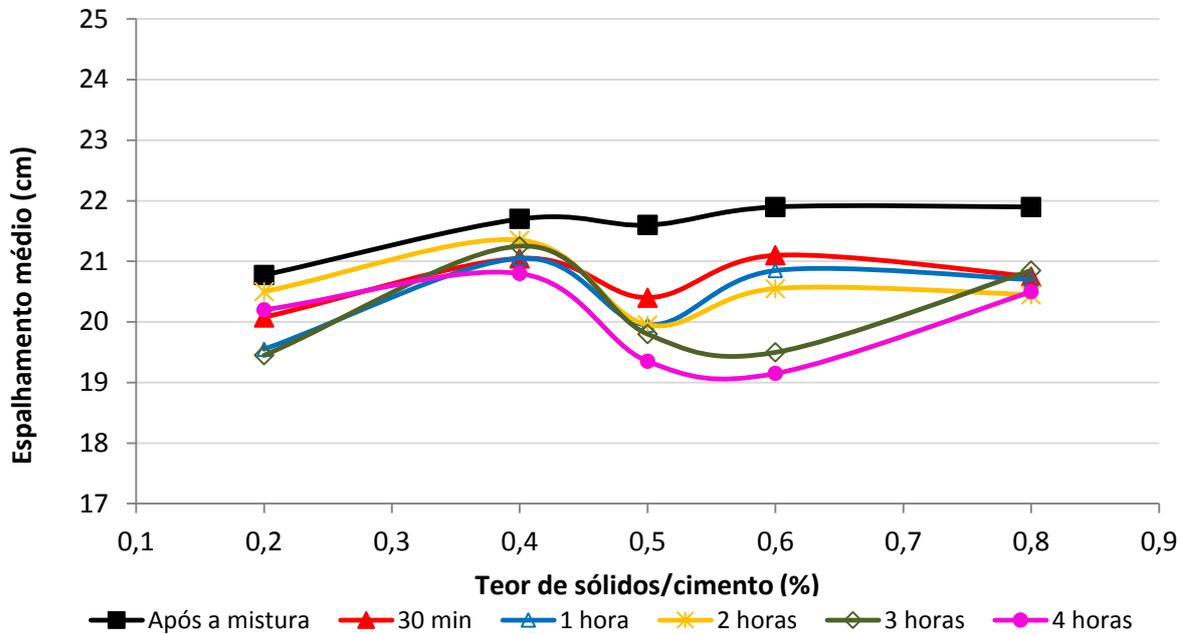
5.1.2 Abatimento e Vida Útil através do Mini abatimento

O ensaio foi realizado conforme os procedimentos descritos no item 3.3.2 utilizando o equipamento cone de mini abatimento. Os resultados apresentados nesse item relacionam o diâmetro médio (cm) do espalhamento das caldas confeccionadas com cimento CP IV e CP II E pela porcentagem do teor de sólidos do aditivo por peso de cimento.

5.1.2.1 Resultados para o Aditivo 01

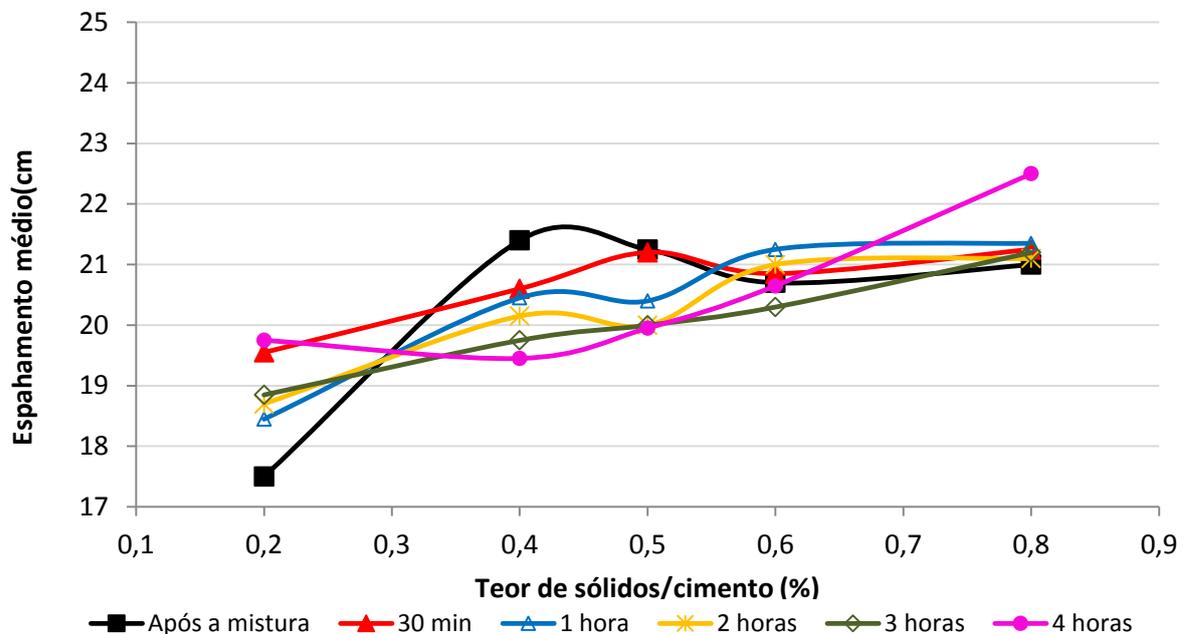
Os Gráficos 8 e 9 expõem os resultados do Aditivo 01 para os cimentos CP IV e CP II E, respectivamente.

Gráfico 08 – Resultados do Ensaio de Mini abatimento – CP IV



Fonte: própria autoria

Gráfico 09 – Resultados do Ensaio de Mini abatimento – CP II E



Fonte: própria autoria

A análise dos Gráfico 7 e 8 mostram que o Aditivo 01 tem melhor desempenho de fluidez com o cimento CP IV. O ponto de saturação para o cimento CP IV fica no teor de 0,4% (teor que imprimiu maior espalhamento às misturas). Para o cimento CP

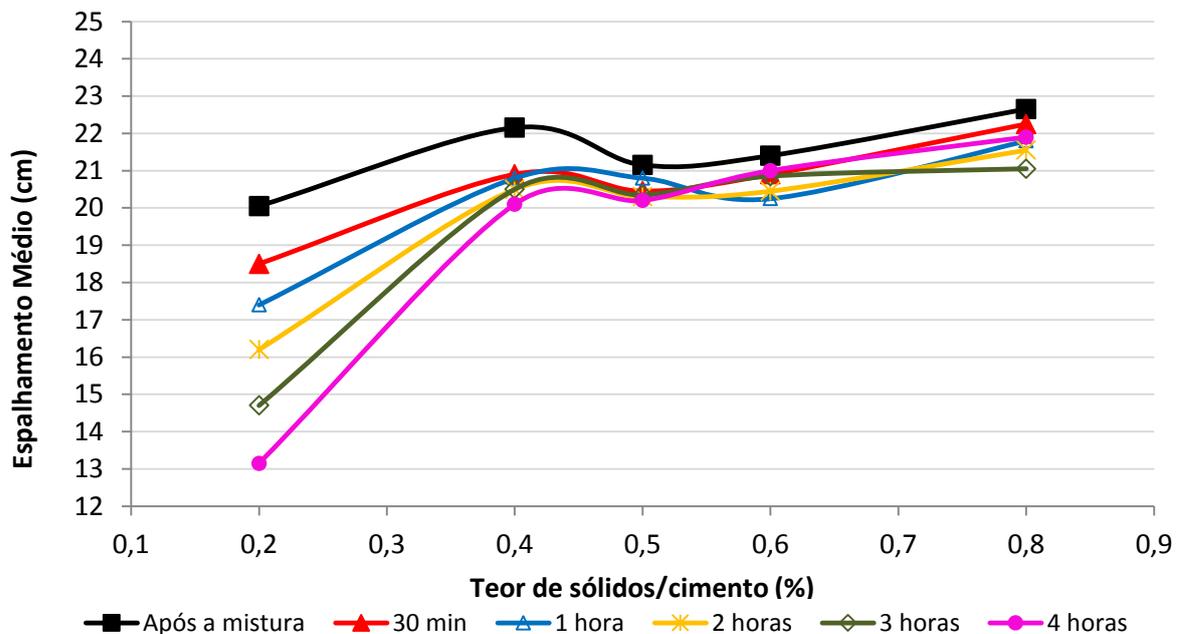
II E a curva de saturação não ficou muito clara, visto que o aumento dos teores implicou em um ganho de abatimento.

Ainda analisando os gráficos 8 e 9 pode-se observar que o tempo de vida útil do Aditivo 01, para o cimento CP IV no ponto de saturação (0,4%), tende a se manter por aproximadamente duas horas após a confecção da mistura inicial. Para o cimento CP II E a perda de vida útil do aditivo (redução do espalhamento da calda pelo método do mini slump) foi observada 30 minutos após a mistura.

