



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
Universidade Federal de Ouro Preto  
Escola de Minas – Departamento de Engenharia Civil  
Curso de Graduação em Engenharia Civil

---



**Hugo André de Souza Cunha**

# **AVALIAÇÃO DOS TEORES DE ADITIVOS PLASTIFICANTES EM PASTAS DE CIMENTOS PORTLAND**

Ouro Preto

2022

# Avaliação dos teores de aditivos plastificantes em pastas de cimento Portland

Hugo André de Souza Cunha

Trabalho Final de Curso apresentado  
como parte dos requisitos para obtenção  
do Grau de Engenheiro Civil na  
Universidade Federal de Ouro Preto.

Data da aprovação: 06/05/2022

Área de concentração: Materiais e Componentes da Construção

Orientador: Prof. D.Sc. Ricardo André Fiorotti Peixoto – UFOP

Co-orientadora: Eng<sup>a</sup>.M.Sc. Tainá Varela de Melo – UFOP

Ouro Preto

2022

## SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

C972a Cunha, Hugo Andre de Souza.  
Avaliação dos teores de aditivos plastificantes em pastas de cimento Portland. [manuscrito] / Hugo Andre de Souza Cunha. - 2022.  
58 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientador: Prof. Dr. Ricardo André Fiorotti Peixoto.  
Coorientadora: Ma. Tainá Varela de Melo.  
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto.  
Escola de Minas. Graduação em Engenharia Civil .

1. Cimento Portland. 2. Concreto - Aditivos. 3. Concreto - Plastificantes. 4. Aditivos - Estudo de dosagem. 5. Concreto - Saturação.  
I. Melo, Tainá Varela de. II. Peixoto, Ricardo André Fiorotti. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU 621

Bibliotecário(a) Responsável: Maristela Sanches Lima Mesquita - CRB-1716



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO  
REITORIA  
ESCOLA DE MINAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL



## FOLHA DE APROVAÇÃO

**Hugo André de Souza Cunha**

### **Avaliação dos teores de aditivos plastificantes em pastas de cimento Portland**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Civil

Aprovada em 06 de maio de 2022

#### Membros da banca

Doutor - Ricardo André Fiorotti Peixoto - Orientador - Universidade Federal de Ouro Preto  
Mestre - Tainá Varela de Melo - Co-orientadora - Universidade Federal de Ouro Preto  
Mestre - Juliana Fadini Natali - Universidade Federal de Ouro Preto  
Engenheiro - Victor Rezende Carvalho - Universidade Federal de Ouro Preto

Ricardo André Fiorotti Peixoto, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 06/05/2022



Documento assinado eletronicamente por **Ricardo Andre Fiorotti Peixoto, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 06/06/2022, às 15:54, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [http://sei.ufop.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **0338173** e o código CRC **3B258D1B**.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a minha mãe Neuza e ao meu irmão Bruno por sempre acreditarem, incentivarem e estarem presentes em todos os momentos da minha vida. À Antônia por sempre me acompanhar durante toda a graduação me apoiando e aconselhando nos momentos mais difíceis desse percurso. Agradeço aos meus amigos e familiares por todo suporte e palavras de incentivo durante esse processo.

Gostaria de agradecer também ao Grupo Reciclos e ao CNPq pelo incentivo à pesquisa e pelas experiências proporcionadas durante a graduação. Por fim, a Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP, pelo ensino de qualidade e gratuito. E viva a Escola de Minas.

## RESUMO

O concreto é um dos materiais de construção mais consumidos no mundo e é fundamental para o crescimento industrial e o desenvolvimento urbano. As características desse material podem ser profundamente alteradas dependendo da origem, características e dosagem de seus componentes. A tecnologia da construção vem exigindo versatilidade de seus produtos, os quais devem ser capazes de produzir matrizes cimentícias duráveis e mecanicamente resistentes. Tal fato é notado pela variabilidade de tipos de cimentos Portland e de aditivos químicos, tais como os plastificantes, capazes de reduzirem consideravelmente o teor de água na produção das matrizes. Neste aspecto, as funcionalidades e compatibilidades entre esses dois produtos são responsáveis por modificarem as características dos sistemas, tanto no estado fresco quanto no estado endurecido das matrizes cimentícias. Tais características e compatibilidades são determinantes para o alcance do desempenho desejado para os concretos projetados. O estudo sobre a dosagem de aditivos plastificantes se faz necessária para a elaboração de matrizes cimentícias mais trabalháveis, resistentes e duráveis, de acordo com a função para a qual foi projetada. A determinação do teor de saturação dos aditivos químicos é fundamental para a otimização das misturas de concreto, principalmente para solucionar problemas relacionados com a reologia das matrizes e com os fenômenos de exsudação e segregação, fatores que podem comprometer o seu desempenho. A utilização de ensaios reológicos qualitativos que englobem variáveis físicas tais como tensão de escoamento, viscosidade e tensão de cisalhamento tornam-se uma alternativa viável para avaliar o teor de saturação nas pastas de cimento. Desse modo o presente projeto se propôs a desenvolver a construção das curvas de dosagem de pastas produzidas com os cimentos CP II, CP III, CP IV e CP V ARI aditivadas com plastificantes de primeira, segunda e terceira geração. Para tanto, foram realizados ensaios de fluidez, mini-abatimento e índice de consistência com as pastas de cimento, a partir desses ensaios foram determinados os pontos de saturação e comparados com as dosagens indicadas pelo fabricante utilizando um fator água/cimento fixado em 0,35.

Palavras-chave: cimento Portland, aditivos, estudo de dosagem, plastificante, superplastificante, curva de saturação.

## **ABSTRACT**

Concrete is one of the most consumed construction materials in the world and is fundamental to industrial growth and urban development. The characteristics of this material can be profoundly altered depending on the origin, characteristics and dosage of its components. Construction technology has been demanding versatility from its products, which must be able to produce cementitious matrices that are durable and mechanically resistant. This fact is noticed by the variability of Portland cement types and of chemical additives, such as plasticizers, capable of considerably reducing the water content in the production of the matrices. In this aspect, the functionalities and compatibilities between these two products are responsible for modifying the characteristics of the systems, both in the fresh and hardened states of the cementitious matrices. Such characteristics and compatibilities are determinant to reach the desired performance for the designed concretes. The study on the dosage of plasticizer additives is necessary for the elaboration of more workable, resistant, and durable cementitious matrices, according to the function for which it was designed. The determination of the saturation content of chemical admixtures is essential for the optimization of concrete mixtures, especially to solve problems related to the rheology of the matrices and the phenomena of exudation and segregation, factors that can compromise their performance. The use of qualitative rheological tests that encompass physical variables such as yield stress, viscosity, and shear stress become a viable alternative to evaluate the saturation content in cement pastes. Thus, the present project aimed to develop the construction of the dosage curves of pastes produced with cements CP II, CP III, CP IV and CP V ARI additivated with first, second and third generation plasticizers. For this, tests of fluidity, mini-abatement and consistency index were performed with the cement pastes, from these tests the saturation points were determined and compared with the dosages indicated by the manufacturer.

Keywords: Portland cement, additives, dosage study, plasticizer, superplasticizer, saturation curve.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Viscosímetro Ford.....	19
Figura 2 - Misturador / mixer manual .....	19
Figura 3 - Recipiente utilizado para fazer as pastas .....	19
Figura 4 – Minicone utilizado nos ensaios .....	20
Figura 5 - Paquímetro .....	20
Figura 6 - Mesa de fluxo .....	22
Figura 7 - Gráfico com ensaio de fluidez com plastificante de 1ª geração.....	23
Figura 8 - Gráfico com ensaio de fluidez com plastificante de 2ª geração.....	24
Figura 9 - Gráfico com ensaio de fluidez com plastificante de 3ª geração.....	25
Figura 10 - Gráfico com ensaio de mini-abatimento com plastificante de 1ª geração .....	27
Figura 11 - Imagens dos espalhamentos nos pontos de saturação no ensaio de mini-abatimento com aditivo de 1ª geração.....	28
Figura 12 - Gráfico com ensaio de mini-abatimento com plastificante de 2ª geração .....	29
Figura 13 - Imagens dos espalhamentos nos pontos de saturação no ensaio de mini-abatimento com aditivo de 2ª geração.....	30
Figura 14 - Gráfico com ensaio de mini-abatimento com plastificante de 3ª geração .....	31
Figura 15 - Imagens dos espalhamentos nos pontos de saturação no ensaio de mini-abatimento com aditivo de 3ª geração.....	32
Figura 16 - Gráfico com ensaio de índice de consistência com plastificante de 1ª geração .....	33
Figura 17 - Imagens dos espalhamentos nos pontos de saturação no ensaio de índice de consistência com aditivo de 1ª geração.....	34

Figura 18 - Gráfico com ensaio de índice de consistência com plastificante de 2ª geração .....	35
Figura 19 - Imagens dos espalhamentos nos pontos de saturação no ensaio de índice de consistência com aditivo de 2ª geração.....	36
Figura 20 - Gráfico com ensaio de índice de consistência com plastificante de 3ª geração .....	37
Figura 21 - Imagens dos espalhamentos nos pontos de saturação no ensaio de índice de consistência com aditivo de 3ª geração.....	38

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Especificações dos tipos de cimentos utilizados fornecidos pelo fabricante de cimento Portland.....	17
Tabela 2 - Dosagens mínimas e máximas de aditivos recomendados pelo fabricante.....	17
Tabela 3 - Pontos de saturação encontrados no ensaio de fluidez.....	39
Tabela 4 - Pontos de saturação encontrados no ensaio de mini-abatimento .....	39
Tabela 5 - Pontos de saturação encontrados no ensaio de índice de consistência .....	39

## **LISTA DE SIGLAS**

CP I – Cimento Portland Comum

CP II – Cimento Portland Composto

CP III – Cimento Portland de Alto-Forno

CP IV – Cimento Portland Pozolânico

CP V-ARI - Cimento Portland de Alta Resistência Inicial

# SUMÁRIO

1	Introdução .....	1
1.1	Objetivo .....	3
1.1.1	Objetivos Específicos .....	3
2	Revisão Bibliográfica.....	4
2.1	Indústria do cimento Portland .....	4
2.2	Tipos de Cimento.....	5
2.2.1.	Cimento Portland Comum – CP I .....	5
2.2.2.	Cimento Portland Composto – CP II .....	6
2.2.3.	Cimento Portland de Alto-Forno – CP III .....	7
2.2.4.	Cimento Portland Pozolânico – CP IV.....	9
2.2.5.	Cimento Portland de Alta Resistência Inicial – CP V-ARI .....	10
2.2.6.	Cimento Portland Resistente a Sulfatos.....	11
2.2.7.	Cimento Portland de Baixo Calor de Hidratação .....	12
2.3	Aditivos Plastificantes .....	12
2.3.1.	Plastificante de 1ª geração.....	13
2.3.2.	Plastificante de 2ª geração.....	14
2.3.3.	Plastificante de 3ª geração.....	15
2.4	Reologia .....	16
3	MATERIAIS E MÉTODOS .....	17
3.1	Materiais .....	17
3.2	Metodologia .....	18
3.2.1.	Ensaio de Fluidez.....	18
3.2.2.	Ensaio de mini-abatimento.....	19

3.2.3.	Ensaio de índice de consistência .....	20
4	Resultados .....	22
4.1.	Ensaio de Fluidez .....	22
4.1.1.	Pasta de cimento com plastificante de 1ª geração.....	22
4.1.2.	Pasta de cimento com plastificante de 2º geração.....	24
4.1.3.	Pasta de cimento com plastificante de 3º geração.....	25
4.2.	Ensaio mini-abatimento .....	26
4.2.1.	Pasta de cimento com plastificante de 1º geração.....	26
4.2.2.	Pasta de cimento com plastificante de 2º geração.....	28
4.2.3.	Pasta de cimento com plastificante de 3º geração.....	30
4.3.	Ensaio de índice de consistência.....	32
4.3.1.	Pasta de cimento com plastificante de 1ª geração.....	32
4.3.2.	Pasta de cimento com plastificante de 2ª geração.....	34
4.3.3.	Pasta de cimento com plastificante de 3ª geração.....	36
4.4.	Pontos de saturação dos aditivos em comparação aos teores indicados pelo fabricante .....	38
5	Conclusão .....	40
5.1	Sugestões para trabalhos futuros .....	41
	REFERÊNCIAS .....	42

# 1 INTRODUÇÃO

O concreto de cimento Portland é o mais importante material da construção civil, a partir do qual os elementos que o possuem como constituinte são facilmente moldados em diversas formas e tamanhos. Sua intensa utilização no século XX o transformou em um dos materiais mais consumidos do mundo, cujo desenvolvimento sempre esteve associado ao crescimento industrial e urbano.

Os aditivos químicos vêm sendo utilizados na produção de matrizes cimentícias e suas aplicações tem sido intensificadas nas últimas quatro décadas (CHEUNG, JEKNAVORIAN, *et al.*, 2011). A indústria química moderna tem disponibilizado uma ampla série de aditivos para a indústria do concreto que possibilita, além de melhorar as características de seu produto de acordo com as suas especificidades, redução do consumo de cimento por m<sup>3</sup> aumentando a produtividade das construções (MARTIN, 2005). Aspectos relacionados ao aumento de desempenho, redução de custos e suporte às ações de base para o desenvolvimento econômico e social são fatores relevantes.

A construção civil se encontra em um patamar de inovação que faz com que a utilização de aditivos químicos para o concreto seja fundamental. A sofisticação que as soluções de engenharia vêm requerendo exigem grande versatilidade de seus produtos e componentes e neste aspecto, os aditivos são responsáveis por modificarem as características dos sistemas, tanto no estado fresco quanto no estado endurecido, originando e disponibilizando ao mercado novos materiais, como os concretos de alto desempenho e os concretos auto adensáveis (RIXON e MAILVAGANAM, 2001)

Segundo a NBR 11768 (2019), dentre os diferentes tipos de aditivos existentes (plastificantes, retardadores, aceleradores, incorporadores de ar, superplastificantes, dentre outros), os mais utilizados no mundo são os redutores de água, nos quais se incluem os aditivos plastificantes, superplastificantes e polifuncionais. A mesma normativa NBR 11768 (2019), define aditivos como produtos que adicionados em pequena quantidade aos concretos com cimento Portland, modificam algumas de suas propriedades, com a finalidade de melhor adequá-las a determinadas condições.

