



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ESTRUTURAL E**  
**CONSTRUÇÃO CIVIL**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL:**  
**ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL**

**DAVID ALISON ARAÚJO SILVA**

**AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E DA DURABILIDADE DO**  
**CONCRETO COM CINZAS DA TERMOELÉTRICA DO PECÉM/CE**

**FORTALEZA**

**2017**

DAVID ALISON ARAÚJO SILVA

AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E DA DURABILIDADE DO  
CONCRETO COM CINZAS DA TERMOELÉTRICA DO PECÉM/CE

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Estrutura e Construção Civil da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Construção Civil.

Orientador: Prof. Dr. Antônio Eduardo Bezerra Cabral

FORTALEZA

2017

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Biblioteca Universitária  
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

- S579a Silva, David Alison Araújo.  
Avaliação das propriedades mecânicas e da durabilidade do concreto com cinzas da termoelétrica do Pecém/CE / David Alison Araújo Silva. – 2017.  
116 f. : il. color.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Estruturas e Construção Civil, Fortaleza, 2017.  
Orientação: Prof. Dr. Antônio Eduardo Bezerra Cabral.
1. CCCM. 2. Cinza Volante. 3. Cinza com alto teor de enxofre. 4. FGD. 5. ANOVA. I. Título.  
CDD 624.1
-

DAVID ALISON ARAÚJO SILVA

AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E DA DURABILIDADE DO  
CONCRETO COM CINZAS DA TERMOELÉTRICA DO PECÉM/CE

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Estrutura e Construção Civil da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Construção Civil.

Aprovada em 23 /11 /2017.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Antônio Eduardo Bezerra Cabral (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Jorge Barbosa Soares  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Daniel Veras Ribeiro  
Universidade Federal da Bahia (UFBA)

## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço à Deus por ter me dado força e determinação durante toda a trajetória de minha vida e continuou me dando força na elaboração deste trabalho e também por me ajudar a superar os desafios da dissertação e da vida profissional.

Agradeço à minha família, por toda a compreensão e amor incondicional, em especial aos meus irmãos, Debora, Atila, Akila, Bruna e Laryssa e aos meus pais Assis e Débora.

Agradeço à minha companheira e amiga Vanessa da Silva Ferreira, por todo amor, carinho e compreensão durante todo o período da dissertação.

Um agradecimento especial ao professor Antônio Eduardo Bezerra Cabral pelo acompanhamento para o desenvolvimento desse trabalho, por todo o conhecimento repassado, por ter aceitado ser meu orientador. Agradeço também aos professores Barros Neto, Vanessa Campos, Bertini e Jorge Soares e do coordenador do Programa, professor Evandro Parente Júnior.

Agradeço a empresa ENEVA, por terem sido parceiros nesse projeto e por confiarem no trabalho do grupo.

Agradeço aos amigos de turma, em especial ao Artur, Ada Sena, Ana Borges, Jamires Cordeiro, Mariana Leite, Isabelly e Kalil Sampaio, por todos os momentos vividos na Universidade, momentos de descontração e apoio em todas as dificuldades encontradas.

Agradeço aos meus grandes amigos Davi Valente, Leandro Eiró, Lucas Novaro, Ramiro Novaro e Rafael Victor, Rafael e Isabelle pelo apoio e momentos de descontração.

Agradeço aos meus amigos da Marinha, pelos momentos de descontração e por terem me ajudado a me adaptar em uma nova cidade, em especial ao Leyser Pacheco, André Figueiró, Ailson Medeiros, Corbage, Victor Douglas, Mavignier, Caio, Olivieri, Vinturini, Biondi, Amanda Zebulum, Villela e Carlos Pereira.

Agradeço à Marinha do Brasil por terem compreendido a importância desse trabalho para mim

## RESUMO

As cinzas de combustão do carvão mineral (CCCM) são basicamente de dois tipos: cinza volante e cinza de fundo. O uso de cinzas volantes na composição dos materiais cimentícios torna-os mais sustentáveis. Este estudo relata a caracterização de duas cinzas, provenientes da queima de carvão mineral a partir de dois processos de captação diferentes, para analisar a semelhança entre as cinzas e a sua influência no concreto de cimento Portland. Os concretos foram produzidos pela substituição de parte do cimento Portland por cinzas volantes. As cinzas foram denominadas CTP - I e CTP - II e foram caracterizadas em suas propriedades físicas, químicas, mineralógicas e morfológicas. Observou-se, por meio de testes, que apenas uma das cinzas volantes atendeu aos requisitos da classe C da NBR 12.653 (ABNT, 2014), a CTP - II, possibilitando a substituição de cinza volante por cimento. A outra cinza, CTP - I, apresentou uma concentração de  $\text{SO}_3$  de aproximadamente 12% e assim, inicialmente, foi utilizada como material fino na produção de argamassa, com o intuito de analisar o compósito formado, através dos ensaios de lixiviação e solubilização para determinar se há periculosidade na produção dessas argamassas. O projeto experimental foi estabelecido na produção de um concreto de referência e na produção de outros concretos com a substituição do cimento Portland por cinza na proporção de 7,5% e 15% de cimento Portland por cinzas volantes, em volume, em três teores de relação água/aglomerante diferentes (0,4, 0,5 e 0,6). Analisou-se as propriedades do concreto no estado fresco e endurecido, através de ensaios de consistência,  $F_c$ ,  $F_t$ ,  $E_c$ , penetração de cloretos, dentre outros, dos concretos de referência e dos concretos com cinzas. Os resultados das análises de concretos indicam há uma viabilidade técnica na substituição do cimento Portland pelas cinzas, pois, em alguns traços observou-se aumento de resistência à compressão e diminuição na penetração de cloretos, além de outras evidências. Os resultados foram analisados estatisticamente pela análise de variância (ANOVA). O traço com maior resistência à compressão foi o traço com CTP - I, a/aglo 0,4 e 7,5% de cinza, já o de menor penetração de cloretos foi o traço com CTP - II, a/aglo 0,4 e 15% de cinza.

**Palavras-chave:** CCCM. Cinza volante. Cinza com alto teor de enxofre. FGD. Concreto com cinza. Resíduo da queima do carvão mineral em termoelétrica. ANOVA.

## ABSTRACT

The mineral coal of combustion ashes (MCCA) are basically two types: fly ash and bottom ash. The use of fly ash in the composition of the composites cementitious material makes it more sustainable. This study reports the characterization of two ashes coming from the burning of coal from two different capture processes to analyze the similarity between the ashes and their influence on concrete Portland cement. The concretes were produced by replacing part of the Portland cement by fly ash. The ashes were named CTP - I and CTP - II and were characterized in their physical, chemical, mineralogical and morphological properties. It was observed, through tests, that just one of fly ashes met the requirements of class C of NBR 12.653 (ABNT, 2014), the CTP - II, making possible the substitution of fly ash for cement. The other ash, CTP - I, presented a  $\text{SO}_3^-$  concentration of approximately 12% and was initially used as fine material in the production of mortar, with the purpose to analyze the composite formed by leaching and solubilization tests to determine if there is danger in the production of these mortars. The experimental design was established in the production of a reference concrete and in the production of others concretes with the replacement of Portland cement by ash in the proportion 7,5% and 15% of Portland cement by fly ash, by volume, in three ratio water/binder different (0,4, 0,5 and 0,6). The properties of the concrete in the fresh and hardened state were analyzed by consistency tests,  $F_c$ ,  $F_t$ ,  $E_c$ , penetration of chlorides, among others, reference concrete and the concretes with ashes. The results of analyzes of concretes indicate that there is a technical viability of replacing Portland cement by fly ash, because in some concrete mixtures it was observed an increase of resistance to compression and decrease in the penetration of chlorides, besides other evidence. The results were analyzed statistically by analysis of variance (ANOVA). The mix with greater resistance to compression was the mix with CTP - I, w/b 0,4 and 7,5 of ash, whereas the one with lowest penetration of chlorides was the mix with CTP - II, w/b 0,4 and 15% ash.