5.1.2.2 Resultados para o Aditivo 02

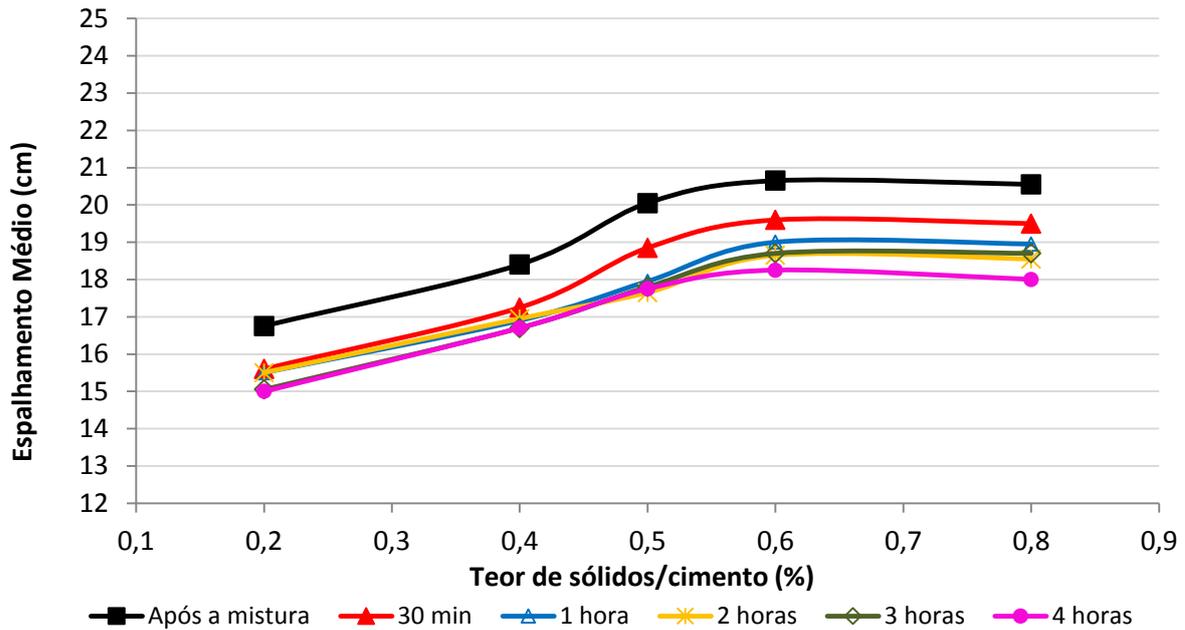
Os Gráficos 10 e 11 expõem os resultados do Aditivo 02 para as misturas confeccionadas com os cimentos CP IV e CP II E, respectivamente.

Gráfico 10 – Resultados do Ensaio de Mini abatimento – CP IV



Fonte: própria autoria

Gráfico 11 – Resultados do Ensaio de Mini abatimento – CP II E



Fonte: própria autoria

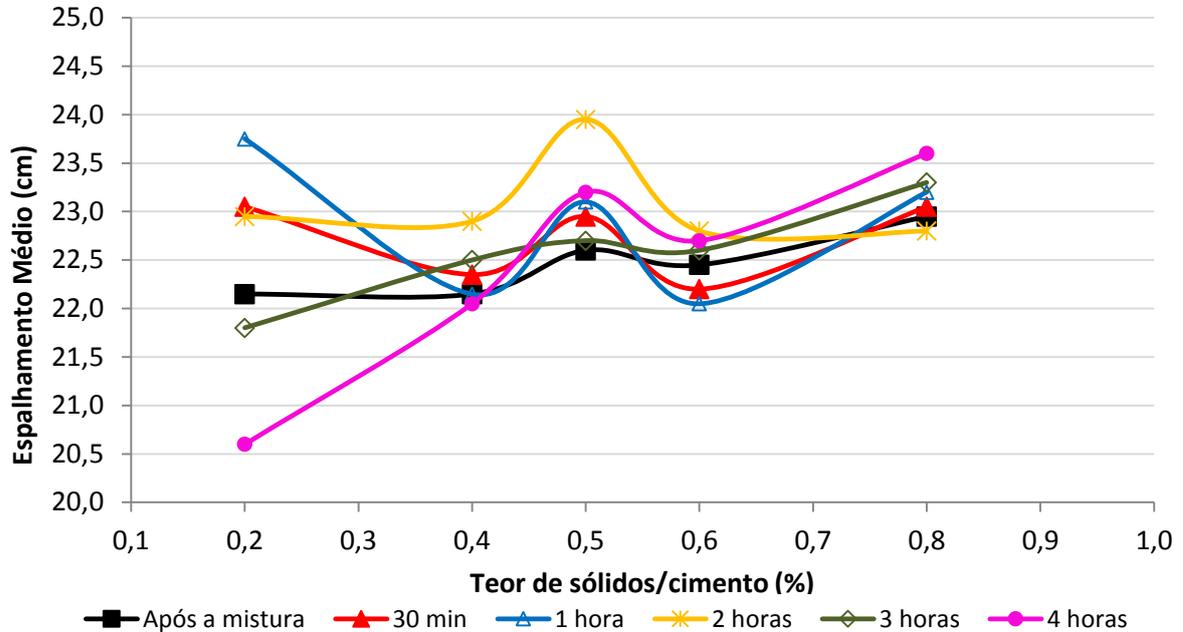
Os Gráficos 10 e 11 mostram o espalhamento médio das caldas de cimento em função da variação do teor de sólidos do Aditivo 02 por peso de cimento. Para as misturas com cimento CP IV o melhor desempenho de fluidez (ponto de saturação) foi observado para a mistura com 0,4% do teor de sólidos por peso de cimento. Para as misturas confeccionadas com cimento CP II E, o ponto de saturação ficou estabelecido entre os teores de 0,6% e 0,8%.

A análise dos gráficos também permite concluir que no ponto de saturação, o tempo de vida útil do Aditivo 02, para as misturas confeccionadas com cimento CP IV se encontra entre 1 e 3 horas após a elaboração da mistura. As caldas confeccionadas com o cimento CP II E não apresentaram uma vida útil satisfatória, visto que logo após a mistura, já apresentaram uma tendência de perda de abatimento.

5.1.2.3 Resultados para o Aditivo 03

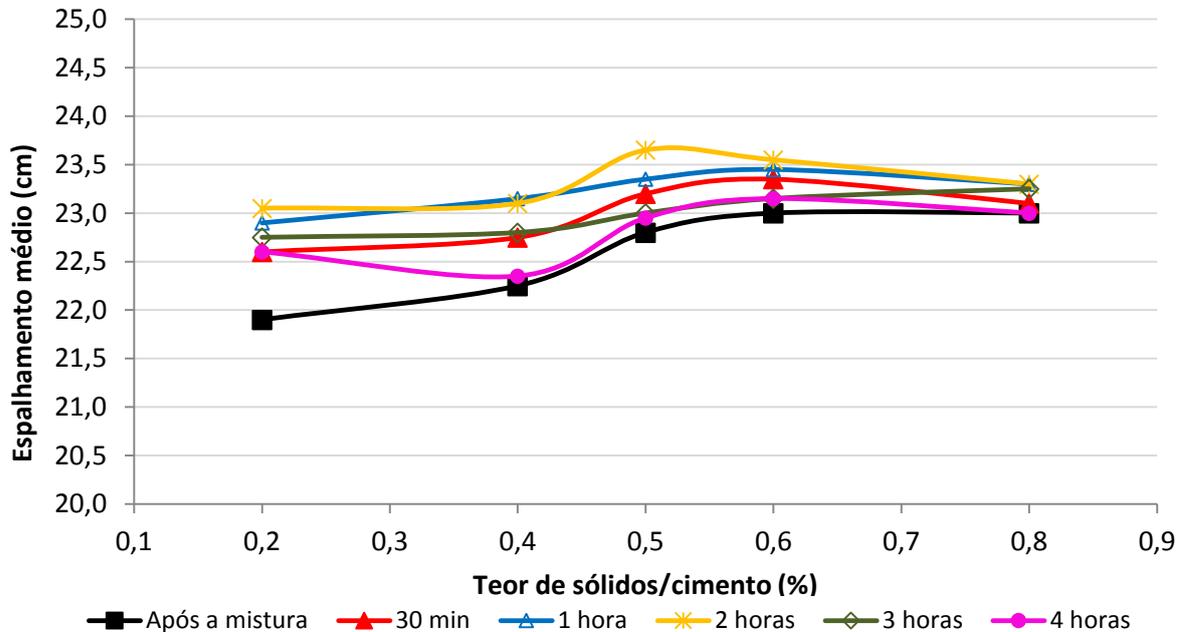
Os Gráficos 12 e 13 expõem os resultados do Aditivo 03 para os cimentos CP IV e CP II E, respectivamente.

Gráfico 12 – Resultados do Ensaio de Mini abatimento – CP IV



Fonte: própria autoria

Gráfico 13 – Resultados do Ensaio de Mini abatimento – CP II E



Fonte: própria autoria

Analisando os Gráficos 12 e 13 pode-se observar que o Aditivo 03 apresentou melhor desempenho de fluidez com o cimento CP IV, sendo que o ponto de saturação

ficou estabelecido em 0,5% do teor de sólidos/cimento. Para o cimento CP II E o ponto de saturação permaneceu entre os teores de 0,5% e 0,6%.

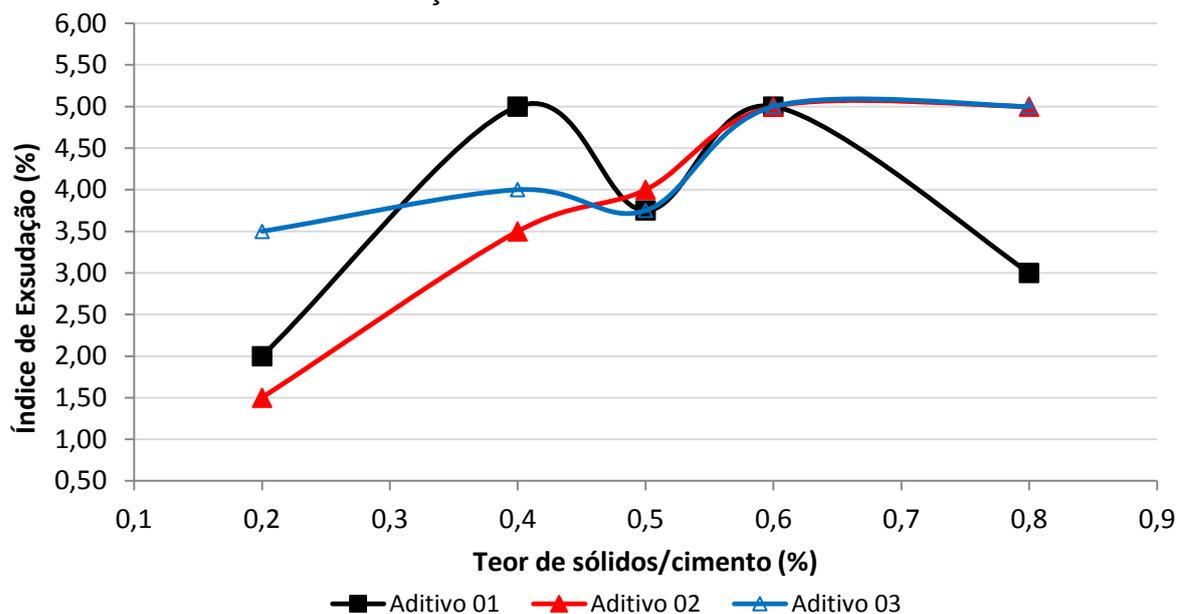
Com relação ao tempo de vida útil do Aditivo 03 no ponto de saturação, para ambos os cimentos (CP IV e CP II E) que a perda de abatimento inicia aproximadamente após duas.