De acordo com Koliaş e Georgiu, (2005), a redução do teor de agente aglutinante e de água das misturas para uma mesma relação de água/cimento, proporciona a diminuição da porosidade dos concretos e o conseqüente aumento de sua durabilidade. Sabe-se que quanto menos poroso for um concreto, menor será a taxa de penetração de íons cloreto e de dióxido de carbono, associados a durabilidade e à corrosão das armaduras.

Segundo Aïtcin e Flatt, (2016), com o passar dos anos, diferentes fórmulas foram desenvolvidas para a família de aditivos superplastificantes, iniciando-se com os precursores plastificantes de base orgânica, os lignosulfonatos, passando pelos superplastificantes de base polinaftaleno e melamina, até chegar, enfim, ao patamar dos superplastificantes com base policarboxilato éster, a última geração de superplastificantes já desenvolvida.

Cimentos hidráulicos para aplicações estruturais se constituem basicamente de clínquer e adições (gesso, escória granulada de alto forno, materiais pozolânicos e fíler calcário) definindo os vários tipos encontrados no mercado. O cimento Portland é um aglomerante hidráulico produzido pela pulverização de clínqueres constituídos essencialmente por silicatos de cálcio cristalinos e uma pequena quantidade de uma ou mais formas de sulfato de cálcio e até 5% de calcário como adição na moagem (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

O entendimento das interações entre cimento e aditivo ainda são objeto de estudos devido à complexidade dos mecanismos químicos envolvidos durante a hidratação do cimento na presença de aditivos orgânicos. Além disso, não se pode descartar a probabilidade de existir incompatibilidade entre os aditivos e certos sistemas cimentícios, gerando problemas de retardo ou aceleração exagerada da pega, segregação do concreto, incorporação excessiva de ar na mistura, entre outros (HARTMANN, JEKNAVORIAN, *et al.*, 2011).

Segundo Aïtcin (2000), em sua experiência profissional nunca foi descoberta uma combinação que não fosse eficiente de nenhuma forma com a pasta, mas que produzisse um bom comportamento reológico no concreto. Dessa forma, quando métodos laboratoriais são empregados de forma adequada, como os ensaios de mini-abatimento, fluidez, índice de consistência, entre outros, é possível determinar

combinações eficientes e ineficientes. A escolha do aditivo deve ter como base a relação custo-eficiência podendo ser alcançada através das análises entre as curvas “tempo de escoamento versus dosagem de aditivo” e através da determinação do ponto de saturação desse aditivo (CASTRO e PANDOLFELLI, 2009).

Atualmente ainda não é possível saber, apenas verificando as especificações de um determinado cimento e de um determinado superplastificante, que tipo de comportamento reológico seria esperado em traços com relação água/cimento baixa. Por esse motivo se faz necessário experimentá-los para que se possa ter um entendimento de como se comportam, dada a complexidade dos fenômenos químicos envolvidos. Desse modo o presente trabalho se propôs avaliar os teores de aditivos plastificantes de primeira, segunda e terceira geração (superplastificante) em pastas de cimento Portland por meio de ensaios qualitativos reológicos monoponto (com apenas uma taxa de cisalhamento) e multiponto (com mais de uma taxa de cisalhamento).

## **1.1 Objetivo**

O objetivo do presente trabalho é avaliar os comportamentos qualitativos reológicos de pastas de cimento Portland produzidas com os cimentos tipo CP II, CP III, CP IV e CP V-ARI, aditivadas com diversos teores de aditivos plastificantes de primeira, segunda e terceira geração.

### **1.1.1 Objetivos Específicos**

- i. Plotar as curvas de saturação, a partir de ensaios qualitativos reológicos para as todas as pastas de cimento;
- ii. Determinar os pontos de saturação para todas as combinações de tipos de cimento e aditivos estudadas;
- iii. Descrever e comparar o comportamento reológico qualitativo das pastas de cimento segundo as técnicas aplicadas para determinação da fluidez, abatimento e consistência;

- iv. Correlacionar os teores de saturação das pastas e determinar a compatibilidade dos resultados obtidos das técnicas empregadas com as recomendações ótimas indicadas pelos fabricantes.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 Indústria do cimento Portland**

Um dos materiais mais consumidos no mundo, o cimento Portland oferece uma enorme variedade de aplicações nos mais diferentes tipos de obras civis. O cimento começou a ser estudado em meados do século XVIII com as pesquisas realizadas por John Smeaton, que em 1756 buscava materiais alternativos para resistir a ação agressiva da água do mar (GALHARDO, 2014). Em 1818 a pesquisa que mais se destacou foi a de Louis Vicat, que produziu o cimento artificialmente (BATTAGIN, 2011).

Patenteado em 1824 (GOMES, DOS SANTOS e NOGUEIRA, 2017), o cimento Portland foi tema de pesquisas realizadas por Joseph Aspadin, que obteve uma mistura que, depois de endurecida, alcançava uma rigidez igual à das rochas utilizadas nas construções da época e, além disso, não se dissolvia em água (GOMES, DOS SANTOS e NOGUEIRA, 2017). Uma melhoria na produção do cimento Portland foi desenvolvida em 1885, por Frederik Ransome, com o forno horizontal rotativo que permitia uma melhor queima das matérias-primas obtendo um resultado mais uniforme (BATTAGIN, 2011). Outro nome que se destacou dentro da indústria do cimento, foi o Thomas A. Edison, que fez várias melhorias na fabricação do ligante, sendo que a mais importante foi a do forno longo em 1902, que foi licenciado para outros fabricantes da época.

O mercado mundial do cimento no início até meados do século XX era comandado pelas indústrias situadas na Europa, entretanto, atualmente, tais indústrias produzem somente uma pequena parcela do mercado global (DAHLSTRÖM, 2019). Ainda segundo Dahlström, com o avanço da tecnologia de produção e o grande aumento do consumo do concreto de cimento Portland nos

séculos XX e XXI, fizeram com que o material seja o segundo mais consumido em todo Mundo, ficando atrás somente da água. Em contrapartida de todo dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) lançado na atmosfera, que é um dos gases que causam o efeito estufa, a indústria cimenteira é responsável por, aproximadamente, 8% desse total (RODGERS, 2018).

Dos principais países europeus produtores de cimento Portland, somente a Turquia está entre os maiores. China e a Índia fazem com que o continente asiático domine o mercado, já que são os principais países produtores de cimento Portland (EDWARDS, 2019). Já a América tem sua representatividade marcada pelas produções nos Estados Unidos e Brasil, que dentre os principais produtores foi o que teve o início de produção mais tardio. A primeira indústria no Brasil foi implantada em 1897, que tinha capacidade de produzir 25 mil toneladas ao ano (SANTOS, 2011). De acordo com o Sindicato Nacional da Indústria do Cimento – SNIC, em 2016 o país tinha uma capacidade produção de 100 milhões de toneladas por ano, o que mostra o quanto a indústria cimenteira evoluiu durante o último século.

Na última década a produção de cimento pode ser separada em duas partes: na primeira metade, a produção vinha em constante crescimento seguindo a tendência da década anterior, chegando à marca de 4,18 bilhões de toneladas em 2014 (EDWARDS, 2019). Porém de acordo com Edwards a segunda metade não seguiu os anos anteriores, mantendo-se estável, e tendo sua produção global alternando entre 4,0 e 4,2 bilhões de toneladas por ano.

## **2.2 Tipos de Cimento**

### **2.2.1. Cimento Portland Comum – CP I**

O cimento Portland comum, denominado CP I é indicado para construções cotidianas de concreto em que não haja riscos de contato a sulfatos no solo ou águas subterrâneas (NEVILLE, 2016). A norma europeia BS EM 197-1 (2000), mantém as especificações baseadas no desempenho e quase não se refere a sua composição química em relação a compostos e óxidos. A norma exige que sua composição tenha

um teor variando entre 95 e 100% de clínquer Portland e entre 0 e 5% de materiais secundários.

Em relação a composição mineralógica do clínquer, a norma pede que a soma de silicato tricálcico ( $C_3S$ ) e silicato dicálcico ( $C_2S$ ) seja no mínimo 2/3 da sua massa, e a relação entre  $CaO$  e  $SiO_2$ , em massa não seja inferior a 2,0, além disso, limita o teor de  $MgO$  em, no máximo, 5%. Os outros componentes podem ser algum material cimentício ou fíler, natural ou orgânico que não seja um material cimentício, por exemplo o calcário, que melhora as propriedades físicas do cimento.

No Brasil o cimento Portland comum tinha suas especificações normalizadas pela NBR 5732 (ABNT, 1991) mas em 2018 entrou em vigor a NBR 16697 (ABNT, 2018), que é a unificação de todas as normas relacionadas ao cimento Portland. No país ela tem duas classificações:

- CP I (Cimento Portland comum): deve possuir em massa na sua composição o teor de clínquer mais sulfatos de cálcio igual a 100%;
- CP I-S (Cimento Portland comum com adição): o teor de clínquer mais sulfatos de cálcio deve estar entre 95 e 99% e adição de escória de alto-forno, material pozolânico e material carbonático (fíler) variando entre 1 e 5%. Além disso o teor de  $MgO$  deve ser limitado a 6,5%.

### **2.2.2. Cimento Portland Composto – CP II**

O cimento Portland composto, denominado CP II, foi criado nos Estados Unidos, e possui uma taxa de calor de hidratação mais alta do que a do cimento de baixo calor de hidratação e com uma resistência mecânica próxima ao do cimento Portland comum. Sua utilização é recomendada para o trabalho em estruturas que necessitem de uma moderada geração de calor ou que possa ocorrer um moderado ataque por sulfatos (NEVILLE, 2016).

No Brasil, a NBR 16697 (ABNT, 2018) define o CP II como um aglomerante hidráulico que além do clínquer e do sulfato de cálcio pode receber durante a sua pulverização materiais pozolânicos, escórias granuladas de alto-forno e/ou materiais

carbonáticos (fíler). E, pode ser dividido em três subtipos, os quais são separados de acordo com as suas adições:

- CP II-E (Cimento Portland com adição de escória de alto forno): sua composição em massa é dada por 51 – 94% de clínquer mais sulfatos de cálcio, 6 – 34% de escória granulada de alto-forno e material carbonático variando de 0 – 15%;
- CP II-Z (Cimento Portland com adição de escória de pozolana): sua composição em massa é dada por 71 – 94% de clínquer mais sulfatos de cálcio, 6 – 14% de material pozolânico, e material carbonático variando de 0 – 15%;
- CP II-F (Cimento Portland com adição de fíler): sua composição em massa é dada por 75 – 89% de clínquer mais sulfatos de cálcio e material carbonático variando de 11 – 25%.

A classe de resistência mínima à compressão pode ser 25, 32 e 40 Mpa aos 28 dias de idade, sendo o método de ensaio prescrito pela normativa NBR 7215 (2019). Ambas variações do CP II podem ser resistentes a sulfatos (RS) ou possuir baixo calor de hidratação (BC) se os requisitos estabelecidos atenderem NBR 16697 (ABNT, 2018). Quando comercializado deve conter na descrição do material a sigla, classe e sufixo, por exemplo CP II-F-32 RS. O cimento Portland composto é empregado em boa parte das aplicações comuns como argamassas de revestimento, assentamento e rejuntamento, além de concreto simples), sendo o mais utilizado e correspondendo a 3/4 da produção brasileira de cimento Portland (ABCP, 2002).

### **2.2.3. Cimento Portland de Alto-Forno – CP III**

O cimento Portland de Alto-Forno é composto pela mistura de cimento Portland e escória granulada de alto-forno, que se refere ao resíduo da produção do ferro gusa. A escória é composta basicamente por óxido de cálcio, sílica e alumina, que são os mesmos compostos químicos que compõem o cimento Portland, mas em outras proporções. Para produzir o CP III, a escória deve ser resfriada até se solidificar como um material vítreo, para que seja evitada a cristalização (NEVILLE, 2016).

Existem diversas maneiras de produzir cimento Portland com escória de alto-forno, entretanto, a mais utilizada é a moagem da escória junto com o clínquer e/ou a mistura seca do cimento Portland e da escória (NEVILLE, 2016). De acordo com Neville, vale destacar que a escória tem uma dureza maior que o clínquer, e isso deve ser considerado na hora da moagem conjunta, desse modo usando a escória é triturada separadamente, atingindo uma textura superficial mais lisa, e melhorando a trabalhabilidade.

A classificação da escória de alto-forno, de acordo com norma americana ASTM C989 (2009), é baseada pela sua atividade hidráulica. Essa determinação é obtida pela comparação da resistência de argamassas normalizadas que possuem escória com as argamassas puras de cimento Portland.

Na Europa, a norma BS EN 197-1 (2000) trabalha com três classes de CP III, que são chamados de cimento de alto-forno III/A, III/B e III/C. Todas as classes permitem até 5% de fíler, mas a porcentagem de material cimentício (cimento Portland e escória de alto-forno) em massa de para cada classe é diferente. A III/A tem uma adição de 36 a 65% de escória, a III/B de 66 a 80% e a III/C entre 81 e 95% (NEVILLE, 2016).

O Brasil antes da unificação das normas de cimento Portland tinha como referência a NBR 5735 (ABNT, 1991). Atualmente, a NBR 16697 (ABNT, 2018) estabelece que o CP III deve ter a adição de escória granulada de alto-forno entre 35 e 75% da massa do produto final, além de poder ter um complemento de fíler entre 0 e 10% da massa final, o restante é constituído por clínquer e sulfato de cálcio. A norma também estabelece as classes de resistência de 25, 32 e 40 MPa. O CP III pode resistente a sulfato ou possuir baixo calor de hidratação, desde que atenda aos requisitos necessários destacados na NBR 16697 (ABNT, 2018), além dos requisitos para seu tipo e classes originais. O cimento Portland de alto-forno pode ser aplicado de diversas maneiras dentro da construção, entre elas estão pavimentos de concreto simples ou armado, pisos industriais de concreto e concreto-massa.