**Keywords:** MCCA. Fly ash. High sulfur ash. FGD. Fly ash concrete. Waste of burning coal in thermoelectric. ANOVA.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Distribuição de Usinas Elétricas no Brasil. ....	14
Figura 2 - Esquema de geração de energia e produção de cinzas.....	16
Figura 3 - Distribuição percentual média, entre os anos de 2008 e 2013, dos diferentes tipos de cimento produzidos no Brasil. ....	19
Figura 4 - Produção anual de CP IV.....	20
Figura 5 - Produção e consumo de carvão energético. ....	20
Figura 6 - Foto aérea da termoelétrica. ....	22
Figura 7 - Armazenamento das cinzas provenientes da queima do carvão. ....	23
Figura 8 - Classificação das adições minerais para concretos. ....	25
Figura 9 - Difratoograma de cinzas volantes utilizadas em diferentes estudos.....	32
Figura 10 - TG da cinza volante utilizada por Hoppe Filho (2008). ....	33
Figura 11 - Micrografias de cinzas com baixo teor de CaO, realizadas por diferentes autores. ....	34
Figura 12 - Micrografias de cinzas com alto teor de CaO, realizadas por diversos autores....	35
Figura 13 - Teores críticos de cloretos em função do ambiente e da qualidade do concreto... 47	47
Figura 14 - Curva granulométrica do agregado miúdo.....	51
Figura 15 - Curva granulométrica do agregado graúdo.....	51
Figura 16 - Distribuição do tamanho das partículas da cinza CTP - I.....	53
Figura 17 - Distribuição do tamanho das partículas da CTP - II.....	53
Figura 18 - Imagem das partículas das cinzas obtidas por MEV. ....	55
Figura 19 - EDS das cinzas CTP - I e CTP - II ....	55
Figura 20 - Difratoograma da CTP - I. ....	58
Figura 21 - Difratoograma da CTP - II.....	58
Figura 22 - Procedimentos do ensaio de penetração de cloretos.....	61
Figura 23 - Medição da penetração de cloretos. ....	62
Figura 24 - Índice de Consistência da argamassa com CTP - I.....	64
Figura 25 - Índice de consistência das argamassas com CTP - II. ....	64
Figura 26 - Percentual do consumo de aditivo do concreto com CTP - I, em relação à massa de aglomerante.....	68
Figura 27 - Percentual do consumo de aditivo do concreto com CTP - II, em relação a massa de aglomerante.....	68

Figura 28 - Comportamento da resistência à compressão do concreto com CTP - I, em função da relação a/aglo. ....	72
Figura 29 - Comportamento da resistência à compressão do concreto com CTP - I, em função do teor de cinza. ....	73
Figura 30 - Comportamento da resistência à compressão do concreto com CTP - II, em função da relação a/aglo. ....	74
Figura 31 - Comportamento da resistência à compressão do concreto com CTP - II, em função do teor de cinza. ....	74
Figura 32 - Comportamento da resistência à tração do concreto com CTP - I, em função da relação a/aglo e do teor de cinza. ....	77
Figura 33 - Comportamento da resistência à tração do concreto com CTP - II, em função da relação a/aglo e do teor de cinza. ....	78
Figura 34 - Comportamento do módulo de elasticidade do concreto com CTP - I, em função da relação a/aglo e do teor de cinza. ....	80
Figura 35 - Comportamento do módulo de elasticidade do concreto com CTP - II, em função da relação a/aglo e do teor de cinza. ....	80
Figura 36 - Comportamento da VPU do concreto com CTP - I, em função da relação a/aglo e do teor de cinza. ....	82
Figura 37 - Comportamento da VPU do concreto com CTP - II, em função da relação a/aglo e do teor de cinza. ....	82
Figura 38 - Comportamento da absorção do concreto com CTP - I, em função da relação a/aglo e do teor de cinza. ....	84
Figura 39 - Comportamento da absorção do concreto com CTP - II, em função da relação a/aglo e do teor de cinza. ....	84
Figura 40 - Comportamento da penetração de cloreto, aos 42 dias e 84 dias, em concreto com CTP - I, em função da relação a/aglo. ....	86
Figura 41 - Comportamento da penetração de cloreto, aos 42 dias e 84 dias, em concreto com CTP - I, em função do teor de cinza. ....	87
Figura 42 - Comportamento da penetração de cloreto, aos 42 dias e 84 dias, em concreto com CTP - II, em função da relação a/aglo. ....	87
Figura 43 - Comportamento da penetração de cloreto, aos 42 dias e 84 dias, em concreto com CTP - II, em função do teor de cinza. ....	88

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - UTE por tipo de combustível. ....	15
Tabela 2 - Previsão de aumento de Usinas Elétricas. ....	21
Tabela 3 - Requisitos químicos de materiais pozolânicos. ....	26
Tabela 4 - Requisitos físicos de materiais pozolânicos. ....	27
Tabela 5 - Características da sílica ativa e metacaulim. ....	28
Tabela 6 - Composição química das cinzas volantes de diferentes tipos de carvão. ....	29
Tabela 7 - Características químicas de diferentes cinzas volantes utilizadas em diversos estudos. ....	30
Tabela 8 - Propriedades químicas de uma cinza volante ao longo do tempo. ....	31
Tabela 9 - Características físicas das cinzas volante, utilizadas por diversos autores. ....	36
Tabela 10 - Influência das cinzas nas propriedades do concreto no estado fresco. ....	40
Tabela 11 - Influência das cinzas na resistência à compressão do concreto. ....	42
Tabela 12 – Classificação da qualidade do concreto baseada na velocidade de pulsos de ultrassom. ....	46
Tabela 13 - Teor ótimo de substituição de cimento Portland por cinza realizado por diversos autores, nos ensaios de penetração de cloretos em concretos com cinzas. ....	48
Tabela 14 - Composição química do cimento Portland CP V - ARI. ....	50
Tabela 15 - Caracterização dos agregados miúdo e graúdo. ....	51
Tabela 16 - Massa específica das cinzas volantes. ....	52
Tabela 17 - D <sub>10</sub> , D <sub>50</sub> , D <sub>90</sub> , D <sub>máx</sub> e finura Blaine das cinzas CTP - I e CTP - II. ....	53
Tabela 18 - Análises químicas das cinzas, obtidas por fluorescência de raios X. ....	56
Tabela 19 - Características químicas das cinzas. ....	57
Tabela 20 - Consumo de materiais para concreto com CTP - I (kg/m <sup>3</sup> ). ....	59
Tabela 21 - Consumo de materiais para concreto com CTP - II (kg/m <sup>3</sup> ). ....	60
Tabela 22 - Ensaio realizados em concretos. ....	60
Tabela 23 - Resultados da atividade pozolânica em argamassas. ....	63
Tabela 24 - Variação do Índice de Consistência (IC) ao longo do tempo, em mm. ....	65
Tabela 25 - Resultados de lixiviação e solubilização, em mg/L, das argamassas com CTP – I e CTP – II. ....	66
Tabela 26 - Limites máximos de sulfatos e cloretos permitidos em concretos. ....	67
Tabela 27 - Concentrações de íons cloretos e sulfatos encontradas nas argamassas. ....	67
Tabela 28 - Resultados dos concretos no estado endurecido. ....	70