5.1.3 Análise do Índice de Exsudação

O ensaio foi realizado conforme descrito no item 3.4. Os resultados apresentados a seguir relacionam o índice de exsudação (%) pela porcentagem do teor de sólidos do aditivo por peso de cimento, e referem-se às misturas para os três aditivos investigados, alternando o cimento utilizado.

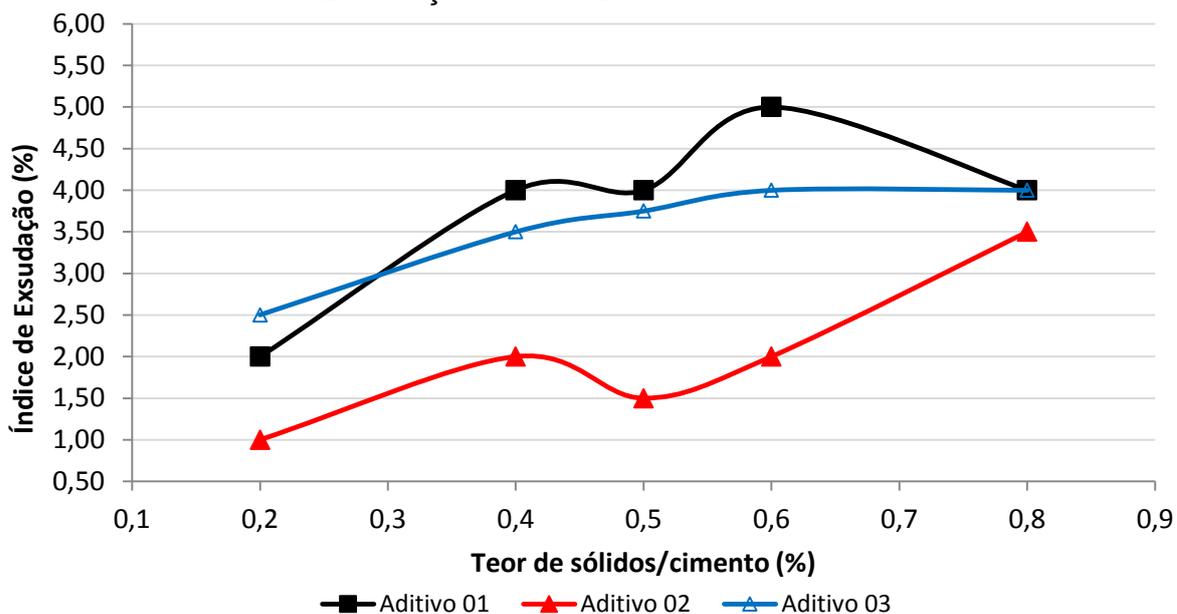
Os Gráficos 14 e 15 expõem os resultados dos Aditivos investigados para os cimentos CP IV e CP II E, respectivamente.

Gráfico 14 – índice de Exsudação – CP IV



Fonte: própria autoria

Gráfico 15 – Índice de Exsudação – CP II E



Fonte: própria autoria

Com base nos Gráfico 14 e 15 pode-se observar que o Aditivo 02 apresenta menor exsudação para ambos os cimentos até uma dosagem de 0,4%. Para dosagens superiores a esse teor apenas o cimento CP II E continuou mantendo uma exsudação baixa. Para as misturas com cimento CP IV, é possível verificar uma proximidade nos índices de exsudação dos aditivos investigados no ponto de 0,5%. Para teores de 0,8% essa tendência se manteve somente para as misturas confeccionadas com os aditivos 02 e 03.

5.2 ENSAIOS MECÂNICOS

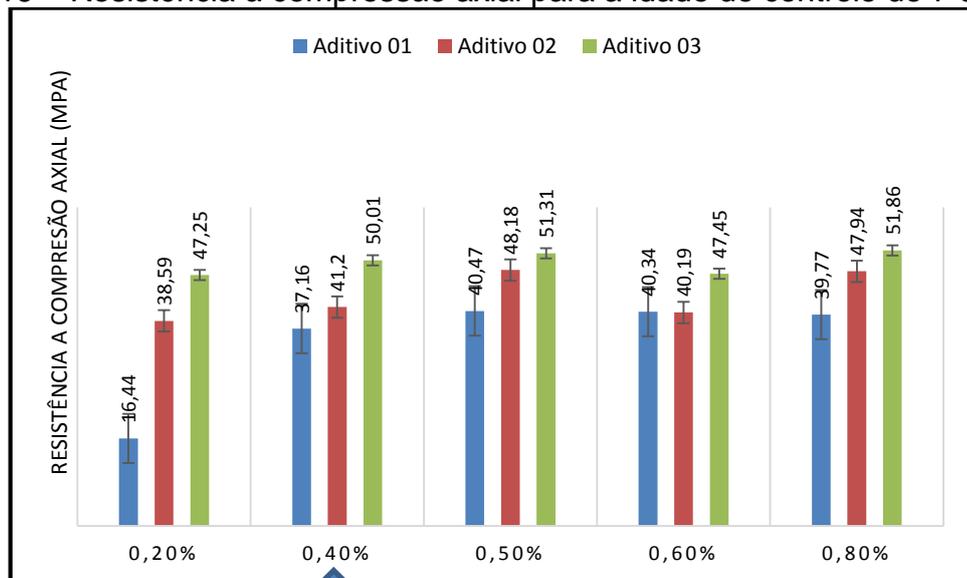
O processo de mistura para a confecção dos corpos de provas foi realizado conforme descrito no item 3.2 e a moldagem, cura e realização dos ensaios está em conformidade com item 3.5.

Os resultados apresentados nos próximos itens são referentes aos ensaios de compressão e tração na flexão para os cimentos CP II E e CP IV nas idades de controle de 7 e 28 dias, comparando os três aditivos com os diferentes teores de dosagem.

5.2.1 Resultados para Resistência à Compressão Axial – CP IV

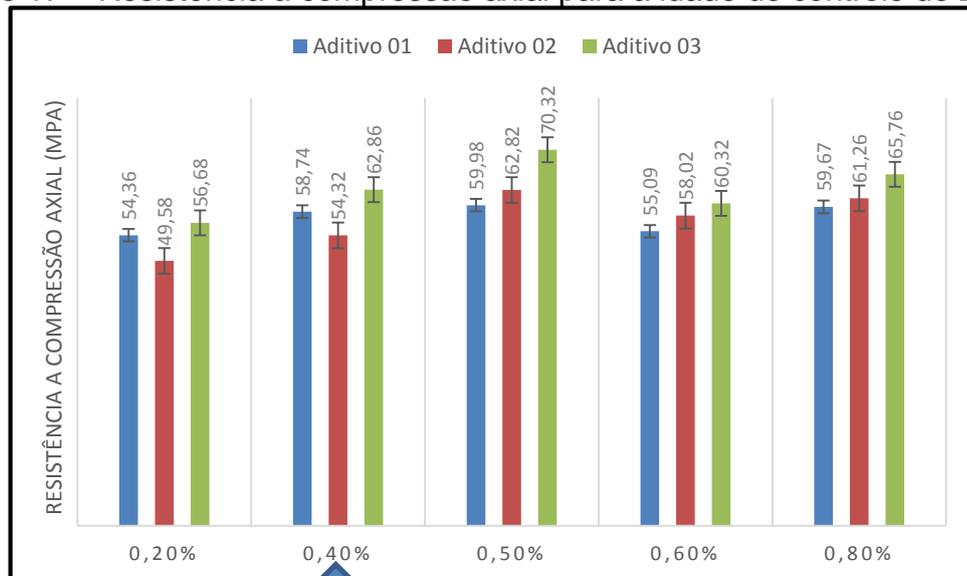
Os Gráficos 16 e 17 expõem a média dos resultados dos ensaios de resistência à compressão axial para as misturas com cimento CP IV nas idades de controle de 7 e 28 dias, respectivamente. O ponto de saturação está marcado com uma seta no respectivo teor de sólidos.

Gráfico 16 – Resistência à compressão axial para a idade de controle de 7 dias.



Fonte: própria autoria

Gráfico 17 – Resistência à compressão axial para a idade de controle de 28 dias.