#### **2.2.4. Cimento Portland Pozolânico – CP IV**

O cimento Portland Pozolânico, denominado CP IV, refere-se a um material não aglutinante, ou seja, com hidraulicidade latente onde as pozolanas são utilizadas junto ao cimento Portland, podendo ser moídos em conjunto ou misturados. A ASTM 618 (2008), define a pozolana como um material silicoso ou silicoaluminoso, que possui pouca ou nenhuma atividade cimentícia, no entanto quando pulverizado e em contato com umidade, reage quimicamente com o hidróxido de cálcio a temperaturas ambientes, formando compostos cimentícios. A norma ainda define como material pozolânico as pozolanas naturais, pozolanas artificiais, argilas calcinadas, cinzas volantes e outros materiais que apresentem atividades pozolânicas (NEVILLE, 2016).

Segundo Neville (2016), as cinzas volantes silicosas, são as pozolanas mais utilizadas. O cimento Portland de cinzas volantes, possui duas subclasses de acordo com a norma europeia BS EM 197-1:2000, a Classe II/A-V, com teor de cinza volante entre 6 e 20%, e a Classe II/B-V com teor variando entre 21 e 35%. Semelhante ao cimento de alto-forno, o cimento pozolânico tem baixa resistência aos setes dias (mínimo 12 Mpa) e também aos 28 dias (mínimo de 22,5 Mpa). Tem como vantagem a baixa liberação de calor, o que torna um o cimento pozolânico um cimento com baixo calor de hidratação.

No Brasil o cimento Portland pozolânico era normalizado pela NBR 5736 (ABNT, 1991) corrigida em 1999. Atualmente a NBR 16697 (ABNT, 2018) estabelece sua classe de resistência em 25, 32 e 40 MPa. Além da sua composição em massa de 45 a 85% de clínquer e sulfatos de cálcio, material pozolânico variando entre 15 e 50% e fíler entre 0 e 10%. O CP IV ainda pode possuir baixo calor de hidratação e ser resistente a sulfatos desde que atenda aos requisitos estabelecidos em norma, além dos requisitos para seu tipo e classe originais. O cimento Portland pozolânico pode ser aplicado em argamassas e concretos para meios agressivos, como esgotos e ambientes marinhos, em concretos com agregados reativos e em concreto-massa.

### **2.2.5. Cimento Portland de Alta Resistência Inicial – CP V-ARI**

Como o próprio nome diz, o cimento de alta resistência inicial, desenvolve resistência mais rápido e deve, portanto, ser descrito como um cimento de alta resistência inicial. A velocidade com que o cimento endurece não deve ser confundida com a velocidade de pega, já que o cimento comum e o de alta resistência inicial possuem tempo de pega semelhantes. O aumento na velocidade de ganho da resistência do cimento Portland de alta resistência inicial é obtido por meio de um teor mais elevado de  $C_3S$  e pela maior moagem do clínquer, gerando uma maior finura. Os valores de finura são acordados entre produtor e usuário (NEVILLE, 2016).

De acordo com Neville (2016), o cimento Portland de alta resistência inicial é mais fino que o cimento Portland comum, a maior finura aumenta significativamente a resistência entre 10 e 20 horas, e continua aumentando até os 28 dias. Em condições de cura úmida, as resistências equiparam entre dois e três meses, e na continuação os cimentos de menor finura superam os menos finos. Tal comportamento não deve ser extrapolado a cimentos de finura muito elevada, o que pode causar um aumento na quantidade de água na mistura. Resultando numa maior relação água/cimento e diminuindo os benefícios da maior finura em relação à resistência inicial.

O CP V-ARI que possui norma separada do cimento Portland comum dentro da ABNT (antes da unificação era normalizado pela NBR 5733 (ABNT, 1991)), é uma variação do CP I, que tem como característica atingir altas resistências iniciais logo nos primeiros dias de aplicação (ABCP, 2002). Dentro da NBR 16697 (ABNT, 2018) a composição em massa do CP V-ARI é de 90 a 100% de clínquer e sulfatos de cálcio além de permitir a uma adição de 0 a 10% de fíler.

Indicado em casos que o rápido desenvolvimento da resistência inicial é exigido, como na remoção antecipada das fôrmas para reutilização ou quando um valor de resistência é necessário para dar continuidade à obra o mais rápido possível. Como possui uma alta taxa de liberação de calor de hidratação, o cimento Portland de alta resistência inicial não deve ser utilizado em construções de concreto massa ou em grandes seções estruturais. Porém em construções a baixas temperaturas, pode ser interessante a sua utilização a fim de combater os danos do congelamento precoce. Ainda é recomendado no preparo de concreto e argamassa para produção

de artefatos de cimento como blocos para alvenaria, blocos para pavimentação, tubos, lajes, meio-fio, postes, elementos arquitetônicos pré-moldados e pré-fabricados.

### **2.2.6. Cimento Portland Resistente a Sulfatos**

No cimento endurecido, o aluminato de cálcio hidratado pode reagir de modo semelhante com sulfatos existentes no meio externo (NEVILLE, 2016). O resultado da reação é a formação de sulfoaluminato de cálcio no interior da estrutura da pasta de cimento hidratada. Como a fase sólida tem volume de 227% maior, ocorre a desagregação progressiva do concreto. Um segundo tipo de reação é a que ocorre devido à troca de base entre o hidróxido de cálcio e os sulfatos, resultando na formação de sulfato de cálcio e no aumento de 124% do volume da fase sólida (NEVILLE, 2016). Tais reações são conhecidas como ataque por sulfatos, e os sais mais ativos são o sulfato de magnésio e o sulfato de sódio. O ataque a sulfatos é bastante acelerado quando acompanhado por ciclos de secagem e molhagem.

A solução está na utilização de cimentos com baixo teor de aluminato tricálcico ( $C_3A$ ), denominado cimento Portland resistente a sulfatos. Nos Estados Unidos, cimento resistente a sulfatos é identificado como Tipo V e é normalizado pela ASTM C 150 (2009), norma que limita o teor de  $C_3A$  a 5%, e o valor da soma de teor de ferroaluminato tetracálcico ( $C_4AF$ ) com o dobro do teor de  $C_3A$  é limitado a 25%, já o teor de magnésio é limitado a 6%. Um ponto a ser destacado é que o uso de cimento resistente a sulfatos pode ser descartado se existir o risco de ter a presença de íons de cloreto no concreto armado ou com outro tipo de aço no interior. A explicação é que o  $C_3A$  fixa os íons cloreto, formando cloroaluminato de cálcio, dessa forma os íons não estariam disponíveis para iniciar a corrosão do aço (NEVILLE, 2016).

No Brasil a norma que regulamentava os cimentos resistentes a sulfatos antes da unificação era a NBR 5737 (1992). São considerados cimentos resistentes a sulfatos os cimentos que apresentam teor de  $C_3A \leq 8\%$  e teor de adições carbonáticas  $\leq 5\%$  da massa do aglomerante total; cimentos Portland de alto-forno cujo teor de escoria esteja entre 60 e 70%; cimento Portland pozolânicos cujo teor de materiais pozolânicos esteja entre 25 e 40%; cimentos que tenham antecedentes com base em resultados de ensaios de longa duração ou referências de obras que

comprovadamente indiquem resistência a sulfatos. Os cimentos Portland que são considerados resistentes a sulfatos são designados pela sigla original de seu tipo, acrescida de “RS”.

### **2.2.7. Cimento Portland de Baixo Calor de Hidratação**

O aumento de temperatura no interior de uma grande massa de concreto devido à liberação de calor de hidratação do cimento, aliado à baixa condutividade térmica do concreto, pode causar uma grave fissuração. Devido a isso, é importante controlar a taxa de liberação de calor do cimento utilizado nessas estruturas, a fim de promover a dissipação da maior parte do calor, resultando em menor elevação da temperatura. Produzido inicialmente nos Estados Unidos os cimentos com essas características eram utilizados em grandes barragens de gravidade, e ficaram conhecidos como cimento Portland de baixo calor de hidratação (NEVILLE, 2016).

O cimento Portland de baixo calor de hidratação não tem sido utilizado nos Estados Unidos, outros meios foram empregados para tratar da geração excessiva de calor de hidratação, como uso de cinza volante ou pozolana e um baixo consumo de cimento. No Brasil, o cimento de baixo calor de hidratação estabelece que os cimentos normalizados podem ser considerados como de baixo calor de hidratação, desde que o valor máximo de calor de hidratação seja 270 J/g em 41h de ensaio. Esses cimentos são designados pela sigla e pela classe original do seu tipo, acrescidas de “BC”. Para determinação do calor de hidratação é utilizado o método da garrafa de Langavant, normalizado pela NBR 12006 (ABNT, 1990).

## **2.3 Aditivos Plastificantes**

Os tensoativos, também conhecidos como surfactantes, abrangem os aditivos normalmente utilizados para a incorporação de ar ou redução da água nas misturas de concreto. Os aditivos redutores de água são aqueles que reduzem o teor de água necessário para produzir um concreto ou argamassa com uma determinada consistência. De acordo com Metha e Monteiro (2014) os surfactantes usados como aditivos plastificantes são sais, modificações e derivados de ácidos lignossulfônicos,

ácidos carboxílicos hidroxilados e polissacarídeos ou qualquer combinação dos três, com ou sem outros constituintes secundários.

A NBR 11768 (2019) define aditivo plastificante como produto que modifica a consistência do concreto, aumentando o abatimento e a fluidez, sem alterar a quantidade de água na mistura; aditivo que produz esses dois efeitos de forma simultânea. Bauer (2019) define os plastificantes e demais aditivos redutores de água, o foco entre as propriedades dos aditivos é forte sobre as propriedades de redução de água e cimento, mas duas propriedades devem ser ressaltadas, o aumento do tempo de trabalhabilidade e a capacidade dos aditivos de promover melhores condições de hidratação do cimento, gerando concretos e argamassas de maior regularidade e possivelmente de maior resistência mecânica.

Segundo Neville (2016), a influência dos aditivos redutores de água em alguns cimentos é muito pequena, no entanto, em linhas gerais, os aditivos são eficazes com todos os tipos de cimento Portland. A eficiência de qualquer aditivo plastificante depende do teor de água e cimento, do tipo de agregado utilizado, da presença de incorporadores de ar ou de adições, e temperatura. Por consequência, devem ser realizados ensaios prévios com os materiais a serem utilizados para a determinação do tipo e da quantidade de aditivo para obtenção do melhor desempenho, ou seja, os dados dos fabricantes não devem ser aceitos sem comprovação.

### **2.3.1. Plastificante de 1ª geração**

Os aditivos de 1ª geração são compostos por lignosulfonatos têm sua dosagem limitada, já que dependendo do nível retardamento alcançando podem inibir a pega do cimento. Além de ser uma das bases mais utilizadas como plastificantes de 1ª geração, outra característica é o aumento da presença de ar incorporado no concreto, que pode ser responsável pela redução de resistência mecânica (BAUER, 2019). Em contrapartida, a incorporação de ar melhora a trabalhabilidade e pode ser contrabalançada pela inclusão de uma pequena quantidade de um agente desincorporador ao aditivo redutor de água. Os aditivos à base de lignosulfonato podem aumentar a retração, enquanto outros aditivos redutores de água podem não incitar esse efeito (NEVILLE, 2016).

O aditivo de 1ª geração é adicionado durante o processo de mistura do concreto fresco para aumentar a plasticidade do concreto mantendo o fator água/cimento, ou para reduzir a quantidade de água para obtenção de um concreto com a consistência e/ou relação água/cimento especificados. São aconselhados para concretos usinados em centrais dosadoras e misturadoras, e podem ser compostos por outros aditivos em um único produto (BAUER, 2019).

O plastificante de 1ª geração pode atuar no concreto em seus estados frescos estabelecendo um controle de tempo de pega do concreto, melhorando a trabalhabilidade, vibração e bombeamento; gerando uma redução na temperatura do concreto massa durante o período de hidratação, já que o consumo de cimento é menor. Além de permitir uma menor exsudação se comparada à do concreto sem aditivo e retardar a pega em dosagens altas. Já no estado endurecido do concreto, o plastificante melhora a hidratação do cimento, proporciona uma maior resistência mecânica, menor índice de fissuras de retração e também ajuda a reduzir as porosidades no concreto.

### **2.3.2. Plastificante de 2ª geração**

Os plastificantes de 2ª geração são compostos de sais sulfonados de naftaleno e formaldeído, geralmente chamados de naftaleno sulfonato ou somente de naftaleno. Estes compostos não incorporam o ar e quase não influenciam no tempo de pega do cimento (TUTIKIAN e MOLIN, 2008). Ainda de acordo com Tutikian e Molin (2008), o aditivo a base de naftaleno é conhecido comercialmente como aditivo superplastificante de 2ª geração e pode ajudar na redução de até 25% da quantidade de água da mistura quando usado como redutor de água.

Uma característica do superplastificante a base de formaldeído-naftaleno sulfonato é proporcionar maior redução de água quando comparado com o lignossulfonato, além de melhorar a trabalhabilidade e aumentar a consistência do concreto (NEVILLE e BROOKS, 2013). Porém, o tempo de manutenção da consistência é curto, em média 30 minutos, podendo reduzir conforme o aumento da temperatura do concreto. Em concretos usinados, o plastificante de 2ª geração, usualmente, é adicionado no momento da aplicação, acumulando com o plastificante

de 1ª geração já adicionado ao concreto na central. Quando utilizado em pré-moldados, o superplastificante é adicionado no processo de mistura de todos os materiais (BAUER, 2019).

Segundo Bauer (2019) no estado fresco do concreto o plastificante de 2ª geração ajuda a melhorar a dispersão e distribuição de aglomerantes (cimento + adição mineral), a reduzir o consumo de água para abatimentos superior a 120mm, a melhorar a trabalhabilidade, vibração e bombeamento. Ainda aumenta a produtividade no bombeamento e lançamento; além de diminuir a retração plástica. Depois de endurecido o aditivo ainda ajuda a melhorar a hidratação do cimento, na diminuição da porosidade e na retração por secagem, e ainda contribui para uma maior resistência mecânica inicial e final.

### **2.3.3. Plastificante de 3ª geração**

O plastificante de 3ª geração, também é conhecido como hiperplastificante ou superplastificante tipo II, devido a sua grande capacidade de reduzir o consumo de água. Isso acontece porque os superplastificantes tradicionais são fundamentados em polímeros que as partículas de cimento absorvem e que ficam acumuladas na sua superfície. Esses polímeros aumentam a carga negativa do cimento, fazendo que suas partículas se dispersem por repulsão estática, requerendo menos água para aumentar a fluidez da pasta (METHA e MONTEIRO, 2014). A NBR 11768 (2019) define o plastificante de 3ª geração como aditivo que proporciona uma grande redução de água de um concreto sem modificar a sua consistência no estado fresco, permitindo um considerável aumento no abatimento e fluidez.