Tabela 29 - Resultados estatísticos obtidos pela ANOVA para a Resistência à compressão dos Concretos com CTP - I e CTP - II. ....	71
Tabela 30 - Resultados estatísticos obtidos pela ANOVA para a Resistência à compressão do Concreto com CTP - I. ....	72
Tabela 31 - Resultados estatísticos obtidos pela ANOVA para a Resistência à compressão do Concreto com CTP - II. ....	73
Tabela 32 - Resultados ANOVA da resistência à tração dos concretos com as CTP - I e CTP - II aos 28 dias. ....	77
Tabela 33 - Resultados ANOVA da resistência à tração do concreto com CTP - I e do concreto com CTP - II, aos 28 dias. ....	77
Tabela 34 - Resultados ANOVA do módulo de elasticidade dos concretos com as CTP - I e CTP - II aos 28 dias. ....	79
Tabela 35 - Resultados ANOVA do módulo de elasticidade do concreto com CTP - I e do concreto com CTP - II, aos 28 dias. ....	79
Tabela 36 - Resultados ANOVA da VPU dos concretos com as CTP - I e CTP - II aos 28 dias. ....	81
Tabela 39 - Resultados ANOVA da VPU dos concretos com CTP - I e CTP - II, aos 28 dias. ....	81
Tabela 38 - Resultados ANOVA da absorção de água dos concretos com as CTP - I e CTP - II aos 28 dias. ....	83
Tabela 39 - Resultados ANOVA da absorção de água do concreto com CTP - I e do concreto com CTP - II, aos 28 dias. ....	83
Tabela 40 - Resultados ANOVA da penetração de cloretos dos concretos com as CTP - I e CTP - II, aos 42 dias e 84 dias. ....	85
Tabela 41 - Resultados ANOVA da penetração de cloretos do concreto com CTP - I, aos 42 dias e 84 dias. ....	86
Tabela 42 - Resultados ANOVA da penetração de cloretos do concreto com CTP - II, aos 42 dias e 84 dias. ....	86

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ANOVA	Análise de Variância
CCCM	Cinzas de combustão do carvão mineral
CEB	<i>COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BETON</i>
C-S-H	Silicato de cálcio hidratado
DNPM	Departamento Nacional de Produção Mineral
DRX	Difração de Raios-X
FRX	Fluorescência de Raios-X
F.S	Fator de Segurança
LABOSAN	Laboratório de Saneamento Ambiental
LMCC	Laboratório de Materiais de Construção Civil
LRX	Laboratório de Raios - X
MEV	Microscopia eletrônica de varredura
NUTEC	Núcleo de Tecnologia Industrial do Ceará
SNIC	Sindicato Nacional da Indústria do Cimento
SiAlFe	Soma dos óxidos de Sílica, Alumínio e Ferro.

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>14</b>
<b>1.1</b>	<b>Justificativa .....</b>	<b>17</b>
<b>1.2</b>	<b>Objetivo.....</b>	<b>23</b>
<b>1.2.1</b>	<b><i>Objetivo Geral .....</i></b>	<b>23</b>
<b>1.2.2</b>	<b><i>Objetivos Específicos .....</i></b>	<b>23</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO DA LITERATURA.....</b>	<b>24</b>
<b>2.1</b>	<b>Adições minerais .....</b>	<b>24</b>
<b>2.1.1</b>	<b><i>Classificação das adições minerais .....</i></b>	<b>24</b>
<b>2.1.2</b>	<b><i>Requisitos dos materiais pozolânicos .....</i></b>	<b>25</b>
<b>2.1.3</b>	<b><i>Características químicas da cinza volante .....</i></b>	<b>28</b>
<b>2.1.4</b>	<b><i>Características físicas da cinza volante .....</i></b>	<b>33</b>
<b>2.2</b>	<b>Características do concreto com CCCM .....</b>	<b>37</b>
<b>2.2.1</b>	<b><i>Influência das cinzas nas propriedades do concreto no estado fresco .....</i></b>	<b>38</b>
<b>2.2.2</b>	<b><i>Influência das cinzas nas propriedades do concreto no estado endurecido.....</i></b>	<b>40</b>
<b>2.2.2.1</b>	<b><i>Resistência à compressão.....</i></b>	<b>41</b>
<b>2.2.2.2</b>	<b><i>Módulo de Elasticidade .....</i></b>	<b>43</b>
<b>2.2.2.3</b>	<b><i>Resistência à tração.....</i></b>	<b>44</b>
<b>2.2.2.4</b>	<b><i>Absorção de água .....</i></b>	<b>45</b>
<b>2.2.2.5</b>	<b><i>Velocidade do pulso ultrassônico (VPU) .....</i></b>	<b>45</b>
<b>2.2.2.6</b>	<b><i>Durabilidade do concreto à penetração de cloretos .....</i></b>	<b>46</b>
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS DE PESQUISA .....</b>	<b>50</b>
<b>3.1</b>	<b>Materiais.....</b>	<b>50</b>
<b>3.2</b>	<b>Métodos.....</b>	<b>52</b>
<b>3.2.1</b>	<b><i>Caracterização das cinzas.....</i></b>	<b>52</b>
<b>3.2.1.1</b>	<b><i>Massa específica.....</i></b>	<b>52</b>
<b>3.2.1.2</b>	<b><i>Distribuição granulométrica .....</i></b>	<b>52</b>
<b>3.2.1.3</b>	<b><i>Análise morfológica por MEV.....</i></b>	<b>54</b>