Fonte: própria autoria

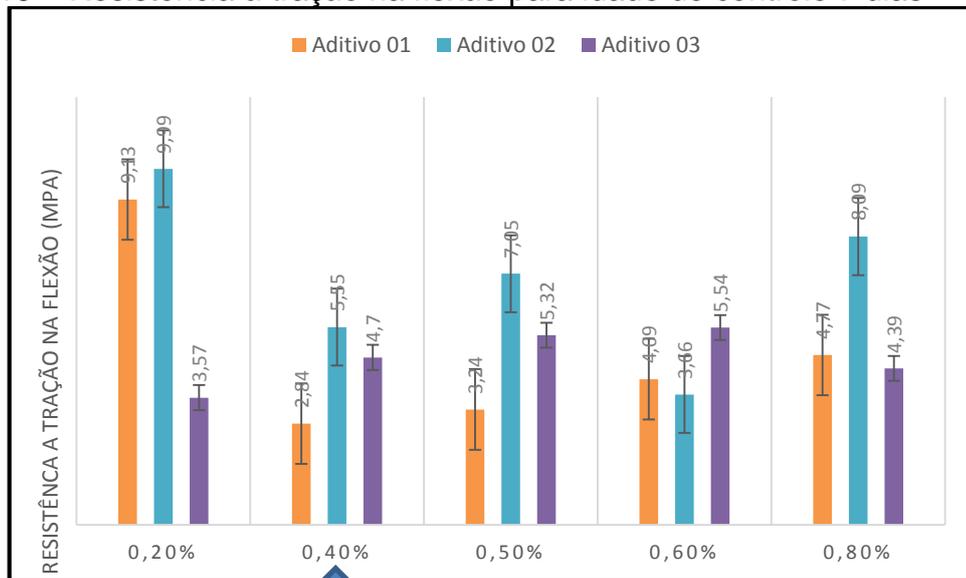
Analisando o gráfico nota-se que aos 7 dias ocorre uma diferença de resistência entre os aditivos, sendo que o Aditivo 03 aparece com melhores resultados. Para as

idades de controle de 28 dias a diferença diminui, mas o Aditivo 03 continua mantendo o melhor desempenho mecânico.

5.2.2 Resultados para Resistência à Tração na flexão – CP IV

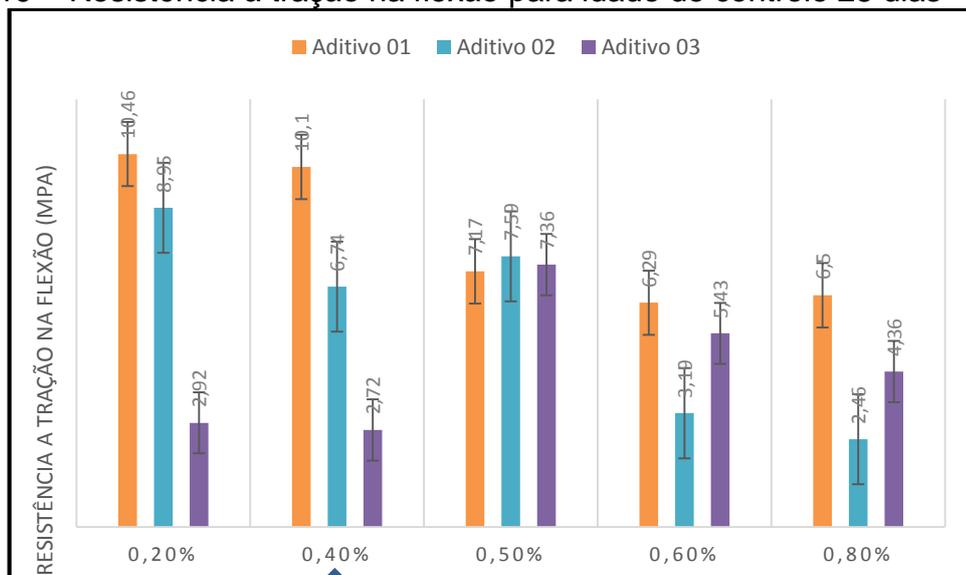
Os Gráficos 18 e 19 expõem a média dos resultados do ensaio de tração na flexão para o cimento CP IV nas idades de controle de 7 e 28 dias, respectivamente. O ponto de saturação está marcado com uma seta no respectivo teor de sólidos.

Gráfico 18 – Resistência à tração na flexão para idade de controle 7 dias



Fonte: própria autoria

Gráfico 19 – Resistência à tração na flexão para idade de controle 28 dias



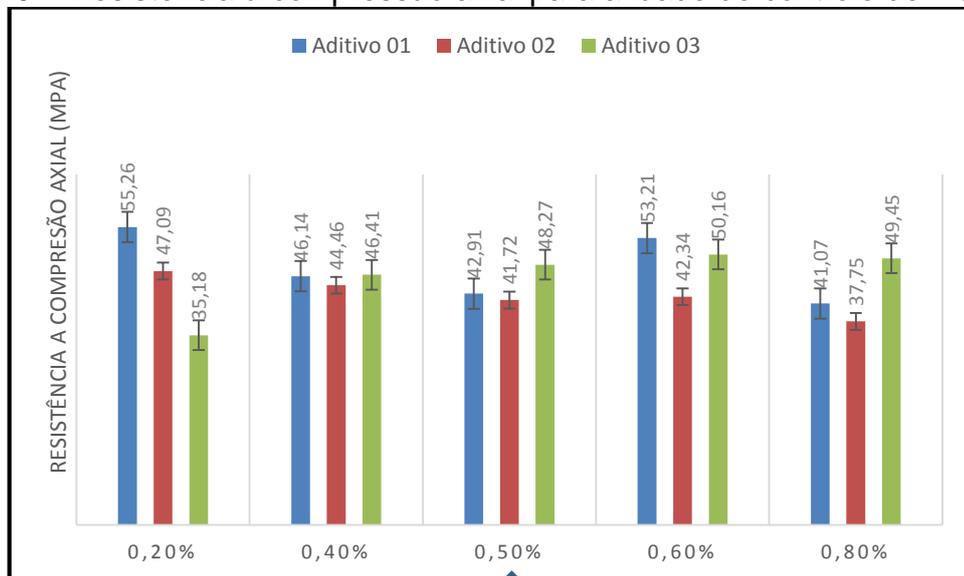
Fonte: própria autoria

Com base nos resultados dos gráficos nota-se uma diferença entre as resistências a tração na flexão, aos 7 dias o Aditivo 02 apresenta melhores resultados, sendo que aos 28 dias o Aditivo 01 tem melhores resistências com as variações de porcentagem de aditivo.

5.2.3 Resultados para Resistência à Compressão Axial – CP II E

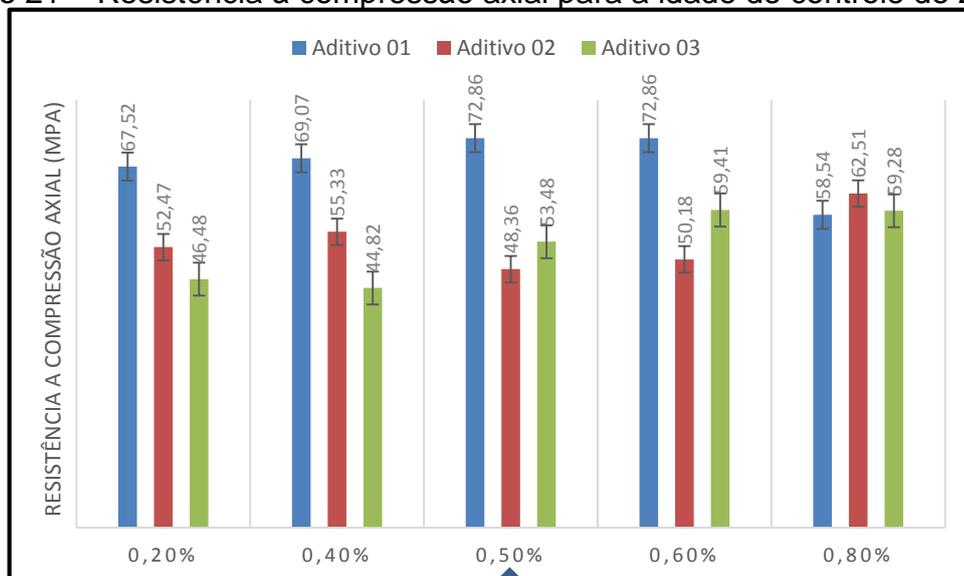
Os Gráficos 20 e 21 expõem a média dos resultados dos ensaios de resistência à compressão axial para as misturas com cimento CP II E nas idades de controle de 7 e 28 dias, respectivamente. O ponto de saturação está marcado com uma seta no respectivo teor de sólidos.

Gráfico 20 – Resistência à compressão axial para a idade de controle de 7 dias.



Fonte: própria autoria

Gráfico 21 – Resistência à compressão axial para a idade de controle de 28 dias.



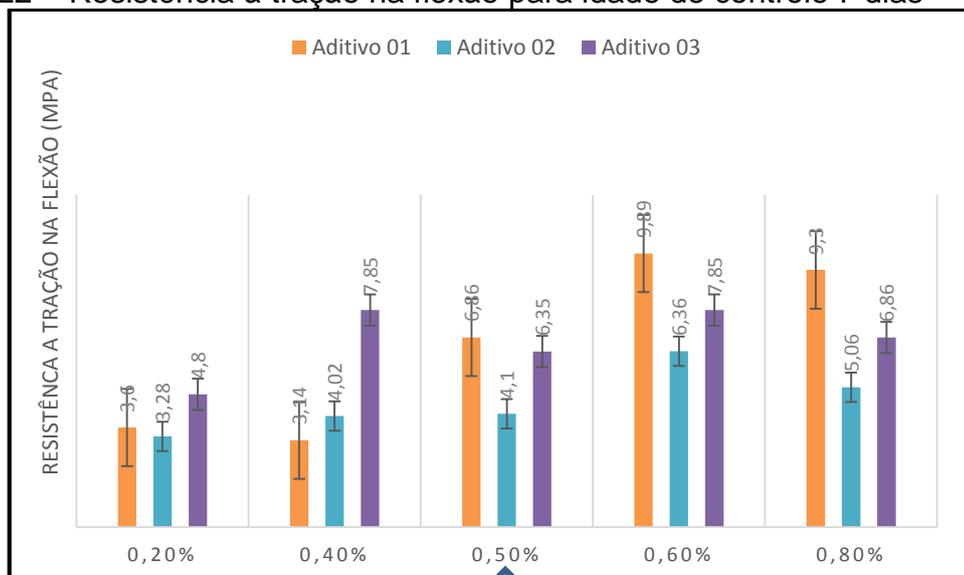
Fonte: própria autoria

Analisando os gráficos nota-se que aos na idade de controle de 7 dias o Aditivo 01 apresenta maiores resultados nos teores de 0,2% e 0,6%, nos demais teores o Aditivo 03 apresenta melhores resultados. Aos 28 dias ocorre uma diferença de resistência entre os aditivos, sendo que o Aditivo 01 apresenta os melhores resultados.