Os efeitos do superplastificante a base de éter policarboxilato sobre o concreto são mais efetivos que os plastificantes de 1ª e 2ª geração dada a sua grande capacidade de dispersão. No estado fresco do concreto, ele pode reduzir em mais de 30% o consumo de água, possibilitando a produção de concreto autoadensável; a reduzir o consumo de cimento e o calor de hidratação e podendo até extinguir a exsudação. Após o endurecimento, ele ajuda a proporcionar uma alta resistência mecânica inicial e final, e aumento da durabilidade do concreto (BAUER, 2019).

## 2.4 Reologia

É uma parte da física que pesquisa as propriedades e o comportamento mecânico dos corpos deformáveis que não são líquidos e nem sólidos. Na engenharia civil, temos a necessidade de tratar tanto os sólidos quanto os fluídos, visto que boa parte dos materiais de construção, como é o caso do concreto, são processados no local de aplicação enquanto estão fluídos e permitem uma melhor trabalhabilidade. A reologia pode ser utilizada como instrumento de verificação do comportamento do concreto em estado fresco e permite amplo conhecimento da alteração proveniente da hidratação em avanço para o estado endurecido.

De forma resumida, os parâmetros envolvidos a reologia são a tensão e taxa de cisalhamento e a viscosidade. Para a definição de parâmetros reológicos, quanto maior a superfície específica de um cimento, maior será a quantidade de partículas em contato com a água, com isso diminui-se a distância e aumenta a frequência de colisão entre elas, fazendo com que seja reduzida a tensão de escoamento e aumentada a viscosidade da mistura (TUTIKIAN e MOLIN, 2008). Ainda hoje, mesmo verificando as características de um tipo de cimento ou de um tipo plastificante, não é possível falar qual o comportamento reológico esperado em misturas com o fator água/cimento baixos.

A condição de aglomeração/dispersão dos materiais cimentícios que podem ser avaliados pelos parâmetros reológicos principais, reflete diretamente na microestrutura da pasta quando em estado endurecido, e, portanto, sobre a durabilidade da estrutura do concreto. Logo é necessário realizar caracterizações reológicas prévias do concreto para se ter informações sobre o seu comportamento durante o seu uso. Com isso o comportamento reológico dos concretos deve, conseqüentemente, ser ajustado as variadas técnicas de aplicação, tal como lançamento, bombeamento, compactação a rolo, etc., visando as diferentes solicitações físicas requisitadas entre as mesmas (FILHO, CINCOTTO e PILEGGI, 2007).

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 Materiais

Para hidratação dos modelos experimentais propostos foi utilizada água destilada. Foram utilizados os cimentos Portland tipo CP II-E, CP III, CP IV e CP V-ARI da marca Nacional. As principais propriedades físicas do cimento empregado são apresentadas na Tabela 1.

Tipo de cimento	Área Específica (cm <sup>2</sup> /g)	Massa Específica (g/cm <sup>3</sup> )	Finura pela peneira 45 µm (%)	Início de pega (min)	Fim de pega (min)
CP II-E	4,189 ± 198	3,05	3,55 ± 0,44	208 ± 27	268 ± 27
CP III	3,983 ± 146	2,93	9,29 ± 1,42	201 ± 8	241 ± 9
CP IV	4,048 ± 98	3,02	3,69 ± 0,76	229 ± 36	289 ± 36
CP V-ARI	4,609 ± 84	3,12	1,73 ± 0,14	125 ± 17	185 ± 17

Tabela 1- Especificações dos tipos de cimentos utilizados fornecidos pelo fabricante de cimento Portland

Os 3 aditivos utilizados nos experimentos foram os fabricados pela empresa MC-Bauchemie. O aditivo 1<sup>a</sup> geração (lignosulfonatos de sódio) foi o Muraplast FK 93, o de 2<sup>a</sup> geração (condensado de formaldeído sulfonato de naftaleno) foi o Muraplast FK 22 e o de 3<sup>a</sup> geração (polycarboxilato éter) foi escolhido o MC-PowerFlow 4001. Na Tabela 2 estão dosagens mínimas e máximas recomendadas pelo fabricante sobre o peso do cimento.

Dosagens Recomendadas		
Aditivo	Mínima	Máxima
Muraplast FK 93	0,2%	1,0%
Muraplast FK 22	0,2%	3,0%
MC-PowerFlow 4001	0,2%	5,0%

Tabela 2 - Dosagens mínimas e máximas de aditivos recomendados pelo fabricante

## **3.2 Metodologia**

Conforme metodologia adaptada de Aïtcin (2000), as dosagens iniciais para todas as três gerações de plastificantes seriam fixadas em 0,4; 0,6; 0,8; 1,0; 1,2; 1,4% de aditivo em relação a massa de cimento e com uma relação água / cimento fixa em 0,35. Porém como a proposta de Aïtcin (2000) era adequada para concretos de elevado desempenho, tais dosagens só foram convenientes para as dosagens com o aditivo plastificante de 3ª geração. Por meio de testes experimentais foi verificado que para a obtenção das curvas de calibração dos aditivos de 1ª e 2ª geração, seriam mais adequadas as dosagens serem fixadas em 8,0; 9,0; 10,0; 11,0; 12,0; 13,0% de aditivo em relação a massa de cimento, para os ensaios utilizados no estudo. Os 3 (três) aditivos foram testados em diferentes dosagens em todos os 4 tipos de pastas de cimento (72 combinações) e submetidos aos ensaios propostos.

### **3.2.1. Ensaio de Fluidez**

O ensaio de fluidez trata-se de um ensaio monoponto que possui como parâmetro reológico que faz uso do viscosímetro Ford (Figura 1). Esta metodologia foi adaptada do protocolo proposto por Aïtcin (2000) e o objetivo foi a obtenção do ponto de saturação de aditivo por meio de elaboração de curvas do teor de aditivo versus tempo de escoamento. O protocolo foi aplicado para todas as pastas de cimento. Este ensaio possui uma única taxa de cisalhamento (monoponto) permitindo a avaliação qualitativa de um único parâmetro reológico: a viscosidade.

Protocolo de realização do método:

1. Fixar a relação água / cimento;
2. Determinar as variações de dosagem de aditivos;
3. Preparar e pesar o material;
4. Introduzir do cimento progressivamente em um recipiente (Figura 3) com o misturador (Figura 2) ligado durante o tempo de 1 minuto e 20 segundos;
5. Fazer pausas de 10 segundos a cada 20 segundos;

6. Preencher o viscosímetro Ford completamente;
7. Medir o tempo de escoamento das pastas de cimento com cada teor de aditivo;
8. Construir a curva de tempo de escoamento em função de cada dosagem de aditivo e determinar o ponto de saturação;



Figura 1 - Viscosímetro Ford



Figura 2 - Misturador / mixer manual



Figura 3 - Recipiente utilizado para fazer as pastas

### 3.2.2. Ensaio de mini-abatimento

Usualmente, o mini-abatimento, vem sendo utilizado para verificar as alterações de consistência, fluidez e trabalhabilidade da pasta de cimento (SOARES, CALIXTO e LADEIRA, 2019). Neste projeto, o referido ensaio será adaptado da metodologia de Kantro (1980) e faz uso de um minicone, como apresentado na Figura 4, e será realizado afim de se avaliar a propagação de espalhamento da pasta medido por paquímetro para construção de curvas de teor de aditivo versus espalhamento da pasta. Este ensaio possui uma única taxa de cisalhamento (monoponto) permitindo a avaliação qualitativa de um único parâmetro reológico: o limite de escoamento.

Protocolo de realização do método:

1. Fixar a relação água / cimento;
2. Determinar as variações de dosagem de aditivos;

3. Preparar e pesar o material;
4. Introduzir do cimento progressivamente em um recipiente (Figura 3) com o misturador (Figura 2) ligado durante o tempo de 1 minuto e 20 segundos;
5. Pausar o misturar por 10 segundos a cada 20 segundos;
6. Preencher o minicone (Figura 4) e após essa ação nivelar a pasta antes de levantá-lo;
7. Medir o diâmetro da pasta espalhada em duas direções e calcular a média;
8. Medir, para as diferentes quantidades de aditivos e tempo, o diâmetro de espalhamento;
9. Construir a curva de distribuição em centímetros do mini-abatimento em função de cada dosagem de aditivo plastificante.



Figura 4 – Minicone utilizado nos ensaios



Figura 5 - Paquímetro

### 3.2.3. Ensaio de índice de consistência

O ensaio de índice de consistência será realizado conforme a NBR 13276 (ABNT, 2016) adaptada, medindo-se o espalhamento de cada pasta de cimento após 30 golpes na mesa de fluxo. Tal ensaio faz uso de um minicone e uma mesa de fluxo para sua execução e será realizado a fim de se avaliar a propagação de espalhamento da pasta, após os 30 golpes, medido por paquímetro para construção de curvas de

teor de aditivo versus espalhamento da pasta. Este ensaio possui mais de uma taxa de cisalhamento (multiponto) permitindo a avaliação qualitativa de dois parâmetros reológicos: o limite de escoamento e tensão de cisalhamento.

Protocolo de realização do método:

1. Fixar a relação água / cimento;
2. Determinar as variações de dosagem de aditivos;
3. Preparar e pesar o material;
4. Introduzir do cimento progressivamente em um recipiente (Figura 3) com o misturador (Figura 2) ligado durante o tempo de 1 minuto e 20 segundos;
5. Pausar o misturador por 10 segundos a cada 20 segundos;
6. Preencher o minicone (Figura 4) e após essa ação nivelar a pasta antes de levantá-lo na mesa de fluxo (Figura 6);
7. Realizar 30 golpes na mesa de fluxo com a pasta de cimento;
8. Medir o diâmetro da pasta espalhada em duas direções e calcular a média;
9. Medir, para as diferentes quantidades de aditivos, o diâmetro de espalhamento;
10. Construir a curva de distribuição em centímetros do espalhamento em função de cada dosagem de aditivo plastificante.



Figura 6 - Mesa de fluxo

## **4 RESULTADOS**

### **4.1. Ensaio de Fluidiez**

#### **4.1.1. Pasta de cimento com plastificante de 1ª geração**

Na Figura 7 são apresentados os dados referentes ao ensaio de fluidez das pastas de cimento Portland com aditivos de 1ª geração. Foi possível observar que todos os cimentos tiveram tendência de performance distintas, e em particular o cimento CPV se destacou por não escoar em nenhuma das dosagens avaliadas.

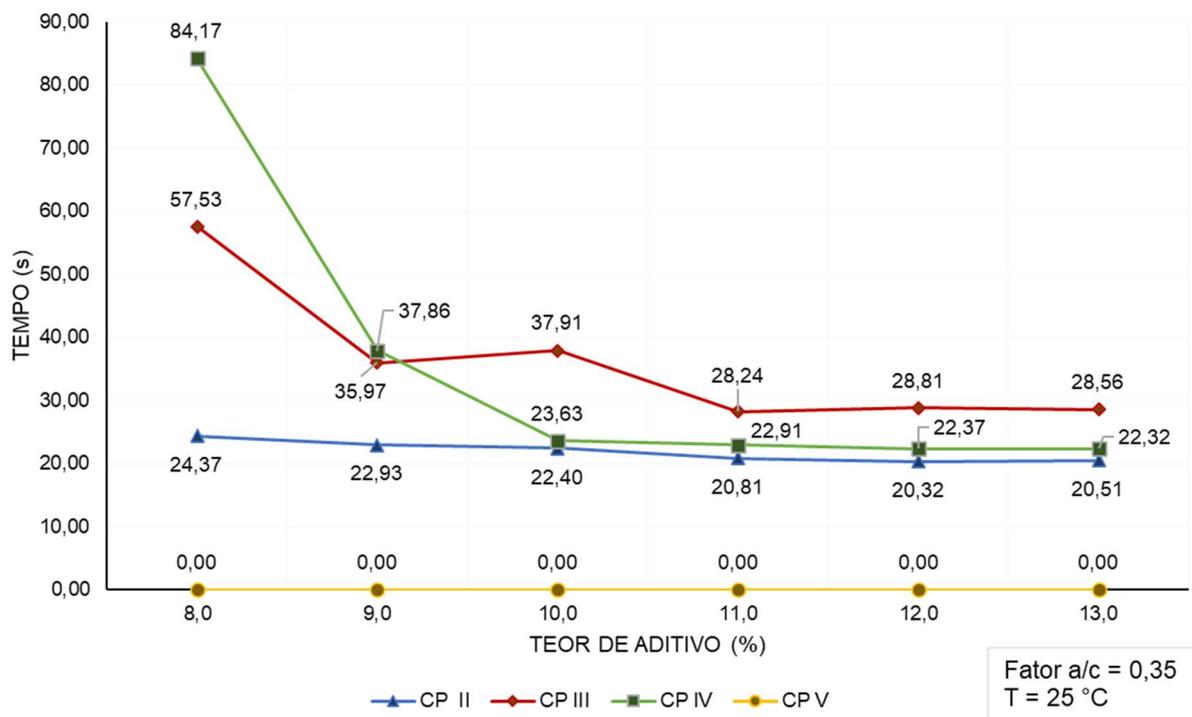


Figura 7 - Gráfico com ensaio de fluidez com plastificante de 1ª geração

Já o cimento CP IV precisou de mais de 80 segundos para escoar completamente com a adição de 8% do aditivo de 1ª geração. Enquanto isso a pasta com CP II precisou de pouco mais de 24 segundos, ou seja, cerca de 3 vezes mais rápido que a pasta composta por CP IV e plastificante de 1ª geração. O ponto de saturação também é mais baixo na pasta de CP II, ficando na casa dos 20 segundos. Com isso notamos que o plastificante de 1ª geração se mostra mais eficiente em dispersar as partículas quando aplicado junto ao CP II. Os pontos de saturação do primeiro ensaio alcançados nas pastas com CP II, CP III e CP IV foram idênticos, sendo necessário um teor de aditivo igual a 11%. Apesar dos cimentos CP II e CP III utilizados na pesquisa, possuem pontos de saturação iguais, suas performances de escoamento foram distintas, devido as suas características físicas. Em contrapartida, os cimentos CP II e CP IV, performaram de maneira similar em relação ao tempo de escoamento, devido as suas características físicas similares, como finura e massa específica.