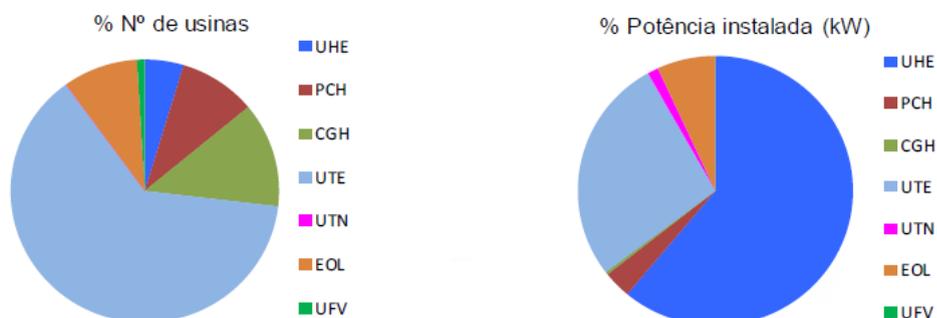
3.2.1.4	<i>Análise química por FRX</i> .....	56
3.2.1.5	<i>Análise mineralógica por DRX</i> .....	57
3.2.2	<i>Dosagem do concreto</i> .....	59
3.3	<b>Ensaio de penetração de cloretos</b> .....	61
3.4	<b>Análise estatística</b> .....	62
4	<b>APRESENTAÇÃO, ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS</b> .....	63
4.1	<b>Resultado das argamassas com as CTP - I e CTP - II</b> .....	63
4.1.1	<i>Avaliação da atividade pozolânica</i> .....	63
4.1.2	<i>Índice de consistência em argamassas com cinzas</i> .....	63
4.1.3	<i>Lixiviação e solubilização das argamassas</i> .....	66
4.2	<b>Resultados do concreto no estado fresco</b> .....	68
4.3	<b>Apresentação dos resultados do concreto no estado endurecido</b> .....	69
4.4	<b>Análise dos resultados do concreto no estado endurecido</b> .....	71
4.4.1	<i>Resistência à compressão</i> .....	71
4.4.2	<i>Resistência à tração</i> .....	76
4.4.3	<i>Módulo de Elasticidade</i> .....	78
4.4.4	<i>Velocidade de pulso ultrassônico (VPU)</i> .....	81
4.4.5	<i>Absorção de água</i> .....	83
4.4.6	<i>Penetração de cloretos</i> .....	85
5	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	90
5.1	<b>Conclusões</b> .....	90
5.2	<b>Sugestões de trabalhos futuros</b> .....	91
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	92
	<b>APÊNDICE A - ENSAIO DA PERDA DE ABATIMENTO DE ACORDO COM A NBR 10.342 (ABNT, 2012).</b> .....	101
	<b>APÊNDICE B - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO, TRAÇÃO, VPU E ABSORÇÃO DOS CONCRETOS.</b> .....	103
	<b>APÊNDICE C - MÓDULO DE ELASTICIDADE DOS CONCRETOS.</b> ....	104
	<b>APÊNDICE D - VALORES DA PENETRAÇÃO DE CLORETOS DOS CONCRETOS.</b> .....	105

<b>APÊNDICE F - CURVA DE ABRAMS PARA A RESISTÊNCIA DOS CONCRETOS COM CTP - II.....</b>	<b>114</b>
--	------------

## 1 INTRODUÇÃO

De acordo com a ANEEL (2017), o setor energético brasileiro possui 151,5GW de potência instalada proveniente das Usinas Elétricas (UE), das quais são formas por Usina Hidrelétrica (UHE), Usinas Termelétricas (UTE), Usinas Termonucleares (UTN), dentre outras unidades geradoras, conforme apresentado na Figura 1.

Figura 1 - Distribuição de Usinas Elétricas no Brasil.



Tipo	Quantidade	% do total	Potência instalada (kW) <sup>1/</sup>	% do total
Usina Hidrelétrica de Energia – UHE	219	4,7	92.605.229	61,1
Pequena Central Hidrelétrica – PCH	436	9,3	4.952.203	3,3
Central Geradora Hidrelétrica – CGH <sup>2/</sup>	603	12,9	521.000	0,3
Usina Termelétrica de Energia – UTE	2.952	63,1	41.119.492	27,1
Usina Termonuclear – UTN	2	0,0	1.990.000	1,3
Central Geradora Eolielétrica – EOL	423	9,0	10.364.042	6,8
Central Geradora Solar Fotovoltaica – UFV <sup>3/</sup>	44	0,9	23.761	0,0
Total	4.679	100	151.575.727	100

Fonte: ANEEL (2017).

Através da Figura 1 vemos que a UTE é a que apresenta o maior número de usinas, em termo de quantidade, com 2.952 unidades e uma potência instalada de 41GW. As UTE, dentre outros fatores, diferenciam-se pelo tipo de combustível utilizado na geração de energia elétrica. A Tabela 1 apresenta os tipos de UTE e suas respectivas potências.

Tabela 1 - UTE por tipo de combustível.

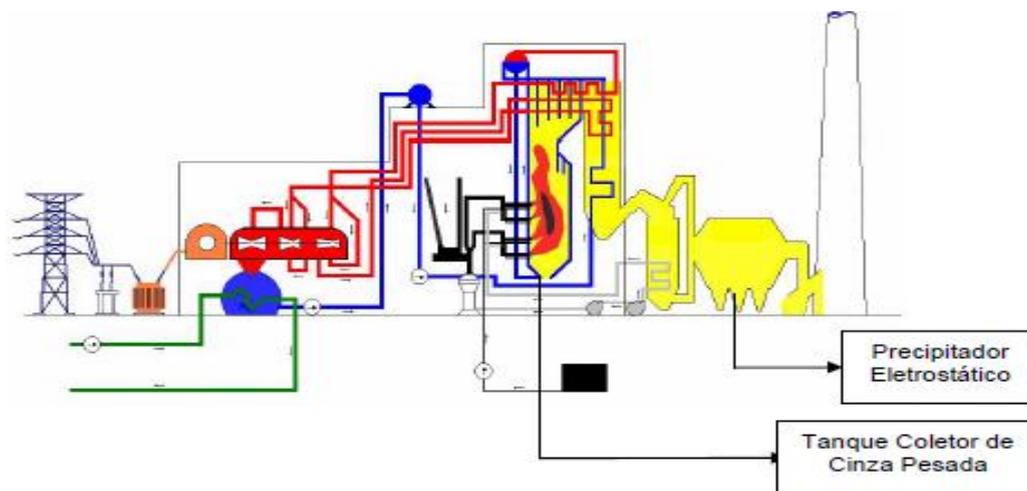
Tipo			Usinas termelétricas <sup>1/</sup>		
			Quantidade	Potência instalada (kW) <sup>2/</sup>	%
Bio-massa	Agroindustriais	Bagaço de Cana de Açúcar	399	10.909.920	26,5%
		Biogás-AGR	3	1.822	0,0%
		Capim Elefante	3	65.700	0,2%
		Casca de Arroz	12	45.333	0,1%
	Biocombustíveis líquidos	Etanol	1	320	0,0%
		Oleos vegetais	2	4.350	0,0%
	Floresta	Carvão Vegetal	8	54.097	0,1%
		Gás de Alto Forno - Biomassa	11	332.265	0,8%
		Lenha	2	14.650	0,0%
		Licor Negro	17	2.261.136	5,5%
	Resíduos animais	Resíduos Florestais	50	386.100	0,9%
		Biogás - RA	11	2.099	0,0%
	Resíduos sólidos urbanos	Biogás - RU	15	114680	0,3%
Carvão - RU		1	2.700	0,0%	
Fóssil	Carvão mineral	Calor de Processo - CM	1	24.400	0,1%
		Carvão Mineral	13	3.389.465	8,2%
		Gás de Alto Forno - CM	9	199.130	0,5%
	Gás natural	Calor de Processo - GN	1	40.000	0,1%
		Gás Natural	159	12.968.689	31,5%
	Outros fósseis	Calor de Processo - OF	1	147.300	0,4%
		Petróleo	Gás de Refinaria	6	315.560
	Óleo Combustível		43	4.056.847	9,9%
	Óleo Diesel		2.166	4.802.600	11,7%
	Outros Energéticos de Petróleo		18	980.328	2,4%
<b>Total</b>			<b>2.952</b>	<b>41.119.492</b>	<b>100,0%</b>

Fonte: ANEEL (2017).