5.2.4 Resultados para Resistência à Tração na flexão – CP II E

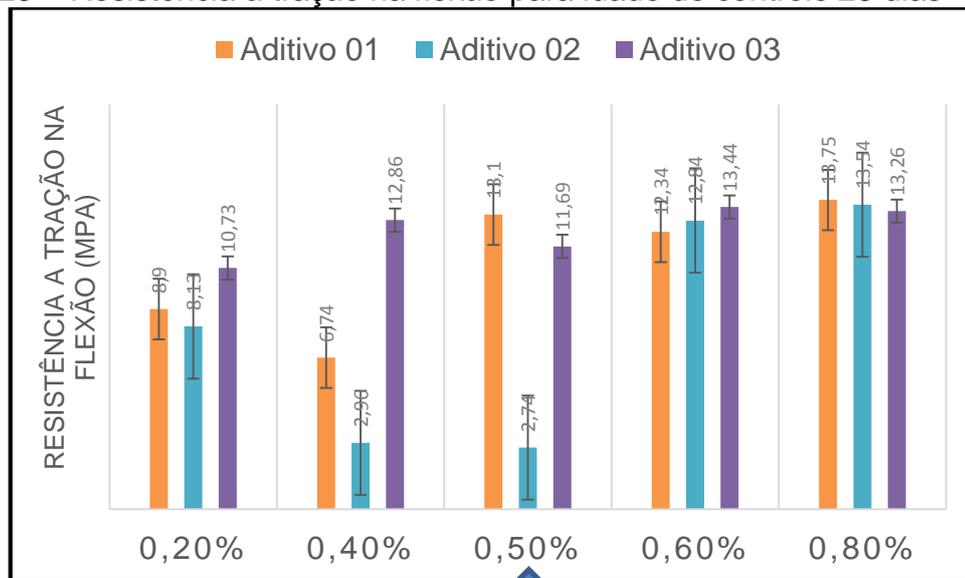
Os Gráficos 22 e 23 expõem a média dos resultados do ensaio de tração na flexão para o cimento CP II E nas idades de controle de 7 e 28 dias, respectivamente. O ponto de saturação está marcado com uma seta no respectivo teor de sólidos.

Gráfico 22 – Resistência à tração na flexão para idade de controle 7 dias



Fonte: própria autoria

Gráfico 23 – Resistência à tração na flexão para idade de controle 28 dias

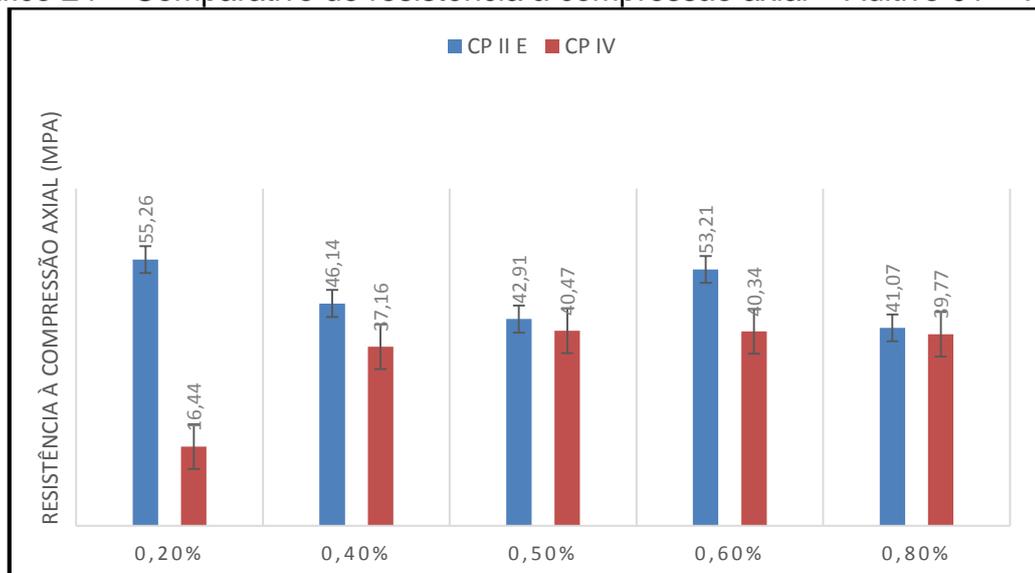


Fonte: própria autoria

5.2.5 Comparativo entre as resistências à compressão axial

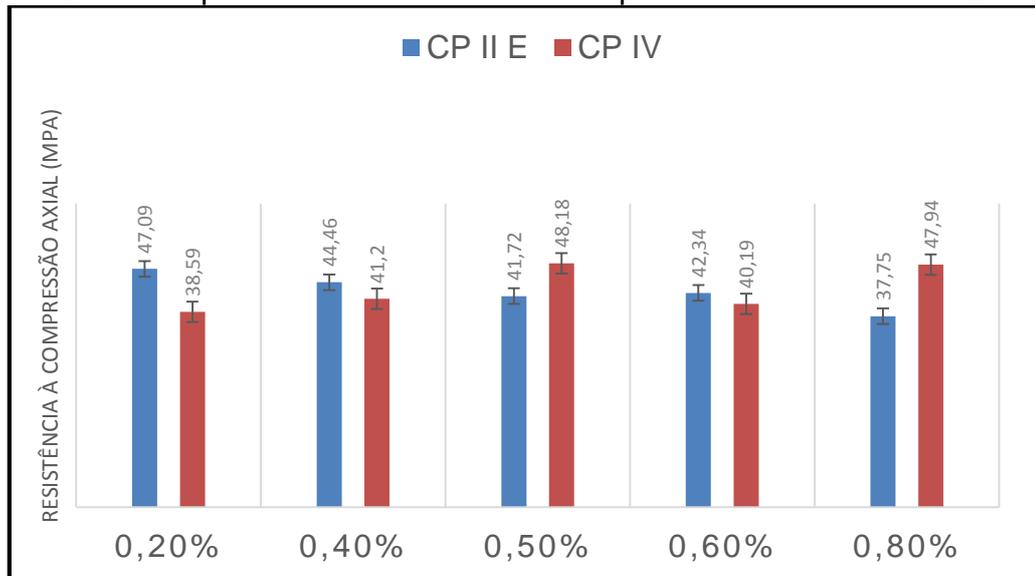
Os Gráficos 24, 25 e 26 expõem uma comparação entre os resultados do ensaio de compressão axial para os cimentos CP II E e CP IV com os três aditivos analisados (01, 02 e 03) na idade de controle de 7 dias.