Já a combinação da pasta feita com o cimento CP V com o aditivo de 1ª geração não escoou através do viscosímetro Ford em nenhuma das dosagens propostas. Observou-se ainda que nas últimas dosagens essa pasta apresentou determinada

exsudação, mas ainda assim sem escoamento na abertura de 4mm do viscosímetro. Ainda foi testado com a adição de 15% do aditivo, mas continuou sem escoar. Tal fato pode estar relacionado a superfície específica do CP V utilizado, que de acordo com o fabricante é de 4,609 cm<sup>2</sup>/g, aliado ao baixo fator água / cimento com um plastificante com baixa eficiência de dispersão de partículas, gerando um produto que não possui água suficiente para envolver toda as superfícies dos grãos, a ponto de proporcionar uma fluidez adequada para escoar na abertura de 4mm do viscosímetro.

#### 4.1.2. Pasta de cimento com plastificante de 2<sup>o</sup> geração

No ensaio de fluidez com o aditivo de 2<sup>a</sup> geração, todas as pastas apresentaram performance de escoamento semelhante e fluíram através do viscosímetro Ford com tempos próximos, apesar de possuírem características físicas e químicas distintas, como apresentado na Figura 8. Para o fator água / cimento utilizado, todas as pastas tiveram seu ponto de saturação alcançado com adição de 11% do aditivo plastificante de 2<sup>a</sup> geração.

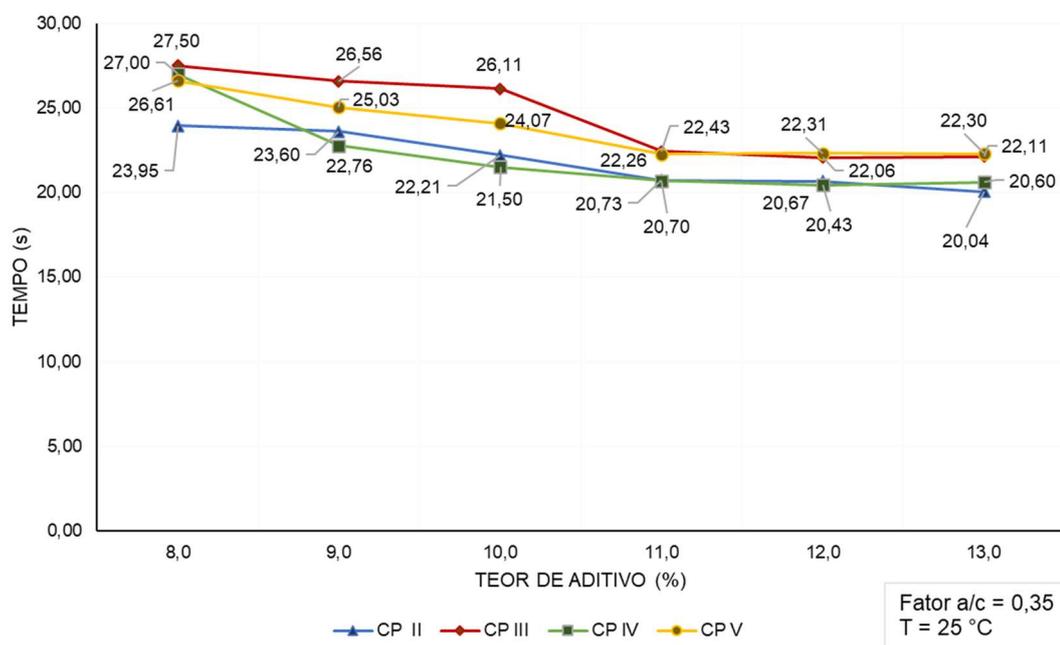


Figura 8 - Gráfico com ensaio de fluidez com plastificante de 2<sup>a</sup> geração

Com os teores de aditivos testados para o fator água/cimento igual a 0,35 a pasta feita com CP V passou a escoar completamente sem bloquear a passagem no viscosímetro, fato que era observado nos ensaios feitos com o plastificante de 1<sup>a</sup>

geração. Além de mostrar um melhor desempenho na pasta com CP V, o tempo de escoamento das pastas feitas com CP III e CP IV tiveram o tempo da primeira medida reduzidos em 3 vezes com a adição do plastificante de 2ª geração.

#### 4.1.3. Pasta de cimento com plastificante de 3ª geração

Devido ao poder dispersante mais intenso dos plastificantes de 3ª geração os teores de aditivos adicionados as pastas foram diferentes dos demais ensaios, como pode ser observado na Figura 9. Todos os cimentos performaram em tempos de escoamento distintos, evidenciando a necessidade do estudo da reologia desse material nesse tipo de combinação. Novamente a pasta com CP II alcançou de maneira geral os menores tempos de escoamento, sendo condizente com o seu comportamento com os demais aditivos.

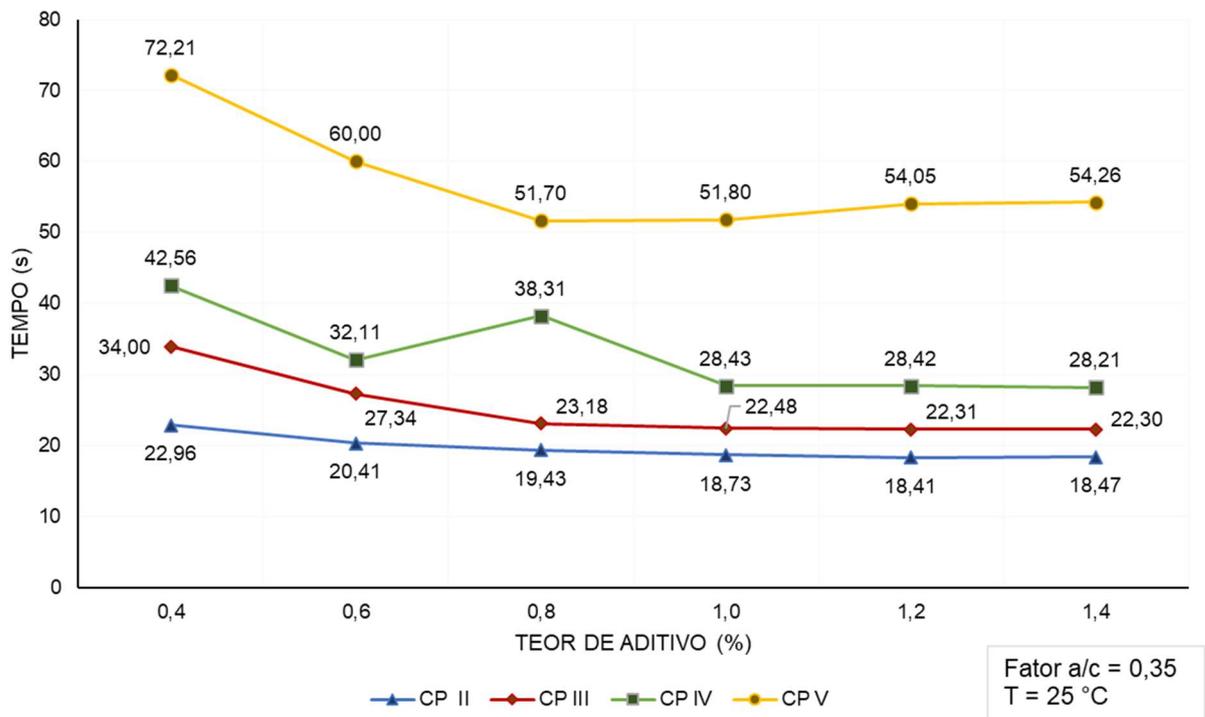


Figura 9 - Gráfico com ensaio de fluidez com plastificante de 3ª geração

O tempo de escoamento foi menor nas pastas com CP II, tendo o ponto de saturação alcançado em 18 segundos. Durante o ensaio com a pasta composta com CP IV, foi observado um aumento do tempo com a adição de 0,8%, mas que normalizou e voltou a cair o tempo, até se estabilizar em 28 segundos. Os pontos de saturação das pastas com CP II, CP III e CP IV foram alcançados na adição de 1,0%

do aditivo plastificante de 3ª geração. Gurgel Pinto (2007), evidencia em sua pesquisa resultado similar ao que foi encontrado durante os experimentos com plastificantes de 3ª geração, indicando que o superplastificante resultou em maior dispersão das partículas de cimento Portland, aumentando a fluidez das pastas.

Com os resultados foi possível observar que não foi obtida a mesma eficiência de escoamento da pasta de CP V quando adicionado o plastificante de 3ª geração quando comparado ao plastificante de 2ª geração, onde os tempos de escoamento teve um aumento com os teores de 1,2% e 1,4% dos teores de aditivo, após ter alcançado o menor tempo com a adição de 0,8%. O que pode ser relacionado a área específica do cimento já que ele possui a maior dentre os tipos utilizados nos ensaios, e diferente do que aconteceu com o aditivo de 1ª geração, o plastificante a base de policarboxilato tem maior eficiência dispersante e permitiu que a pasta com CP V escoasse por completo mesmo sendo combinada com um fator água / cimento e teor de aditivo baixo.

Diferente dos ensaios com plastificantes com 1ª e 2ª geração, a pasta com CP IV precisou de mais tempo para escoar por completo em seu ponto de saturação, quando comparado com a pasta com CP III, mesmo tendo características físicas semelhantes. Tendo o mesmo tipo de adição na composição dos cimentos, as pastas com CP II e CP III, performaram de formas parecidas ao ensaio com aditivo de 2ª geração, alcançando tempos de escoamento próximos.

## **4.2. Ensaio mini-abatimento**

### **4.2.1. Pasta de cimento com plastificante de 1º geração**

De maneira geral, as pastas com cimento Portland, tiveram uma evolução similar de espalhamento de acordo com a dosagem de aditivo. As pastas compostas de CP II, CP IV e CP V tiveram espalhamentos similares, quando comparados ao CP III, que teve maiores diâmetros de espalhamento, como é mostrado no gráfico, representado pela Figura 10.

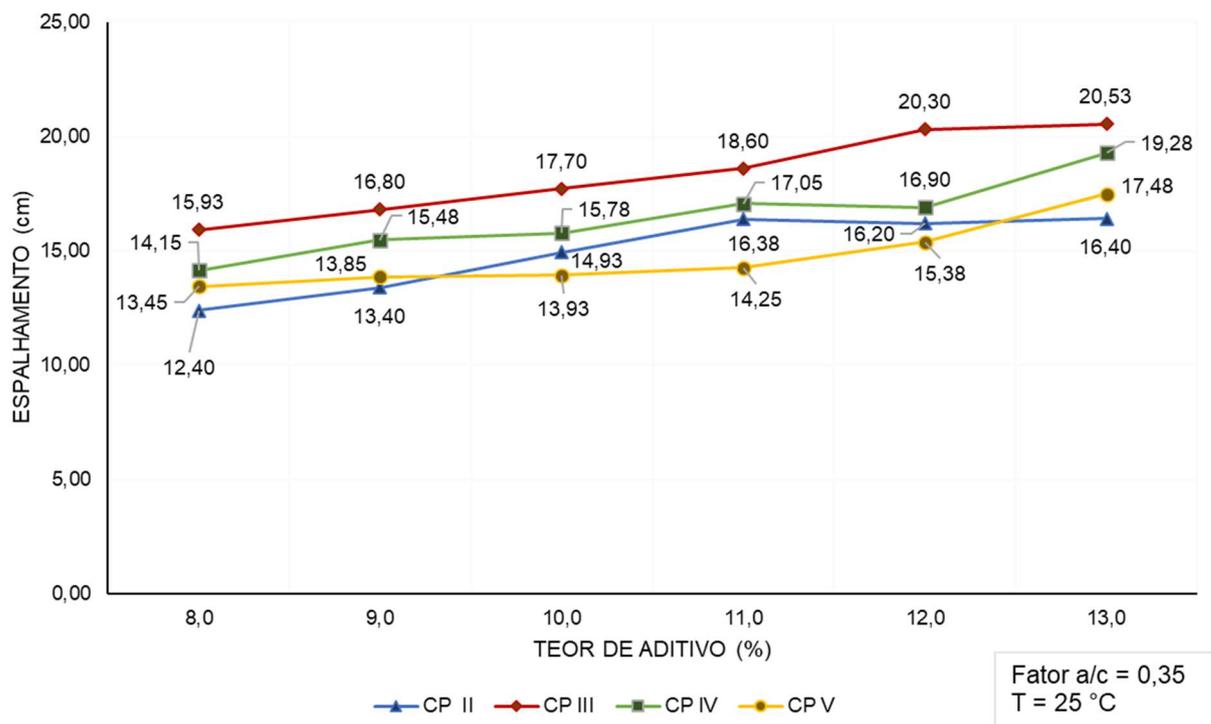


Figura 10 - Gráfico com ensaio de mini-abatimento com plastificante de 1ª geração

Além disso podemos observar maior eficiência de dispersão de partículas do plastificante de 1ª geração quando adicionadas nas pastas com CP III, fazendo com que tenha um maior espalhamento em todos os seus pontos. Esse fato pode ser justificado pela finura dos grãos da pasta, viabilizando um abatimento mais amplo. A estabilização do espalhamento se deu a partir da adição de 12% do plastificante fazendo com que o diâmetro médio fosse 32% maior que o diâmetro da pasta de CP V no mesmo ponto.

Como visto no ensaio de fluidez, as pastas com CP II e IV tiveram sua estabilidade com adição de 11% do plastificante. Performaram de formas parecidas durante o ensaio, que pode ser justificado devido a finura dos grãos de cimento apresentadas pelo fabricante. Foi possível notar um aumento expressivo do espalhamento no último ponto de ensaio com a pasta com CP IV, mostrando que o teor de aditivo utilizado no último ponto aumentou a saturação da pasta, permitindo um maior aumento do seu espalhamento. A pasta com CP V manteve a estabilidade de espalhamento com a adição de 10% do aditivo, e após foi observado o mesmo fato ocorrido com a pasta com CP IV.

Na Figura 11 são apresentadas as imagens das pastas com as dosagens referentes aos pontos de saturação. Observa-se maior consistência das pastas com CP II, CP IV e CP V, que confirma os resultados apontados no gráfico que indicam que as pastas com CP III apresentam de forma menos viscosa, fato que pode ser justificado pela sua área específica, já que dos tipos de cimentos utilizados, ele é que possui a menor, fazendo com que suas partículas tenham menor contato com a água.