Observa-se na Tabela 1 que as UTE movidas à carvão mineral apresentam uma potência de 3389MW com 13 unidades pelo Brasil. Dentre essas unidades tem-se no Pecém/CE a UTE da empresa ENEVA com duas plantas instaladas, Pecém I e Pecém II, com potência de 1080MW o que significa, aproximadamente, 32% da potência total de UTE no Brasil. Essa UTE é a maior do Brasil em termo de potência.

O processo da queima do carvão mineral gera resíduos com características bem distintas. Esses resíduos são as cinzas de combustão do carvão mineral (CCCM). A Figura 2 apresenta um esquema do fluxo de operação de uma UTE, que utiliza carvão mineral como combustível.

Figura 2 - Esquema de geração de energia e produção de cinzas.



Fonte: Leandro, 2005.

A queima do carvão mineral produz cinzas de fundo e cinzas volantes. De acordo com a NBR 12.653 (ABNT, 2014) cinza volante é todo resíduo que resulta da combustão do carvão mineral pulverizado ou granulado, com atividade pozolânica. Ainda de acordo com a norma, atividade pozolânica é a capacidade de determinado material de reagir com hidróxido de cálcio em presença de água e formar compostos com propriedades cimentícias.

A cinza volante é um resíduo, finamente dividido, arrastado pelo fluxo dos gases da combustão e coletado pelos precipitadores eletrostáticos, representando cerca de 80% da cinza produzida. Já a cinza pesada é o resíduo de textura mais grosseira que cai no fundo da fornalha em tanques de resfriamento, sendo removida hidráulicamente, por fluxo de água, representando cerca de 20% da cinza produzida. A cinza de fundo, com estrutura cristalina definida e pouca reatividade, é usualmente utilizada como agregado miúdo para diversas finalidades, como blocos, argamassas, dentre outros (SILVA *et al.* (1999) e CHIES *et al.* (2003)).

Uma definição mais ampla das CCCM é apresentada por Martins (2001), em que o autor dividi os produtos da combustão do carvão mineral em três tipos:

- Escórias de caldeira (*boiler slag*) - são originadas durante a combustão de carvão granulado em grelhar móveis, sendo geralmente retiradas pelo fundo da fornalha, após serem apagadas em água. Apresentam granulometria grosseira e blocos sintetizados, contendo teores significativos de carbono (5% a 20%) e/ou material orgânico.
- Cinzas de fundo (*bottom ash*) - são cinzas mais e de granulometria média, que caem para o fundo das fornalhas de queima de carvão pulverizado ou

de leito fluidizado, podendo ser retiradas secas ou através de um fluxo de água.

- Cinzas volantes (*fly ash*) - são as cinzas leves constituídas de partículas muito finas. Este é o resíduo da combustão do carvão que entra no fluxo do gás da chaminé, podendo ser coletado nos precipitadores eletrostáticos ou em filtros mecânicos, ou ainda, serem exaladas para a atmosfera exterior.

Ainda de acordo com o autor, há um outro tipo de cinza/resíduo, sendo este considerado um subproduto da queima do carvão, proveniente da dessulfuração do gás da chaminé (*flue gas desulfurization* - FGD). Os resíduos de FGD são produzidos passando-se os gases por um meio aquoso alcalino, resultando uma combinação de cinza volante, sais de Ca-S (sulfito e/ou sulfato de cálcio) e carbonato de cálcio.

As propriedades das cinzas dependem de diversos fatores como: tipo de carvão, qualidade do carvão, tipo de caldeira, temperatura de queima, dentre outros. No que tange ao teor de cálcio, as cinzas se dividem em duas categorias: baixo, teores menores que 10% e alto, acima de 10% (FARIA, 2004).

Para realização do trabalho foram coletados dois tipos de cinzas, distinguindo-se inicialmente pelo método de captação, o qual uma foi pelo FGD e outra por precipitação eletrostática.

## 1.1 Justificativa

O avanço tecnológico, em busca de progresso, acaba por consumir uma grande quantidade de matéria-prima, seja ela na produção de bens ou na produção de serviços, que visa atender à demanda social.

A demanda de países em desenvolvimento por um ambiente construído maior e de melhor qualidade vai exigir um grande crescimento no setor da construção civil. Espera-se que a indústria de materiais de construção cresça duas vezes e meia entre 2010 e 2050, em nível mundial, sendo que nos países em desenvolvimento, crescerá mais de três vezes (IEA, 2009).

No Brasil, a expectativa é que o setor da construção dobre de tamanho até o ano 2022 (FGV, 2010).

O conceito de sustentabilidade é entendido no seu sentido amplo, conciliando aspectos ambientais com os econômicos e os sociais. Atualmente, os aspectos ambientais têm uma maior repercussão, tanto na mídia quanto em estratégias de marketing, fato bastante preocupante em um país com problemas sociais e econômicos como o Brasil. Os fatores

ambiente - economia - sociedade, devem ser considerados de maneira integrada, caso contrário não haverá um desenvolvimento sustentável.

Um dos materiais de construção mais utilizados é o cimento Portland, o qual é obtido a partir da queima das matérias-primas (fontes de CaO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, entre outros) em um forno rotativo a temperatura de até 1450 °C. A principal matéria-prima natural usada para fabricação do clínquer é a rocha calcária e o principal fator responsável pela emissão de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) no processo de fabricação de cimento Portland é a calcinação desse calcário.

Segundo Worrell *et al.* (2001) a cada 1.000 kg de calcita (CaCO<sub>3</sub>) calcinada são gerados 560 kg de CaO e 440 kg de CO<sub>2</sub>. Ainda segundo os autores, a reação química de calcinação é responsável por aproximadamente 52% das emissões de CO<sub>2</sub> no processo de fabricação do clínquer, enquanto o consumo de energia responde pelo restante. Considerando o consumo energético, tem-se que a cada 1.000 kg de clínquer fabricados gera-se em média aproximadamente 815 kg de CO<sub>2</sub> no seu processo de fabricação. Segundo o SNIC (2013), os valores de produção de CO<sub>2</sub> devido à indústria cimenteira é menor, com valores de 590kgCO<sub>2</sub>/ton.cimento, devido a melhorias no sistema industrial, tornando-o mais eficiente.