Gráfico 24 – Comparativo de resistência à compressão axial – Aditivo 01 – 7 dias



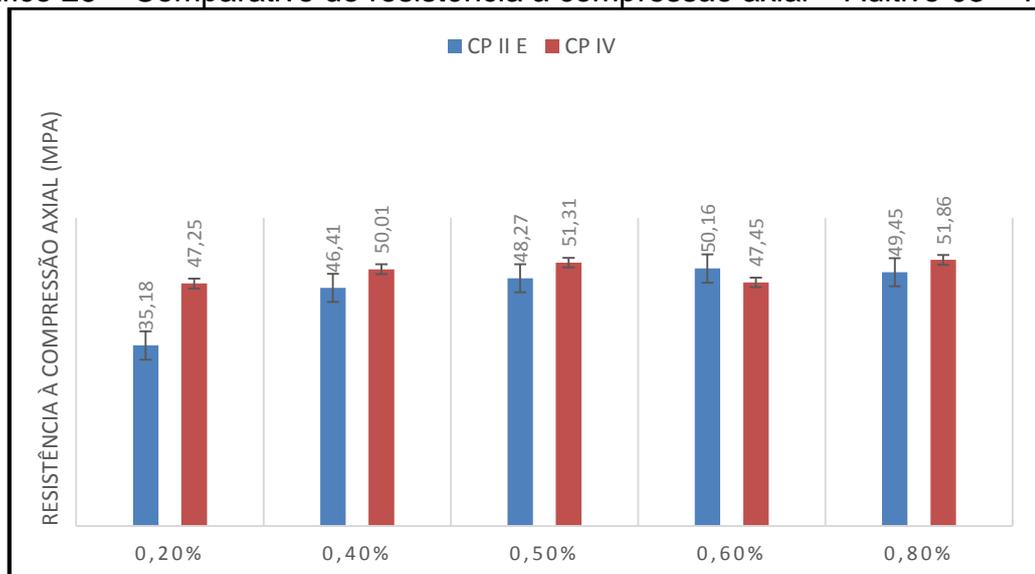
Fonte: própria autoria

Gráfico 25 – Comparativo de resistência à compressão axial – Aditivo 02 – 7 dias



Fonte: própria autoria

Gráfico 26 – Comparativo de resistência à compressão axial – Aditivo 03 – 7 dias

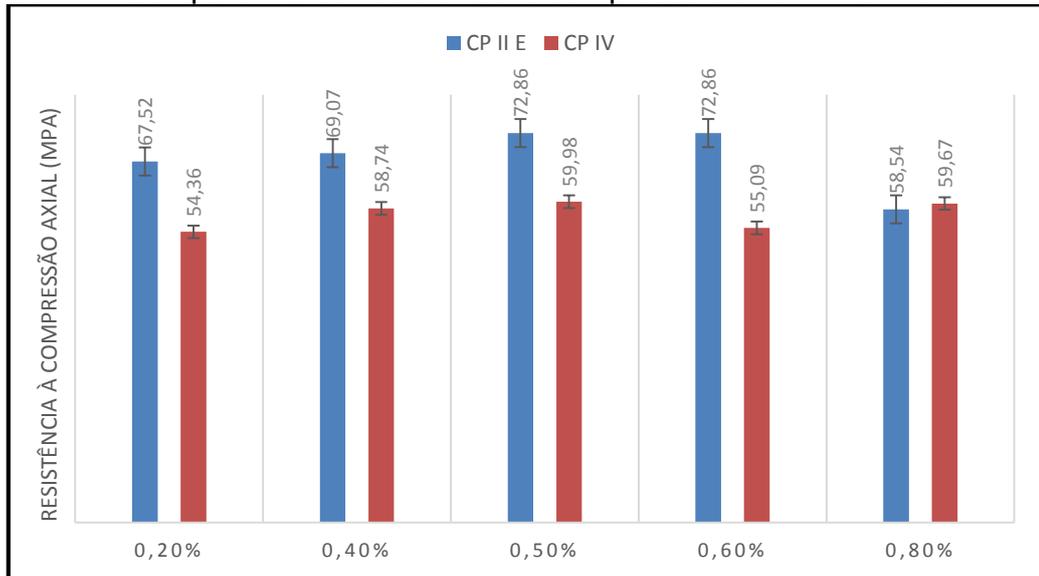


Fonte: própria autoria

Através dos gráficos é possível observar uma diferença entre as resistências à compressão entre os tipos de cimento estudados (CP II E e CP IV). Para misturas com os Aditivos 02 e 03 o cimento CP IV apresentou melhores resultados a compressão, já o Aditivo 01 apresentou melhor resultado a compressão nas misturas contendo CP II E.

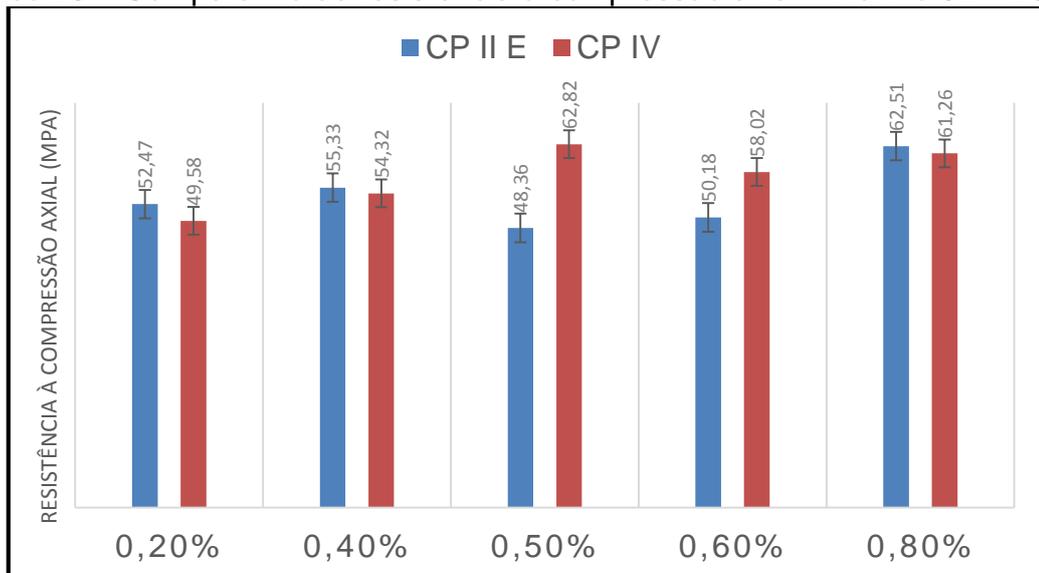
Os Gráficos 27, 28 e 29 expõem uma comparação entre os resultados do ensaio de compressão axial para os cimentos CP II E e CP IV com os três aditivos analisados (01, 02 e 03) na idade de controle de 28 dias.

Gráfico 27 – Comparativo de resistência à compressão axial – Aditivo 01 – 28 dias



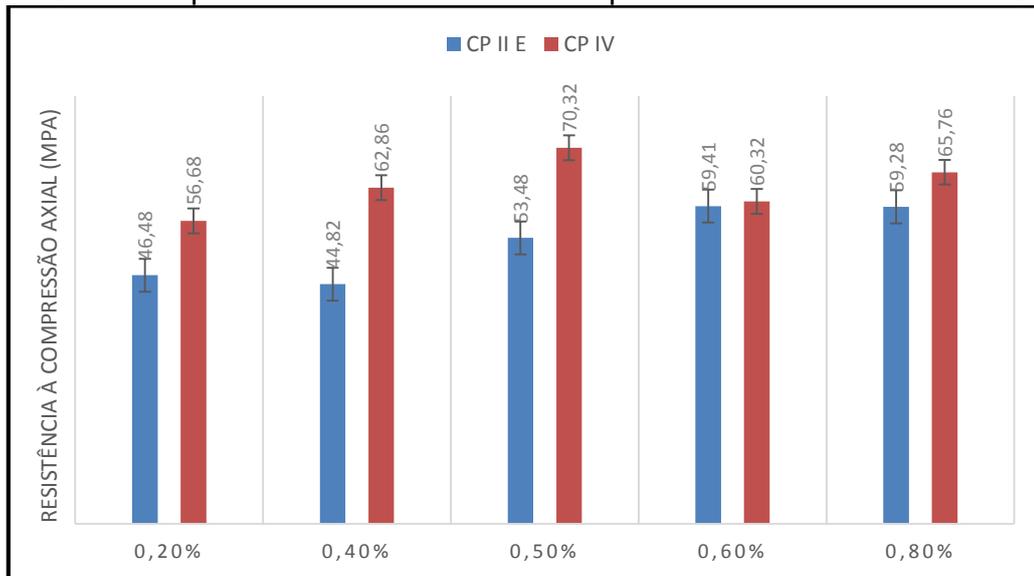
Fonte: própria autoria

Gráfico 28 – Comparativo de resistência à compressão axial – Aditivo 02 – 28 dias



Fonte: própria autoria

Gráfico 29 – Comparativo de resistência à compressão axial – Aditivo 03 – 28 dias



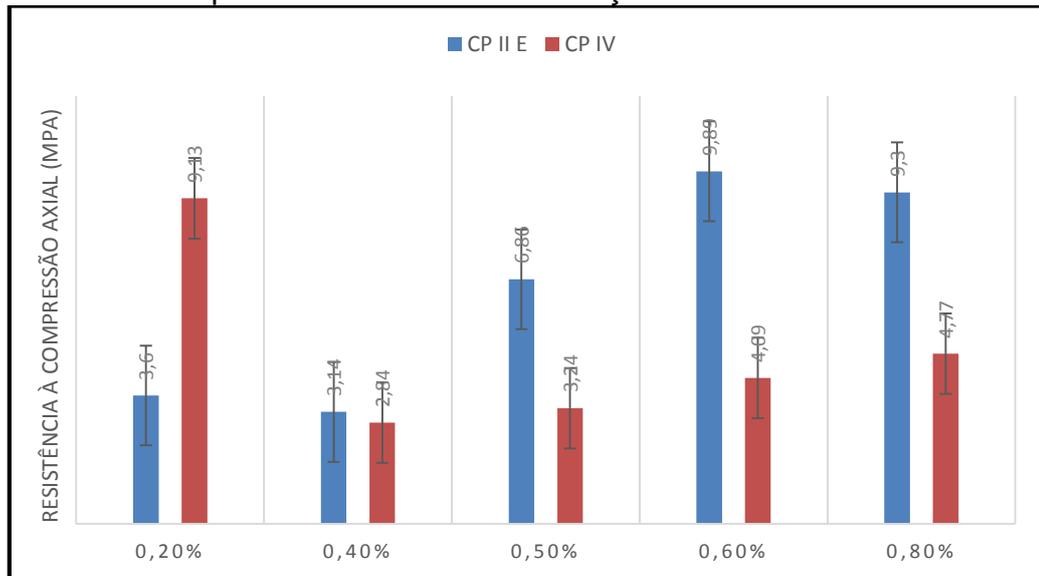
Fonte: própria autoria

Através dos gráficos é possível observar uma diferença entre as resistências à compressão entre os tipos de cimento estudados (CP II E e CP IV). Para misturas com os Aditivos 02 e 03 o cimento CP IV apresentou melhores resultados a compressão, já o Aditivo 01 apresentou melhor resultado a compressão nas misturas contendo CP II E.

5.2.6 Comparativo entre as resistências à tração na flexão

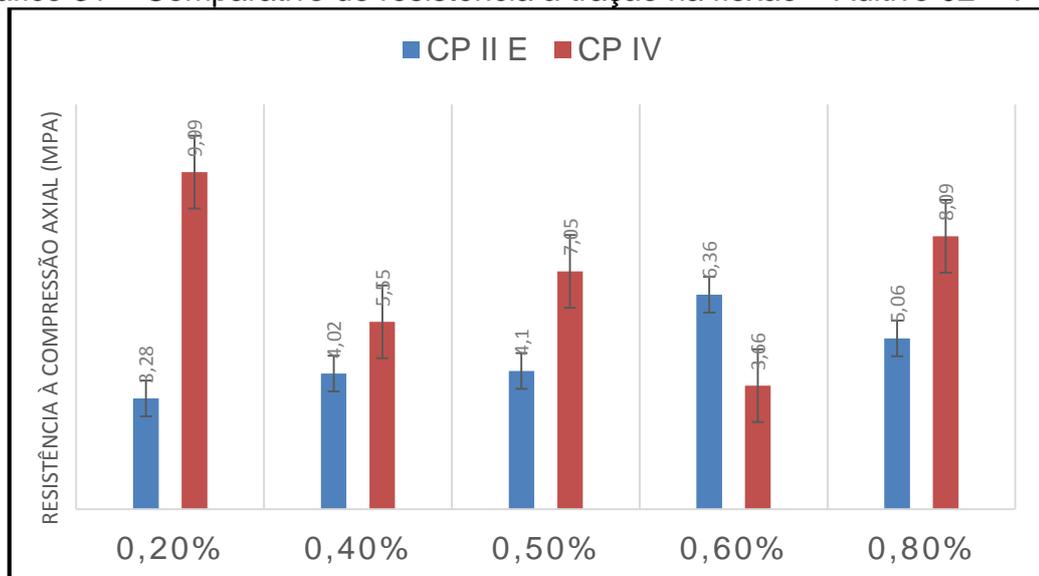
Os Gráficos 30, 31 e 32 apresentam uma comparação entre os resultados do ensaio de tração na flexão para os cimentos CP II E e CP IV com os três aditivos analisados (01, 02 e 03) na idade de controle de 7 dias.