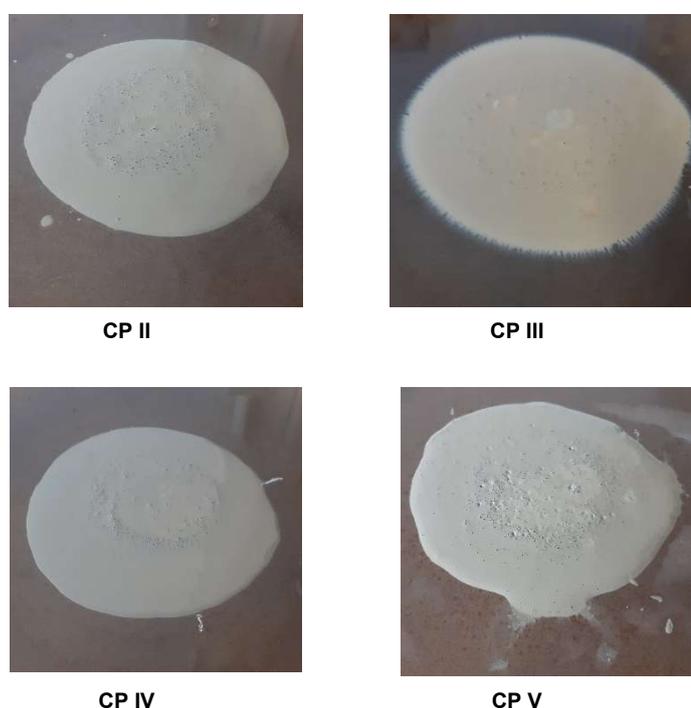


Figura 11 - Imagens dos espalhamentos nos pontos de saturação no ensaio de mini-abatimento com aditivo de 1ª geração

#### **4.2.2. Pasta de cimento com plastificante de 2º geração**

Diferente do que foi observado nas pastas com plastificante de 1ª geração, onde foi visto uma variação nos diâmetros de espalhamento, as pastas com os plastificantes de 2ª geração tiveram uma uniformidade em seu espalhamento. Os desempenhos das pastas de cimento Portland perante o abatimento são apresentados no gráfico abaixo, representado pela Figura 12.

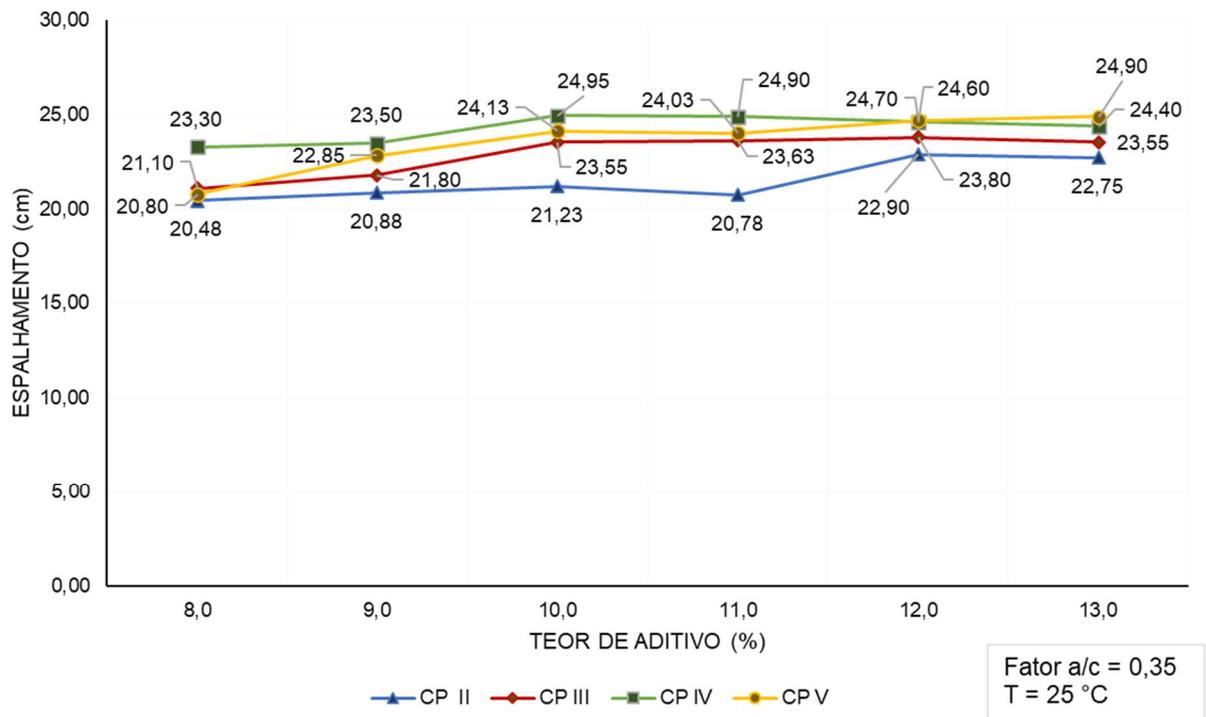


Figura 12 - Gráfico com ensaio de mini-abatimento com plastificante de 2ª geração

Observamos que a adição de plastificante de 2ª geração se mostrou mais eficiente na dispersão de partículas do que plastificante de 1ª geração em todas as pastas fazendo com que o espalhamento fosse maior em todos seus pontos. A estabilização do espalhamento se deu com a adição de 12% de aditivo na pasta com CP II, e nas demais pastas o ponto de saturação foi alcançado com a adição de 10%. Diferente do que foi observado nos ensaios com CP IV e CP V e a 1ª geração do aditivo, não vemos um pico no aumento do espalhamento, mas é notável o aumento nos diâmetros de espalhamento, tendo uma diferença de mais de 40% entre o ponto de saturação no ensaio com a 1ª geração do aditivo e a 2ª, com a pasta de CP IV, e uma diferença de mais de 70% com a pasta de CP V entre os pontos de saturação nos dois ensaios. Ou seja, além de ter maior eficiência dispersante, as combinações se mostraram mais estáveis não permitindo uma saturação excessiva ao final dos ensaios.

Na Figura 13, são apresentadas as imagens das pastas com os teores de aditivos referentes ao ponto de saturação. Observa-se maior consistência das pastas com os cimentos CP II, CP III e CP V, o que corrobora com os dados apresentados

no Figura 12. Apesar de possuírem características físicas semelhantes ao CP II, a pasta com CP IV, teve menor viscosidade visualmente, apresentando-se uma forma mais fluida e pequenos pontos de exsudação nas bordas, se mantendo assim mesmo após atingir o ponto de saturação.

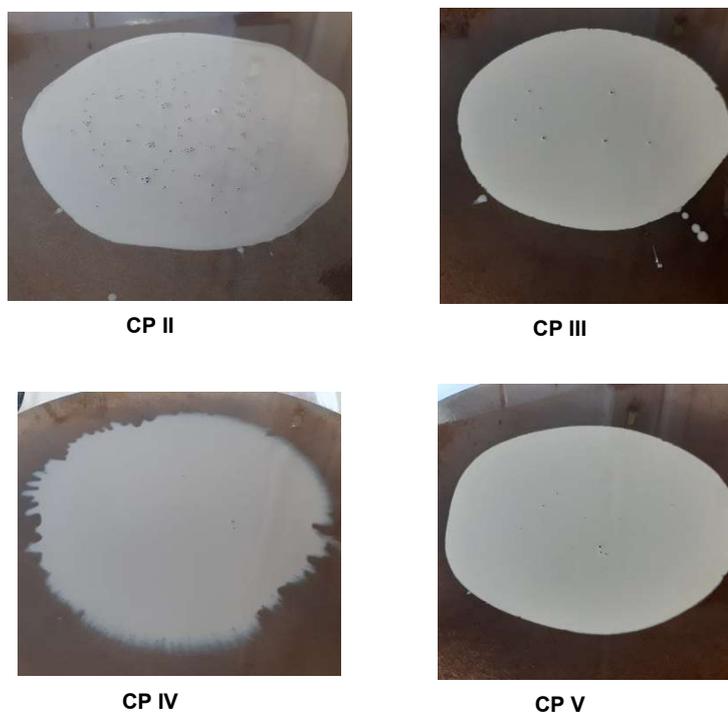


Figura 13 - Imagens dos espalhamentos nos pontos de saturação no ensaio de mini-abatimento com aditivo de 2ª geração

#### **4.2.3. Pasta de cimento com plastificante de 3º geração**

Como observamos no gráfico mostrado na Figura 14, a pasta com CP III chegou a um diâmetro maior que as demais em todos os pontos observados, ou seja, o aditivo de 3ª geração teve maior eficiência dispersante quando adicionado à pasta com esse tipo de cimento Portland. No primeiro ponto do gráfico, com adição de um teor de 0,4% de aditivo nas pastas, foi observado uma diferença de 38% do diâmetro médio entre as pastas compostas pelo CP III e V, e chegando 2% com o teor de 1% do aditivo plastificante.

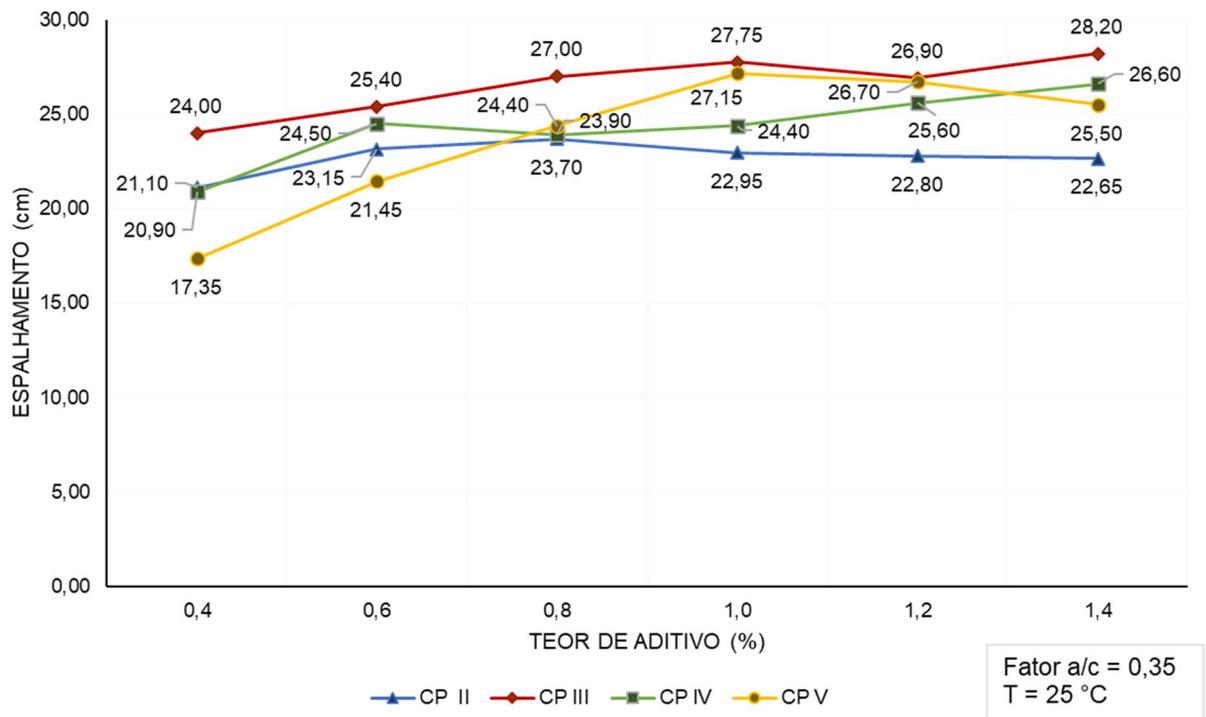


Figura 14 - Gráfico com ensaio de mini-abatimento com plastificante de 3ª geração

Os pontos de saturação das pastas com CP II e V foram alcançados com adição de 1,0%, na pasta com CP III foi alcançado com 0,8% e a pasta com CP IV com 0,6%. Como observado no ensaio com plastificante de 1ª geração, vemos a pasta com CP IV aumentar o espalhamento no seu último ponto, mostrando um aumento da saturação da pasta fazendo que alcance maiores diâmetros médios. Ainda vemos uma melhor performance da pasta de CP V em relação ao aditivo de 1ª geração, o que corrobora com o que foi visto no ensaio de fluidez, onde não foi obtido o escoamento da pasta com o plastificante de 1ª geração, mas performou melhor no ensaio com o aditivo de 3ª geração.

Na Figura 15 são apresentadas as imagens das pastas em seus pontos de saturação. Diferente do que vimos nos ensaios com os outros aditivos, as pastas com CP II, CP III e CP IV mostraram formas menos viscosas. Comparado com os outros aditivos, o plastificante de 3ª geração se mostra com maior efeito dispersante, fazendo que com aplicação de teores menores de aditivo, o aumento do espalhamento seja significativo, aumentando a saturação nas pastas de cimento. E como nos demais

ensaios, a pasta com CP V se mostra mais consistente, mesmo com a eficiência dispersiva do superplastificante.