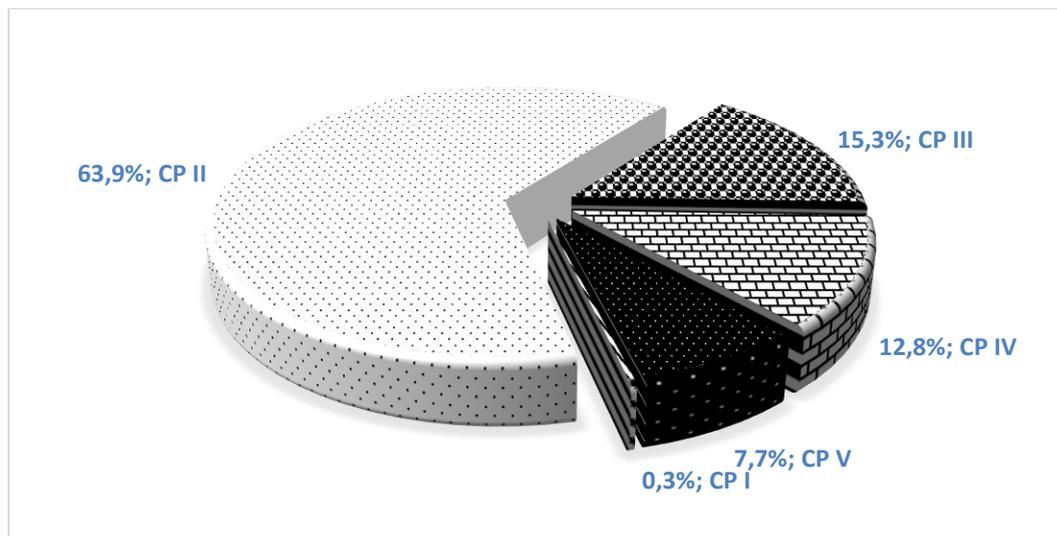
Uma maneira de aplicar o conceito de sustentabilidade está no uso de adições minerais na composição de material cimentício, pois, estas diminuem a extração de matéria prima para a produção do cimento Portland, reduzindo a emissão de gás carbônico para a atmosfera, além de dar destino aos subprodutos industriais e agroindustriais que, normalmente, são tratados como simples rejeitos (ISAIA e GASTALDINI, 2004).

O impacto ambiental da produção do cimento é inversamente proporcional ao teor de adição mineral incorporado na composição do material cimentício. Portanto, o cimento do tipo CP III, com até 70% de escória de alto forno na sua composição apresenta o melhor desempenho ambiental dentre os produzidos no Brasil, seguido do cimento CP IV, com até 50% de cinza volante (CARVALHO, 2002). Neste sentido, Isaia e Gastaldini (2004) afirmam:

As vantagens das adições minerais são muito significativas, não só no âmbito técnico como no econômico e, principalmente, ambiental, pois, a redução de emissão de CO<sub>2</sub>, de consumo de energia e, muitas vezes, de custo é proporcional à quantidade de adição mineral utilizada na mistura em substituição ao cimento.

No Brasil, a produção média de cimento Portland entre os anos de 2008 e 2013 foi de 59 milhões de toneladas.ano<sup>-1</sup> (SNIC, 2013). A produção de cimento em 2013 estava distribuída de acordo com a Figura 3.

Figura 3 - Distribuição percentual média, entre os anos de 2008 e 2013, dos diferentes tipos de cimento produzidos no Brasil.



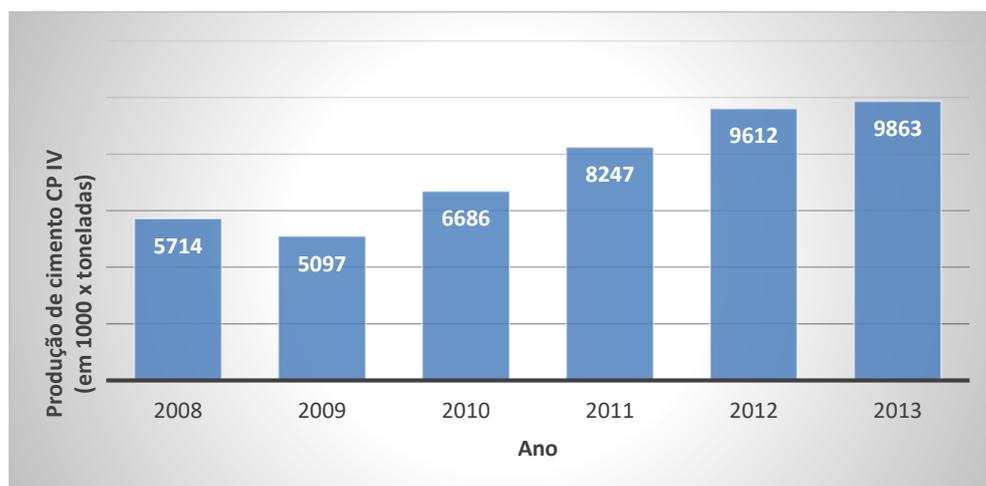
Fonte: SNIC (2013).

O cimento Portland pozolânico (CP IV) representou cerca de 12,8% da produção nacional, entre os anos de 2008 e 2013, ou seja, um volume entre 7,5 e 8,0 milhões de toneladas.

Segundo a NBR 5736 (ABNT, 1991), para este tipo de cimento, o teor de pozolana estabelecido em substituição ao clínquer deve estar entre 15% e 50%. Assim estima-se que o consumo de pozolana, no cimento CP - IV, variou entre 1,17 e 3,9 milhões de toneladas, podendo ser, além de cinza volante, cinzas da casca de arroz, cinzas do bagaço da cana, ou pozolanas naturais como sílica ativa e metacaulim.

Na Figura 4 pode-se observar a variação anual, entre 2008 e 2013, da produção de CP IV. O fato do CP IV utilizar uma parte do resíduo oriundo da queima do carvão mineral, a cinza volante, diminui os impactos ambientais de duas formas: através da redução da extração de matérias-primas para produção de cimento e por dar um destino a cinza volante, tornando-a um insumo.

Figura 4 - Produção anual de CP IV.

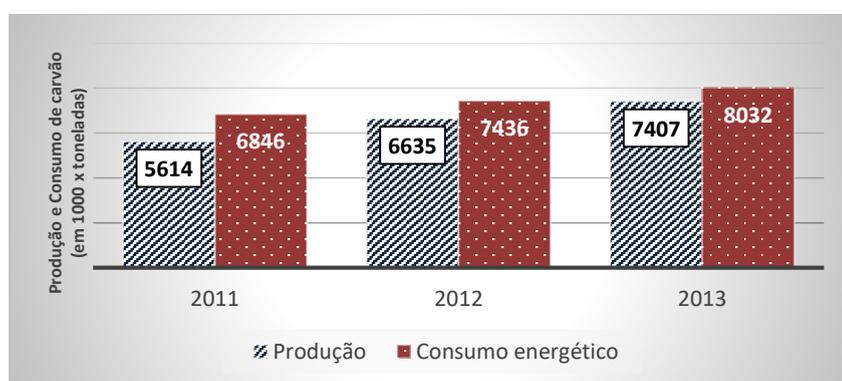


Fonte: SNIC (2013).

Pelos dados apresentados na Figura 4 observa-se que houve um crescimento na produção de cimento CP IV, entre os anos de 2009 e 2013, o que significa um aumento no consumo de pozolana. Em 2013, estima-se que houve um consumo entre 1,48 a 4,93 milhões de toneladas de pozolanas devido a produção desse cimento.

A produção de carvão mineral vem aumentando nos últimos anos, segundo o DNPM (2014). Ainda de acordo com o documento, a produção bruta de carvão mineral cresceu desde 2011 e observou-se também um aumento no consumo aparente<sup>1</sup> energético do carvão mineral, ou seja, carvão utilizado para queima em termelétricas. A Figura 5 apresenta a produção do carvão mineral beneficiado para energia e o consumo energético aparente de carvão no Brasil.