Gráfico 30 – Comparativo de resistência à tração na flexão – Aditivo 01 – 7 dias



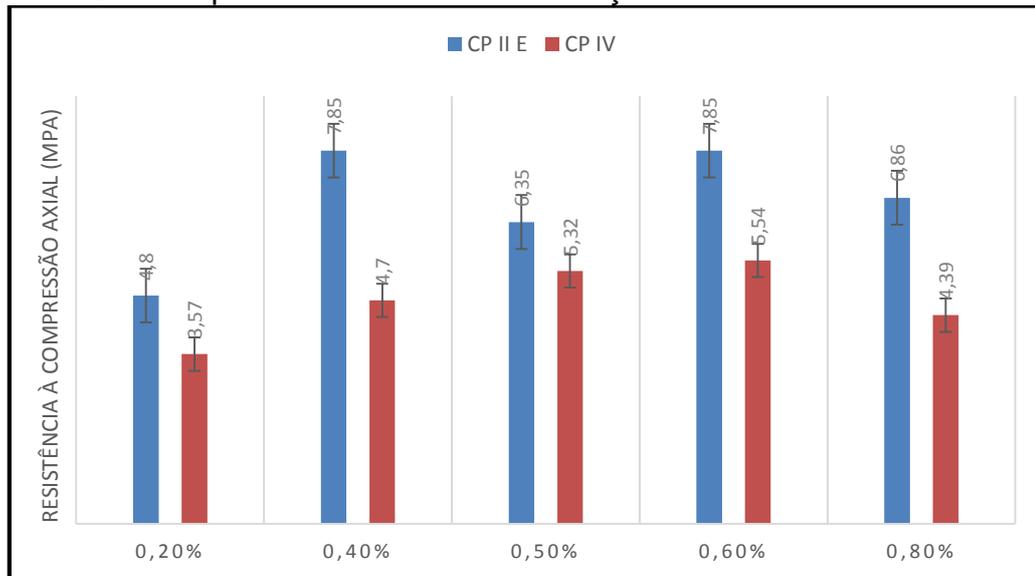
Fonte: própria autoria

Gráfico 31 – Comparativo de resistência à tração na flexão – Aditivo 02 – 7 dias



Fonte: própria autoria

Gráfico 32 – Comparativo de resistência à tração na flexão – Aditivo 03 – 7 dias

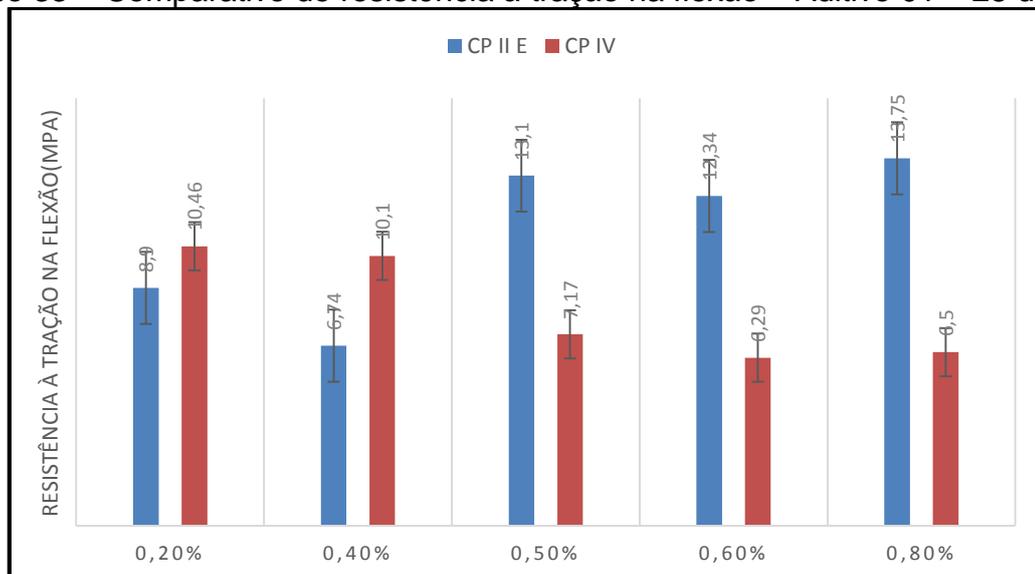


Fonte: própria autoria

Com base nos dados dos gráficos de resistência à tração na flexão aos 7 dias é possível observar que o cimento CP II E apresenta melhores resultados nas misturas com o Aditivo 01 e com o Aditivo 03. O cimento CP IV apresenta melhores resultados nas misturas contendo o Aditivo 02.

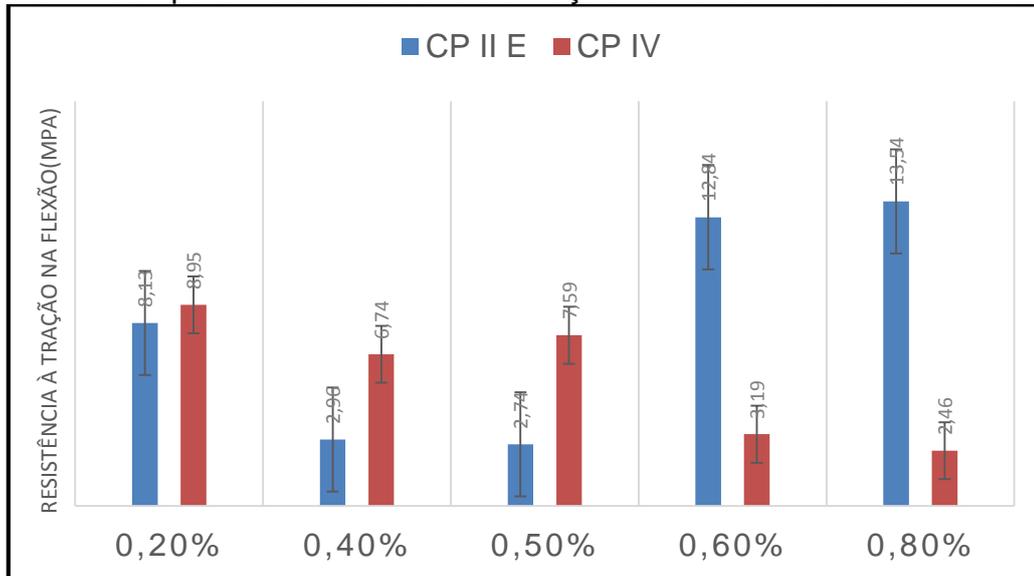
Os Gráficos 33, 34 e 35 apresentam uma comparação entre os resultados do ensaio de tração na flexão para os cimentos CP II E e CP IV com os três aditivos analisados (01, 02 e 03) na idade de controle de 28 dias.

Gráfico 33 – Comparativo de resistência à tração na flexão – Aditivo 01 – 28 dias



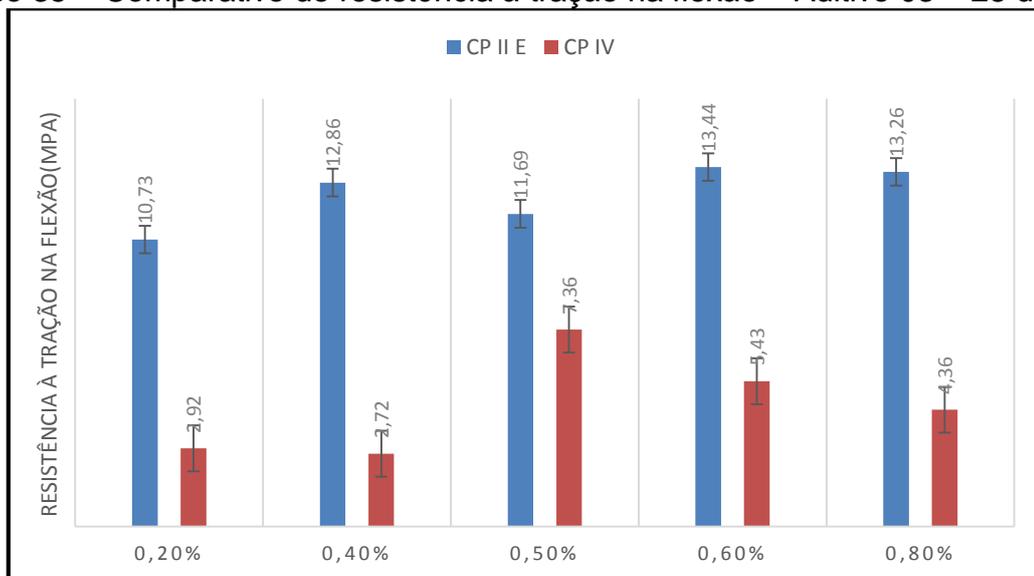
Fonte: própria autoria

Gráfico 34 – Comparativo de resistência à tração na flexão – Aditivo 02 – 28 dias



Fonte: própria autoria

Gráfico 35 – Comparativo de resistência à tração na flexão – Aditivo 03 – 28 dias



Fonte: própria autoria

Com base nos dados dos gráficos de resistência à tração na flexão aos 28 dias é possível observar que o cimento CP IV apresenta melhores resultados nas misturas com os teores de 0,2% e 0,4% para o Aditivo 01 e nas misturas com os teores de 0,2%, 0,4% e 0,5% para o Aditivo 02. O cimento CP II E apresenta melhores resultados nas misturas contendo o Aditivo 03, nas misturas com os teores de 0,6% e 0,8% para o Aditivo 02 e nos teores de 0,4%, 0,5% e 0,6% 01.