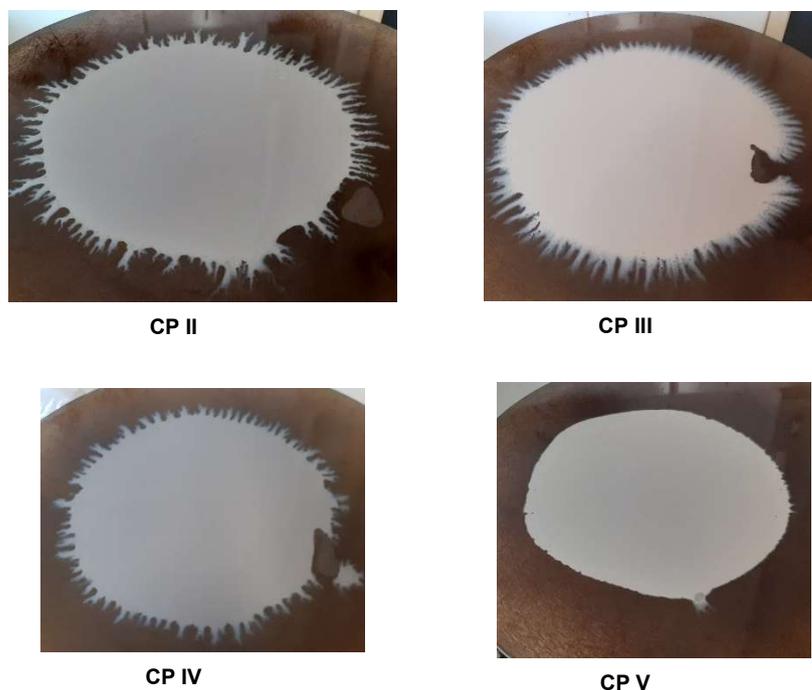


Figura 15 - Imagens dos espalhamentos nos pontos de saturação no ensaio de mini-abatimento com aditivo de 3ª geração

### 4.3. Ensaio de índice de consistência

#### 4.3.1. Pasta de cimento com plastificante de 1ª geração

Diferente da pasta composta por CP II e CP V, as demais pastas tiveram espalhamentos com alguns com valores semelhantes, como podemos observar no gráfico exposto na Figura 16. Com a adição de 10% de plastificante tivemos espalhamento com dimensões próximas nas pastas com CP III e CP IV e com as mesmas pastas tivemos espalhamento idênticos com a adição de 12% do aditivo.

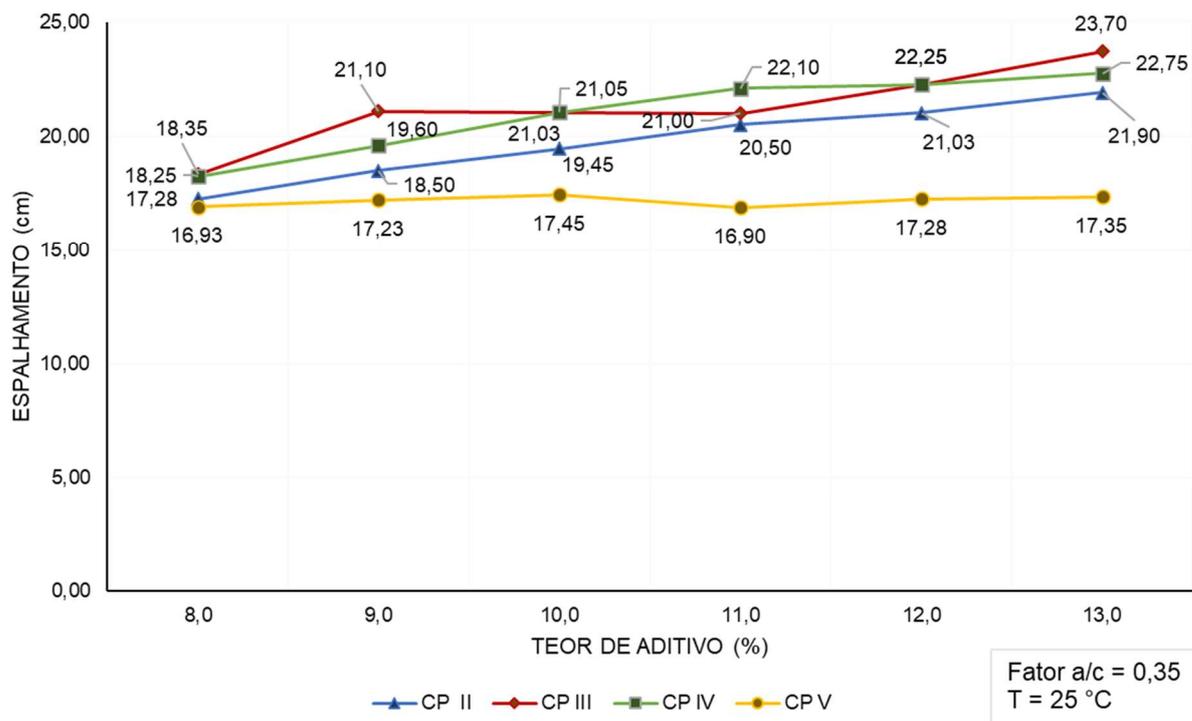


Figura 16 - Gráfico com ensaio de índice de consistência com plastificante de 1ª geração

Os pontos de saturação foram alcançados com a adição de um teor de 11% de aditivo com nas pastas com CP II e CP IV. Na pasta com CP III, o ponto é alcançado já com 9% de aditivo e a partir da adição de 12% vemos um aumento gradual do espalhamento da pasta, o que indica um aumento na saturação da mistura. Com CP V, a pasta alcançou o ponto de saturação já com 8% do plastificante. Diferente do que foi observado no ensaio de mini-abatimento, não vemos alteração significativas nos pontos finais das pastas com CP IV e CP V, ou seja, a força aplicada pelos golpes na mesa de fluxo melhorou a performance na pasta, auxiliando no aumento do espalhamento das pastas e mantendo a coesão das misturas.

Na Figura 17 são apresentadas imagens das pastas referente as dosagens dos pontos de saturação. Confirmando os dados apresentados no gráfico, verificamos maior coesão nas pastas com CP II, CP III e CP IV. Porém, vemos uma pasta com CP V com menor viscosidade, que devido aos golpes aplicados, teve um aumento de mais de 25% entre seu espalhamento no ponto de saturação no ensaio de índice de consistência e o mesmo ponto referente no ensaio de mini-abatimento.



CP II



CP III



CP IV



CP V

Figura 17 - Imagens dos espalhamentos nos pontos de saturação no ensaio de índice de consistência com aditivo de 1ª geração

#### **4.3.2. Pasta de cimento com plastificante de 2ª geração**

É possível observar no gráfico, indicado na Figura 18, que como no ensaio de mini-abatimento com plastificantes de 2ª geração, temos também diâmetros de espalhamentos que se aproximam com determinados teores de aditivo. Observa-se também como nos ensaios de mini-abatimento com a 1ª e 2ª geração do aditivo, temos uma diferença significativa no espalhamento entre as pastas com 1ª e 2ª geração do plastificante no ensaio de índice de consistência.

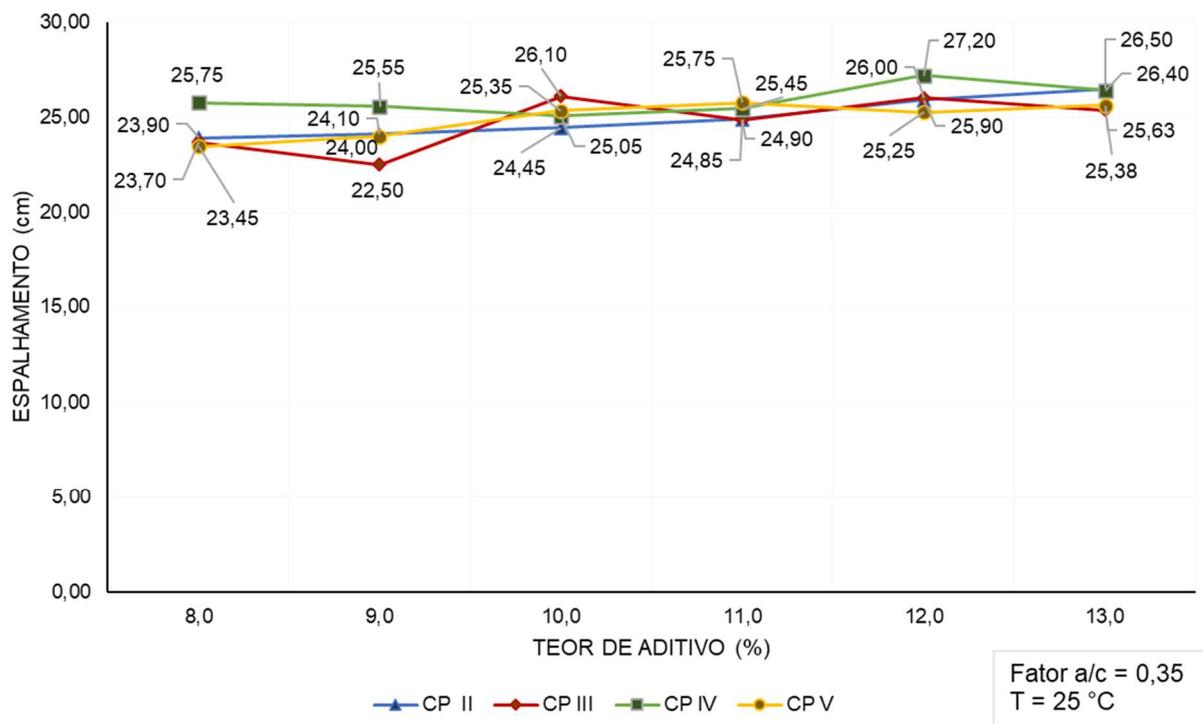


Figura 18 - Gráfico com ensaio de índice de consistência com plastificante de 2ª geração

O ponto de saturação da pasta com CP II, CP IV e CP V foram alcançados a partir da adição de 8% de aditivo. Nos pontos finais do ensaio com as pastas com CP II e CP IV nota-se um crescimento no espalhamento devido ao aumento de saturação na mistura. A pasta com CP III teve seu ponto de saturação alcançado com a adição de 10% de aditivo. Como visto no ensaio de índice de consistência com plastificante de 1ª geração, as pastas com CP II, CP III e CP IV performaram de maneira similar, mesmo com o aumento do espalhamento. Já a pasta com CP V mostra um aumento significativo no espalhamento, com um crescimento de cerca de 45% no diâmetro médio no ponto de saturação, que como visto na revisão bibliográfica, mostra melhor eficiência na dispersão de partículas.

Na Figura 19, contém as imagens das pastas com os teores de aditivos referentes ao ponto de saturação. Nota-se uma maior coesão na pasta com CP V, diferente das outras pastas onde observa-se uma menor viscosidade, devido a eficiência dispersante do aditivo de 2ª geração, fazendo com que os pontos de saturação fossem alcançados com menores teores de aditivos quando comparados com os ensaios de mini-abatimento com a utilização desse mesmo plastificante.



Figura 19 - Imagens dos espalhamentos nos pontos de saturação no ensaio de índice de consistência com aditivo de 2ª geração

#### **4.3.3. Pasta de cimento com plastificante de 3ª geração**

No gráfico apresentado na Figura 20, observa-se que a pasta com CP III, assim como no ensaio de mini-abatimento, obteve uma melhor performance com o plastificante de 3ª geração, quando comparado aos demais tipos de cimentos Portland utilizados nos ensaios. Ainda notamos uma maior estabilidade da pasta com CP V, mostrando uma performance mais regular quando comparado ao ensaio de mini-abatimento.

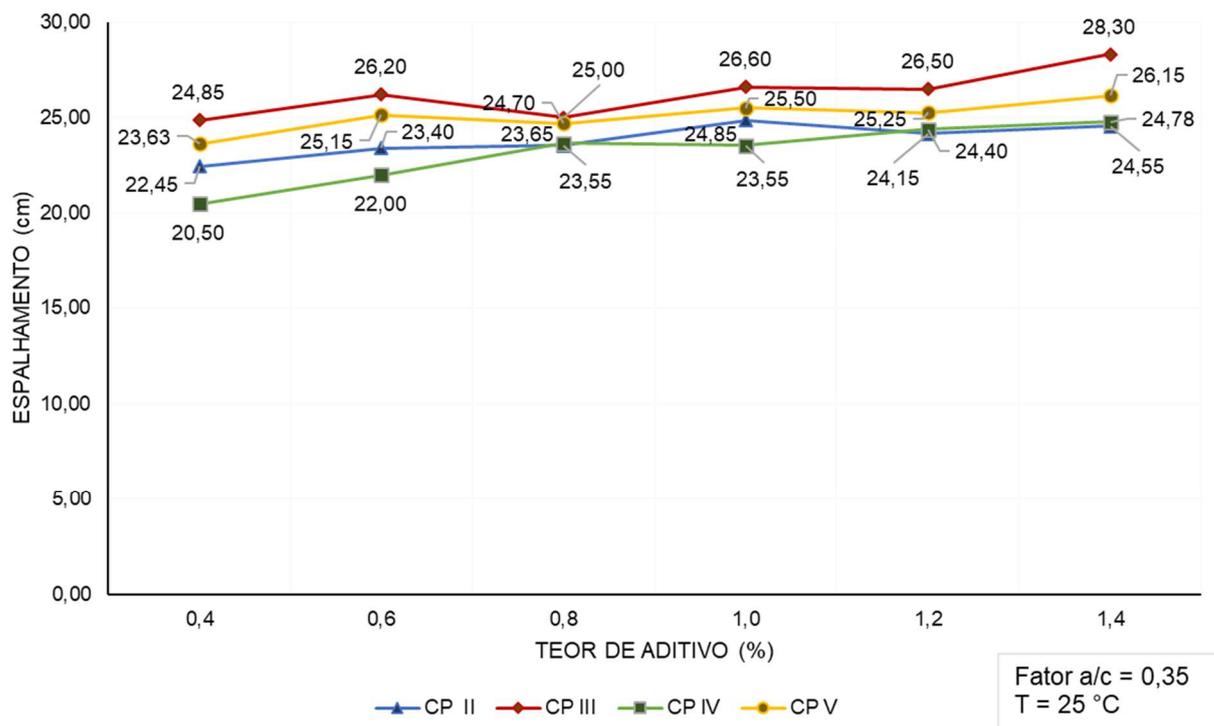


Figura 20 - Gráfico com ensaio de índice de consistência com plastificante de 3ª geração

O ponto de saturação na pasta com CP II foi alcançado com a adição de 1,0 do aditivo de 3ª geração. Nas pastas com CP III e CP V, o ponto de saturação foi obtido com a adição de 0,6% do aditivo. Já a na pasta com CP IV, o ponto de saturação foi conseguido com a adição de 0,8% do aditivo. Como observado no ensaio de mini-abatimento das pastas compostas por CP III e plastificante de 3ª geração tiveram maiores diâmetros de espalhamento. Como ocorreu no ensaio de mini-abatimento com plastificante de 3ª geração, as pastas com CP III e CP IV tiveram no seu último ponto um aumento expressivo do diâmetro, mostrando que o teor ótimo de aditivo foi ultrapassado durante o ensaio e gerando um aumento da saturação das pastas.