Figura 5 - Produção e consumo de carvão energético.



Fonte: DNPM (2014).

<sup>1</sup> Consumo aparente = Produção + Importação – Exportação (DNPM, 2014)

Na Figura 5 o consumo médio de carvão mineral foi de 7,4 milhões de toneladas e houve um crescimento no consumo do carvão com o tempo, para o período observado.

Além disso, pode-se afirmar que há uma tendência de aumento no consumo de carvão mineral para geração energia elétrica em UTE, uma vez que a Tabela 2 prevê um aumento nas potências das UE até 2024. Com isso, haverá uma maior geração de cinza volante.

Tabela 2 - Previsão de aumento de Usinas Elétricas.

Aumento projetado de capacidade instalada (MW)	2017	2018	2019	2020	2021	2022-2024	Sem previsão ***	Total
Usinas Eólicas - EOL	1.637,1	3.220,2	1.503,8	469,7	120,0	-	719,3	7.670,1
Usinas Hidrelétricas - UHE	1.833,3	4.114,0	2.600,6	1.983,3	63,7	40,5	810,4	11.445,9
Pequenas Centrais Hidrelétricas - PCH	176,8	135,6	419,1	547,9	110,5	18,8	523,5	1.932,3
Usinas Termelétricas - UTE	502,0	460,1	432,9	2.104,7	150,0	73,5	6.187,1	9.910,3
Usinas Solares Fotovoltáicas - UFV	256,0	1.658,9	476,0	-	-	-	589,7	2.980,5
<b>Total</b>	<b>4.405,3</b>	<b>9.588,8</b>	<b>5.432,4</b>	<b>5.105,6</b>	<b>444,2</b>	<b>132,9</b>	<b>8.830,0</b>	<b>33.939,1</b>
disto: sem restrição	4.227,4	6.328,0	3.188,7	1.862,9	-	-	-	15.607,0
com restrição (licença ambiental) *	177,9	3.260,8	2.243,7	3.242,7	444,2	132,9	-	9.502,1
grave restrição (ambientais e judiciais) **	-	-	-	-	-	-	8.830,0	8.830,0

Fonte: ANEEL (2017)

As previsões de aumento apresentadas na Tabela 2 contemplam a ampliação das UTE e/ou novas instalações.

De acordo com a CIENTEC (2016) o estado do Rio Grande do Sul (RS) tem uma produção atual de 2,1 milhões de ton.ano<sup>-1</sup> de cinza volante, com uma perspectiva de aumento para 5,9 milhões de ton.ano<sup>-1</sup> de cinza volante e 267.000 ton.ano<sup>-1</sup> de cinza de FGD.

No estado do Maranhão (MA) tem-se uma geração de 83.950 ton.ano<sup>-1</sup> de cinza volante e 52.560 ton.ano<sup>-1</sup> de cinza de FGD.

As cinzas geradas na UTE do Pecém, em regime de operação plena, são de 474.500 ton.ano<sup>-1</sup>, sendo composto de 69.350 ton.ano<sup>-1</sup> de cinza de fundo, 328.500 ton.ano<sup>-1</sup> de cinzas volantes e 76.650 ton.ano<sup>-1</sup> de FGD. A cinza de FGD pode apresentar um elevado teor de SO<sub>3</sub>, em virtude do seu método de captação, devendo-se avaliar os teores de SO<sub>3</sub> nos compósitos produzidos com essa cinza.

Apenas com os exemplos citados, tem-se uma geração atual de 2,66 milhões de ton.ano<sup>-1</sup> de cinza volante e 396.210 ton.ano<sup>-1</sup> de cinza de FGD. Além de outros tipos de resíduos que são gerados e que podem se caracterizar como pozolana, como cinza do bagaço da cana, cinza de casca de arroz, dentre outros.

Conforme já citado, o consumo de pozolana no CP IV foi entre 1,17 e 3,9 milhões de ton.ano<sup>-1</sup>, porém, mesmo com valor de absorção acima do valor de geração de cinza observa-se que a cinza volante não consegue ser totalmente aproveitada na indústria cimenteira. Pois

nem sempre o teor de pozolana utilizado no CP - IV é o teor máximo permitido por norma e nem sempre se usa só a cinza volante como pozolana, podendo ser utilizado pozolanas naturais ou outros tipos de resíduos pozolânicos.

Hoppe Filho (2008) estimou que 50% da cinza volante gerada é utilizada pela indústria cimenteira e uma parcela complementar, ainda não determinada, é utilizada pelas centrais de concreto. Segundo o CIENTEC (2016), no RS há um aproveitamento de 42% de cinza volante e 4,5% de FGD.

Portanto, a utilização das CCCM no concreto reforça a importância que se tem em reutilizar os resíduos gerados pelas indústrias e, especificamente, pela termoelétrica. Além disso, as utilizações das cinzas em concreto diminuem o consumo de cimento, o que por consequência, diminui a extração de recursos naturais. A Figura 6 e a Figura 7 apresentam a foto aérea e o local de armazenamento da cinza gerada pela queima do carvão, onde pode-se observar o montante de resíduo gerado sem que haja uma linha de produção para o total reaproveitamento deste resíduo, desta forma, há uma importância ambiental em reutilizar um resíduo, minimizando os impactos ambientais e contribuindo para uma construção sustentável.

Figura 6 - Foto aérea da termoelétrica.



Figura 7 - Armazenamento das cinzas provenientes da queima do carvão.



## 1.2 Objetivo

### 1.2.1 *Objetivo Geral*

Avaliar as propriedades físicas, mecânicas e de durabilidade do concreto com cinzas de combustão do carvão mineral, CCCM, da termoeletrica do Pecém.

### 1.2.2 *Objetivos Específicos*

- Avaliar a influência da CCCM nas propriedades da argamassa no estado fresco e endurecido;
- Avaliar as propriedades do concreto com CCCM no estado fresco;
- Avaliar as propriedades mecânicas do concreto com CCCM no estado endurecido;
- Avaliar a durabilidade do concreto com CCCM;
- Determinar o teor ótimo de substituição de cimento Portland pelas cinzas da termoeletrica do Pecém, considerando as características do concreto no estado fresco e no estado endurecido.

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

### 2.1 Adições minerais

#### 2.1.1 *Classificação das adições minerais*

As adições minerais podem ser classificadas em três principais grupos:

- Materiais pozolânicos;
- Materiais cimentantes;
- Fíleres.