6 CONCLUSÕES

No presente trabalho foi analisado o desempenho de três diferentes aditivos superplastificantes a base de policarboxilatos em caldas confeccionadas com dois tipos de cimento Portland. Foi investigado a vida útil, a compatibilidade com os tipos de cimento, o ponto de saturação e as propriedades mecânicas das caldas, através da resistência a tração na flexão e compressão axial.

Os próximos itens apresentam as conclusões referentes ao desempenho dos aditivos nos ensaios reológicos no estado fresco e mecânicos. As conclusões aqui expostas referem-se a características específicas dos materiais utilizados no presente trabalho, sendo necessárias novas pesquisas para aprofundar o conhecimento em aditivos.

6.1 Índice de Fluidiez

Através do ensaio dos resultados obtidos do Funil Marsh para os diferentes tipos de cimento e aditivo é possível concluir que:

- a) O Aditivo 01 apresentou melhor fluidez com o cimento CP II E, com o ponto de saturação no teor de 0,5% e uma vida útil de até duas horas após a mistura.
- b) O Aditivo 02 apresentou melhor fluidez com o cimento CP II E, com o ponto de saturação no teor de 0,6% e uma vida útil até uma hora após a mistura, sendo que apresentou melhores resultados de vida útil com o cimento CP IV, de duas a três horas após o processo de mistura.
- c) O Aditivo 03 apresentou melhor fluidez com o cimento CP IV, com o ponto de saturação no teor de 0,5% e uma vida útil de até quatro horas após a mistura.
- d) Relacionando a vida útil e o índice de fluidez o Aditivo 03 apresentou melhores resultados, tendo uma boa fluidez e a maior vida útil dentre os aditivos analisados.
- e) Pode-se concluir também que para ambos os aditivos nas misturas com o cimento CP IV o ponto de saturação encontra-se entre os teores de 0,4% e 0,5%. Para as misturas com cimento CP II E e ambos os aditivos o ponto de saturação se encontra entre 0,5% e 0,6%.

6.2 Abatimento da Calda

Através dos resultados obtidos no ensaio de Mini abatimento para os diferentes tipos de aditivo e cimento é possível concluir que:

- a) O Aditivo 01 apresentou melhores resultados de miniabatimento com o cimento CP IV, com o ponto de saturação entre os teores de 0,4% e 0,5%, porém nas análises posteriores a após a mistura apresentou perda de abatimento, possuindo uma vida útil de curto período de duração.
- b) O Aditivo 02 apresentou melhores resultados de miniabatimento com o cimento CP IV, com o ponto de saturação no teor de 0,4% e uma vida útil de uma a duas horas após a mistura.
- c) O Aditivo 03 apresentou melhores resultados de miniabatimento com o cimento CP II E, com o ponto de saturação entre os teores de 0,5% e 0,6% e uma vida útil de até quatro horas após a mistura.
- d) Dentre todos os aditivos analisados o Aditivo 03 para o ensaio de miniabatimento foi quem apresentou melhor relação entre vida útil e abatimento.
- e) Pode-se concluir também que para ambos os aditivos nas misturas com o cimento CP IV o ponto de saturação encontra-se entre os teores de 0,4% e 0,5%. Para as misturas com cimento CP II E e ambos os aditivos o ponto de saturação se encontra entre 0,5% e 0,6%.

6.3 Índice de Exsudação

Através do ensaio de exsudação e dos resultados obtidos é possível concluir que o Aditivo 02 apresentou uma menor taxa de exsudação e o Aditivo 03 foi o que apresentou uma maior taxa de exsudação. No ponto de 0,5% de teor de sólidos, próximo aonde apareceram os teores de saturação, todos os aditivos apresentaram índices de exsudação semelhantes.

6.4 Resistência à Compressão Axial

Através dos resultados obtidos pelo ensaio de compressão é possível concluir que ocorre uma interferência do tipo de aditivo na calda de cimento, sendo que para o cimento CP IV o Aditivo 03 apresentou melhores resultados para ambas as idades de controle (7 e 28 dias), com seu pico de resistência com teor de 0,8% aos 7 e 0,5% aos 28 dias. O cimento CP II E apresentou melhores resultados nas idades de controle de 7 e 28 dias nas misturas contendo o Aditivo 01, sendo seu pico de resistência aos 7 na mistura com o teor de 0,2% e aos 28 dias na mistura com o teor de 0,6%.

Comparando os resultados entre os cimentos (CP II E e CP IV) conclui-se que nas idades de controle de 7 e 28 dias o Aditivo 01 apresenta melhores resultados nas misturas com o cimento CP II E. Os Aditivos 02 e 03 apresentaram melhores resultados em misturas com o cimento CP IV.

6.5 Resistência à Tração na flexão

Com base nos resultados obtidos pelo ensaio de tração na flexão é possível concluir que ocorre uma interferência do tipo de aditivo na calda de cimento, para o cimento CP IV o Aditivo 02 apresentou melhores resultados aos 7 dias e o Aditivo 01 apresentou melhores resultados aos 28 dias, ambos com seu pico de resistência máxima no teor de 0,2%. Para o cimento CP II E o pico de resistência na idade de controle de 7 dias foi no teor de 0,6% e aos 28 no teor de 0,8%, ambos com o Aditivo 01.

Comparando a resistência a tração na flexão nas misturas com os dois tipos de cimento (CP IV e CP II E) na idade de controle de 7 dias conclui-se que o cimento CP II E tem melhores resistências nas misturas com os Aditivos 01 e 03, sendo que o CP IV apresenta melhores resultados nas misturas com o Aditivo 02. Na idade de controle de 28 dias o cimento CP II E possui melhores resultados com os três aditivos analisados.

REFERÊNCIAS

AÏTCIN, P. C. **High-Performance Concrete**. London: E & FN SPON, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS: **NBR 7215: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão**. Rio de Janeiro, 1997.

_____: **NBR 7681: Calda de cimento para injeção. Parte 1: Requisitos**. Rio de Janeiro, 2013.

_____: **NBR 7681: Calda de cimento para injeção. Parte 2: Determinação do índice de fluidez e vida útil**. Rio de Janeiro, 2013.

_____: **NBR 7681: Calda de cimento para injeção. Parte 3: Determinação dos índices de exsudação e expansão**. Rio de Janeiro, 2013.

_____: **NBR 7681: Calda de cimento para injeção. Parte 4: Determinação da resistência a compressão**. Rio de Janeiro, 2013.

CASTRO, A. L. **Aplicação de Conceitos Reológicos na Tecnologia de Concretos de Alto Desempenho**. 2007. 302 f. Tese de Doutorado (Doutor em Ciência e Engenharia dos Materiais). Escola de Engenharia de São Carlos / Instituto de Física de São Carlos / Instituto de Química de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlo, 2007.

CATARINO, J. F. **Avaliação da Influência do Cimento na Interação Cimento-Superplastificante**. 2012. 179 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Área Departamental de Engenharia Química, Instituto Superior de Lisboa, Lisboa, Portugal, 2012.

CATRAL. **Liquidificador Industrial**. 2014, não paginado, il. Color. Disponível em <<http://www.catral.com.br/liquidificador-industrial-de-atla-rotacao-ta02-siemsen,product,1361013,0.aspx>> Acessado em: Junho de 2014.

GOMES, P. C. C.; BARROS, A. R. **Métodos de Dosagem de Concreto Auto-Adensável**. São Paulo: PINI, 2009.

HARTMANN, C. T. **Avaliação de Aditivos Superplastificantes a Base Policarboxilatos Destinados a Concretos de Cimento Portland**. Boletim Técnico. São Paulo, EPUSP, 2003.

MARANGON, E. **Desenvolvimento e Caracterização de Concretos Auto-Adensáveis Reforçados com Fibras de Aço**. 2006. 141 f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil). Programa de Pós-Graduação de Engenharia da Universidade do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

MC-BAUCHEMIE. **Ficha Técnica Mc-Powerflow 2141**. 2014. Disponível em <<http://www.mc-bauchemie.com.br/produtos/construction-chemicals/aditivos-para->

concreto-e-argamassa/superplastificantes-pce/mc-powerflow-2141/#.U9u96_IdWhs>
Acessado em: Junho de 2014.

____. **Ficha Técnica Mc-Powerflow 2151**. 2014. Disponível em < <http://www.mc-bauchemie.com.br/produtos/construction-chemicals/aditivos-para-concreto-e-argamassa/superplastificantes-pce/mc-powerflow-2150/#.U9u99vldWhs>> Acessado em: Junho de 2014.

____. **Ficha Técnica Mc-Powerflow 3100**. 2014. Disponível em <http://www.mc-bauchemie.com.br/produtos/construction-chemicals/aditivos-para-concreto-e-argamassa/superplastificantes-pce/mc-powerflow-3100/#.U9u_QfldWht> Acessado em: Junho de 2014.

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

RONCERO, J. **Effect of Superplasticizers On The Behavior Of Concrete In The Fresh And Hardened States: Implications For High Performance Concretes**. 2000. 208 f. Tese de Doutorado. Escola Tècnica Superior D'Enginyers de Camins. Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona, Espanha, 2000.

TUTIKIAN, B. F.; DAL MOLIN, D. C. **Concreto Auto-Adensável**. São Paulo: PINI, 2008.

VITLAB. **Proveta Graduada, PP**. 2014, não paginado, il. Color. Disponível em < http://www.lobov.com.br/representadas/vitlab/produtos-descricao.php?id_produto=60> Acessado em: Agosto de 2014.