A Figura 21, mostra as imagens das pastas com os teores de aditivos referentes ao ponto de saturação. Semelhante ao observado no ensaio de mini-abatimento com o mesmo plastificante, as pastas com CP II, CP III e CP V mostraram uma viscosidade maior. Já a pasta com CP IV mostrou uma maior coesão na mistura, não apresentando ramificações na borda da pasta, proveniente da saturação da pasta.

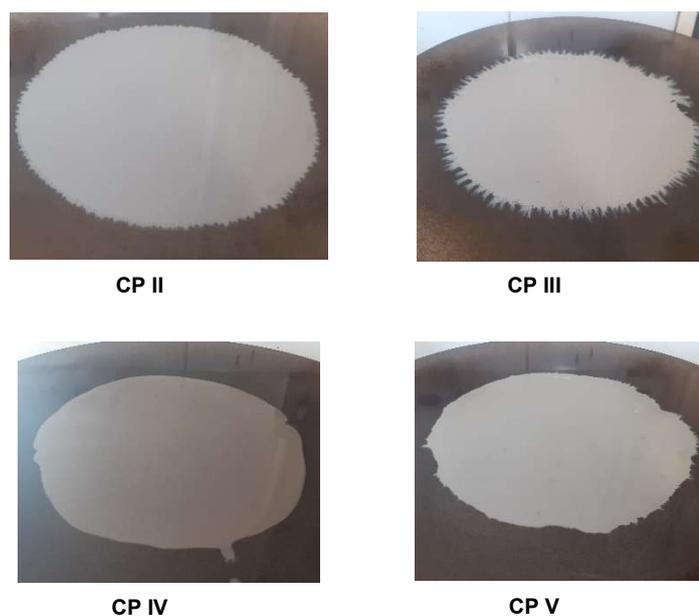


Figura 21 - Imagens dos espalhamentos nos pontos de saturação no ensaio de índice de consistência com aditivo de 3ª geração

#### **4.4. Pontos de saturação dos aditivos em comparação aos teores indicados pelo fabricante**

Na Tabela 2, encontram-se as dosagens mínimas e máximas para cada aditivo, indicadas pelo fabricante. Comparando os dados fornecido por eles e o fator água / cimento determinado em projeto igual 0,35, notamos que o teor de aditivo de 1ª geração está muito acima da dosagem máxima recomendada, sendo necessário uma adição 8 vezes maior a estabelecida pelo fabricante. Para o aditivo de 2ª geração foi necessária uma dosagem mínima, quase, 3 vezes maior ao recomendado. Os teores do aditivo de 3ª geração mostraram estar dentro dos valores recomendados pelo fabricante, mesmo utilizando um fator água / cimento baixo.

<b>Ensaio de fluidez</b>			
<b>Tipo de Cimento</b>	<b>1ª Geração</b>	<b>2ª Geração</b>	<b>3ª Geração</b>
CP II	11,0%	11,0%	1,0%
CP III	11,0%	11,0%	1,0%
CP IV	11,0%	11,0%	1,0%
CP V		11,0%	0,8%

Tabela 3 - Pontos de saturação encontrados no ensaio de fluidez

<b>Ensaio de mini-abatimento</b>			
<b>Tipo de Cimento</b>	<b>1ª Geração</b>	<b>2ª Geração</b>	<b>3ª Geração</b>
CP II	11,0%	12,0%	1,0%
CP III	12,0%	10,0%	0,8%
CP IV	11,0%	10,0%	0,6%
CP V	10,0%	10,0%	1,0%

Tabela 4 - Pontos de saturação encontrados no ensaio de mini-abatimento

<b>Ensaio de índice de consistência</b>			
<b>Tipo de Cimento</b>	<b>1ª Geração</b>	<b>2ª Geração</b>	<b>3ª Geração</b>
CP II	11,0%	8,0%	1,0%
CP III	9,0%	10,0%	0,6%
CP IV	11,0%	8,0%	0,8%
CP V	8,0%	8,0%	0,6%

Tabela 5 - Pontos de saturação encontrados no ensaio de índice de consistência

Na Tabela 3, Tabela 4 e Tabela 5 são apresentados os pontos de saturação verificados em cada ensaio. No ensaio de fluidez observamos uma estabilidade entre os teores encontrados, exceto na combinação da pasta com CP V com aditivo de 1ª geração que não escoou no viscosímetro Ford. As demais combinações mostraram uma estabilidade com adição de 11% de aditivo de 1ª e 2ª geração, com as combinações dos cimentos Portland utilizados e a 3ª geração, os pontos de saturação foram alcançados com o teor de 1,0% nas pastas com CP II, CP III e CP IV. A combinação com CP V e aditivo de 3ª geração, estabilizou-se com adição de 0,8% de aditivo, mas observou um aumento no tempo de escoamento a partir de 1,2% e o mesmo tempo foi mantido com a adição 1,4%.

Desse modo tais resultados indicam os plastificantes de 1ª e 2ª geração não adequados para as matrizes com baixa relação água / cimento, necessitando de muito

produto para alcançar uma boa eficiência, a ponto de poder prejudicar a qualidade da matriz e aumentar o preço de custo. Já com o aditivo de 3ª geração, os pontos de saturação estavam contidos dentro das indicações estabelecidas pelo fabricante, garantindo boa trabalhabilidade das pastas de cimento e podendo gerar economia de produtos a serem utilizados.

## 5 CONCLUSÃO

Com o estudo desenvolvido, foi possível inferir que, apesar do fabricante de aditivos plastificantes orientar sobre as dosagens mínimas e máximas dos seus produtos, tais valores podem não ser usados como referência, sendo recomendado uma análise mais aprofundada da quantidade de aditivo dependendo do tipo de cimento e quantidade de água a serem utilizados.

A relação água / cimento fixada em 0,35 nos mostra que para os plastificantes de 1ª e 2ª geração serem utilizados, deve-se ponderar a elevada quantidade necessária de produto, para que as partículas da matriz alcancem uma dispersão adequada. A dosagem desses aditivos a serem aplicados nas combinações onde a relação água / cimento são baixas se mostram significativas, podendo impactar diretamente no aspecto econômico do projeto de construção que ele será utilizado.

Os ensaios de mini-abatimento e índice de consistência foram executados utilizando os teores de aditivos utilizados no ensaio de fluidez, para efeito de comparação e compatibilização de variáveis. Analisando os pontos de saturação nesses ensaios, conclui-se para o baixo fator água / cimento utilizado na pesquisa o teor de aditivo de 1ª geração a ser adicionado as pastas com todos os cimentos variou entre 8% e 11%. Para a 2ª geração do plastificante, as pastas com CP II, CP IV e CP V o teor de aditivo a ser adicionado é de 8%, a pasta com CP III uma adição de 10% do plastificante para alcançar seu ponto de saturação. Para as combinações com plastificante de 3ª geração o teor de aditivo a ser adicionado em pastas com CP II, deverá ser 1,0%, nas pastas com CP III, CP IV e CP V, o teor a ser utilizado deve ser 0,6% do plastificante.

É possível concluir que para um fator água / cimento de 0,35, o aditivo de 3ª geração proporcionará uma maior dispersão de partículas, confirmando o que é visto na revisão bibliográfica. Além de exigir uma dosagem baixa do aditivo trabalhando dentro do que recomenda o fabricante, ele tem uma performance superior aos demais aditivos utilizados. Para aplicação dos aditivos de 1ª e 2ª geração, deverá ser levado em consideração o resultado a ser esperado e a dosagem a ser utilizada na combinação, pois impactará diretamente no custo e desempenho das matrizes cimentícias, devido a dosagens incompatíveis dos plastificantes. Equivalente ao que acontece com os outros plastificantes, o de 3ª geração necessita de estudos prévios para determinação de suas dosagens ótimas, afim de reduzir o consumo de aditivo e melhorar sua performance para cada aplicação.

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

- Sugere-se a realização desse trabalho com o uso de um Reômetro Rotacional, para que parâmetros de tensão de cisalhamento e viscosidade plástica possam ser determinados de forma quantitativa.
- A avaliação do desempenho físico e mecânico de matrizes cimentícias com as dosagens de aditivos estudadas no trabalho.

## REFERÊNCIAS

ABCP. **Guia básico de utilização do cimento portland**. 7. ed. São Paulo: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND, 2002. 28 p.

ABNT. **NBR 12006**: Cimento - Determinação do calor de hidratação pelo método de garrafa de Langavant - Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1990.

ABNT. **NBR 5732**: Cimento Portland comum. Rio de Janeiro: ABNT- Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1991.

ABNT. **NBR 5733**: Cimento Portland de alta resistência inicial. Rio de Janeiro: ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1991.

ABNT. **NBR 5735**: Cimento Portland de alto-forno. Rio de Janeiro: ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1991.

ABNT. **NBR 5736**: Cimento Portland pozolânico. Rio de Janeiro: ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1991.

ABNT. **NBR 5737**: Cimentos Portland resistentes a sulfatos. [S.l.]: ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1992.

ABNT. **NBR 13276**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2016.

ABNT. **NBR 16697**: Cimento Portland - Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2018.

ABNT. **NBR 11768-1**: Aditivos químicos para concreto de cimento Portland. Rio de Janeiro: ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2019.

ABNT. **NBR 7215**: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2019.

AÏCTIN, P. C.; FLATT, J. R. **Science and Technology of Concrete admixtures**. Cambridge: Woodhead Publishing, 2016.

AITCIN, P. C. **High performance concrete**. São Paulo: PINI, 2000.

ASTM. **C618 - 08a**: Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete. [S.I.]: ASTM - American Society for Testing and Materials, 2008.

ASTM. **C 150-09**: Standard Specification for Portland Cement. [S.I.]: ASTM - American Society for Testing and Materials, 2009.

ASTM. **C989-09a**: Standard Specification for Slag Cement for Use in Concrete and Mortars. [S.I.]: ASTM - American Society for Testing and Materials, 2009.

BATTAGIN, A. F. CIMENTO PORTLAND. In: ISAIA, G. C. **CONCRETO: CIÊNCIA E TECNOLOGIA**. 1. ed. [S.I.]: [s.n.], v. I, 2011. Cap. 6, p. 1968.

BAUER, L. A. F. **MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO**. 6ª. ed. Rio de Janeiro: LTC, v. 1, 2019.

BS EM 197-1: Cement. Composition, specifications and conformity criteria for common cements. [S.I.]: Institution, British Standards, 2000.

CASTRO, A. L. D.; PANDOLFELLI, V. C. **Conceitos de dispersão e empacotamento de partículas para a produção de concretos especiais aplicados na construção civil**. Universidade Federal de São Carlos. São Carlos. 2009.

CHEUNG, J. et al. Impact of admixtures on the hydration kinetics of Portland cement. **Cement and Concrete Research**, 41, 2011. 1289-1309.

CORR, D. J. et al. Investigating entrained air voids and Portland cement hydration with low-temperature scanning electron microscopy. **Cement & Concrete Composites**, v. 26, p. 1007–1012, 2004.

DAHLSTRÖM, M. The foundations of cooperation: building cartels in the Nordic cement industry and beyond, 1890-1947. **Scandinavian Economic History Review**, 2019. 16.

EDWARDS, P. Global Cement Magazine. **Global Cement**, 05 Dezembro 2019. Disponível em: <<https://www.globalcement.com/magazine/articles/1137-the-2010s-a-decade-in-the-cement-sector>>. Acesso em: 18 Agosto 2020.

FILHO, J. H.; CINCOTTO, M. A.; PILEGGI, G. R. Técnicas de caracterização reológica de concretos. **Concreto & Construções**, São Paulo, Jul/Ago 2007.

GALHARDO, P. G. **ESTUDO DA PRODUÇÃO DE CIMENTO COM ÊNFASE NO CLASSE G**. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, p. 106. 2014.

GOMES, M. D. M.; DOS SANTOS, M. L. Q.; NOGUEIRA, J. A. **Análise da Produção de Cimento Portland**. Faculdade Kennedy. [S.I.], p. 12. 2017.

GURGEL PINTO, E. N. D. M. et al. Adição de plastificantes em pastas de cimento para poços de petróleo: Avaliação do comportamento reológico. **PDPETRO**, Campinas, 21 Outubro 2007.

HARTMANN, C. T. et al. Aditivos químicos para concreto. In: ISAIA, G. C. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. São Paulo: Ibracon, 2011. p. 347-380.

KANTRO, D. L. Influence of water-reducing admixtures on properties of cement paste - a miniature slump test. In: \_\_\_\_\_ **Cement and concrete aggregates**. [S.I.]: Winter, v. 2, 1980. p. 95-108.

KOLIAS, S.; GEORGIU, C. The effect of paste volume and water content on strength and absorption of concrete. In: \_\_\_\_\_ **Cement & Concrete Composites**. [S.I.]: [s.n.], 2005. p. 211-216.

MARTIN, J. F. M. **Concreto. Ensino, Pesquisa e Realizações**. São Paulo: Ibracon, 2005. p. 381-406.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. **Concrete: microstructure, properties and materials**. São Paulo: IBRACON, 2014.

METHA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 2ª Português. ed. [S.I.]: [s.n.], 2014.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto (Properties of Concrete)**. Tradução de Ruy Alberto Cremonini. 5ª. ed. Porto Alegre: BOOKMAN, 2016.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do Concreto**. Tradução de Ruy Alberto Cremonini. 2ª. ed. Porto Alegre: BOOKMAN, 2013.

RIXON, R.; MAILVAGANAM, N. **Chemical Admixtures for Concrete**. 3ª. ed. [S.I.]: Taylor & Francis, 2001.

RODGERS, L. BBC. **BBC**, 17 Dezembro 2018. ISSN Aquecimento global: a gigantesca fonte de CO2 que está por toda parte. Disponível em: <<https://www.bbc.com/portuguese/geral-46591753>>. Acesso em: 16 Agosto 2020.

SANTOS, L. B. **A indústria de cimento no Brasil: origens, consolidação e internacionalização**. Universidade Estadual Paulista (UNESP). [S.l.], p. 13. 2011.

SOARES, D. A. P.; CALIXTO, J. M. F.; LADEIRA, L. O. **Caracterização da reologia no estado fresco de pastas de cimento Portland fabricadas com nanotubos de carbono sintetizados diretamente sobre o clínquer**. UFMG. Belo Horizonte, p. 198. 2019.

TUTIKIAN, B. F.; MOLIN, D. C. D. **CONCRETO AUTO-ADENSÁVEL**. 1ª. ed. São Paulo: PINI LTDA, 2008.