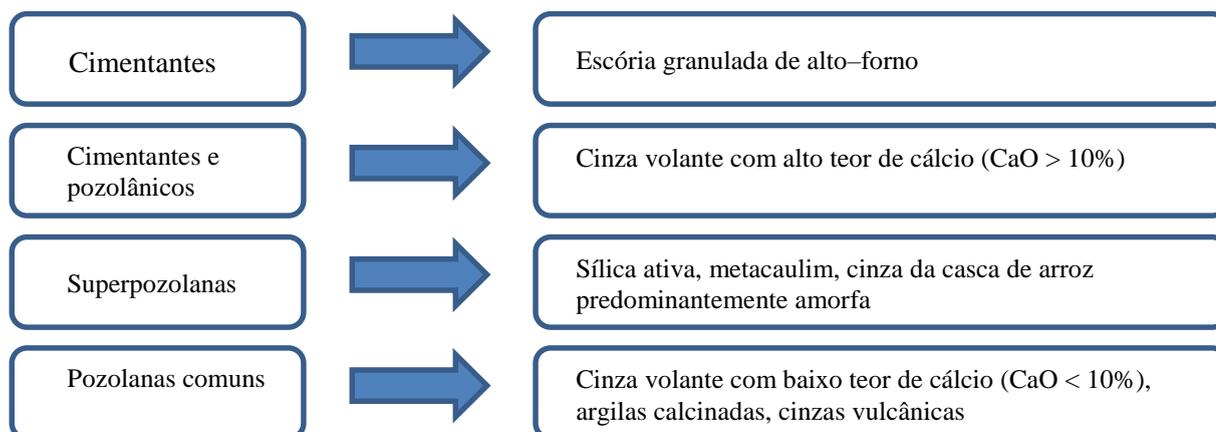
De acordo com a NBR 12.653 (ABNT, 2014) material pozolânico é um material silicoso ou sílico-aluminoso que por si só possui pouca ou nenhuma propriedade cimentícia mas, quando finamente dividido e na presença de água reage quimicamente com o hidróxido de cálcio, à temperatura ambiente, para formar compostos com propriedades cimentantes.

O material cimentante não necessita do hidróxido de cálcio para a formação de cristais, como o C-S-H, entretanto, sua hidratação ocorre de maneira lenta e a quantidade de cristais formados inviabiliza sua aplicação estrutural, já quando utilizado na substituição parcial de cimento Portland, a presença de hidróxido de cálcio acelera sua hidratação, como é o caso da escória de alto-forno (DAL MOLIN, 2011).

Já o fíler é uma adição mineral, finamente dividida, sem atividade química e sua ação basicamente se resume ao empacotamento granulométrico do compósito cimentício, com pontos de nucleação para hidratação do cimento.

Dal Molin (2011), baseada no trabalho de Mehta e Monteiro (2008), classifica a sílica ativa, o metacaulim e as cinzas de casa de arroz como pozolana de alta reatividade, ou superpozolanas, em virtude da alta reatividade desses materiais quando misturados com cimento e água. A autora ainda classificou as principais adições minerais para uso em concretos estruturais, classificadas de acordo com a sua forma de ação, conforme apresentado na Figura 8.

Figura 8 - Classificação das adições minerais para concretos.



Fonte: Dal Molin (2011).

### 2.1.2 Requisitos dos materiais pozolânicos

A NBR 12.653, lançada em 1992 e com última revisão feita em 2014, apresenta os requisitos para classificação de materiais pozolânicos. A norma agrupa os materiais pozolânicos em três classes: Classe N, Classe C ou Classe E:

- Classe N: Quaisquer pozolanas naturais ou artificiais, que obedçam aos requisitos da norma, como materiais vulcânicos de caráter petrográfico ácido, cherts<sup>2</sup> silicosos, terras diatomáceas e argilas calcinadas.
- Classe C: Cinzas volantes produzidas pela queima de carvão mineral em usinas termoelétricas, que obedçam aos requisitos da norma.
- Classe E: Quaisquer pozolanas, não contempladas na classe N e C, que obedçam aos requisitos da norma.

A Tabela 3 e a Tabela 4 apresentam os requisitos químicos e físicos, respectivamente, apresentados pela NBR 12.653 (ABNT, 2014). Os requisitos químicos e físicos presentes na Tabela 3 e na Tabela 4 foram apenas os da Classe C, que é o requisito para a classificação das CCCM como materiais pozolânicos. Além disso, encontra-se também os requisitos, químicos e físicos, da norma ASTM C 618 (ASTM, 2012), referente as cinzas tipo F e tipo C. A tipo F presente nessa norma é referente às cinzas volantes com baixo teor de  $\text{CaO}$ , apresentando apenas propriedades pozolânicas e a tipo C são cinzas volantes com alto teor de  $\text{CaO}$ , podendo apresentar propriedades cimentantes e pozolânicas.

<sup>2</sup> Chert é um tipo de rocha composta principalmente de sílica.

Ahmaruzzaman (2009) afirma que as cinzas volantes que se enquadram no tipo F apresentam teor de CaO entre 1% e 12%. Outra diferença entre as cinzas do tipo F e do tipo C é que o teor de álcalis e sulfatos do tipo C, geralmente, são mais altos. Já a NBR 12.653 (ABNT, 2014) não faz distinção das cinzas volantes em função da concentração de CaO presente na cinza.

Tabela 3 - Requisitos químicos de materiais pozolânicos.

Propriedades	Classe de material pozolânico		
	Classe C (%)	Tipo F (%)	Tipo C (%)
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$	$\geq 70$	$\geq 70$	$\geq 50$
$\text{SO}_3$	$\leq 5$	$\leq 5$	$\leq 5$
Teor de umidade	$\leq 3$	$\leq 3$	$\leq 3$
Perda ao fogo	$\leq 10$	$\leq 6$	$\leq 6$
Álcalis disponíveis em $\text{Na}_2\text{O}$	$\leq 1,5$	-	-
Norma	NBR 12653 (ABNT, 2014)	ASTM C 618 (ASTM, 2012)	ASTM C 618 (ASTM, 2012)

Vale salientar que os ensaios citados na Tabela 3 são referentes ao cimento, devendo, assim, fazer as devidas adaptações para os materiais pozolânicos, substituindo o cimento Portland pelo material pozolânico a ser analisado.

A NBR 12653 (ABNT, 2014) e a ASTM C 618 (ASTM, 2012) são bem semelhantes e, apesar da norma brasileira estabelecer os requisitos para classificação das cinzas volantes como materiais pozolânicos, alguns autores como Mehta e Malhotra (1996) apresentam algumas críticas a norma brasileira, por exemplo: a quantidade mínima de 70% de  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$  não apresenta relação direta com as propriedades do material, pois, parte-se do princípio de que o material se encontra na fase amorfa, entretanto, se o mesmo se encontrar em estado cristalino, ainda que acima de 70%, o material não apresentará pozolanicidade, mas para a norma será classificado como pozolana. Os autores citam que a atividade pozolânica do material depende principalmente da quantidade de  $\text{SiO}_2$  e das fases amorfas presentes.

Mehta e Malhotra teceram essa crítica a NBR 12653 (ABNT, 1992), entretanto observa-se que a versão atual ainda possui o mesmo parâmetro, portanto, a crítica feita pelos autores permanece. Outra crítica apontada está em não se considerar as cinzas com propriedades cimentantes e pozolânicas, considerando apenas as cinzas com propriedades pozolânicas, diferentemente da versão atual da ASTM C 618 - 12a (ASTM, 2012), desconsiderando assim

os benefícios proporcionados pela existência de maiores teores de óxido de cálcio que podem estar presentes nas cinzas volantes.

A Tabela 4 apresenta os requisitos físicos das cinzas volantes, de acordo com NBR 12.653 (ABNT, 2014), e das cinzas com baixo e alto teor de CaO, classe F e C, respectivamente, da ASTM C 618 (ASTM, 2012).

Tabela 4 - Requisitos físicos de materiais pozolânicos.

Propriedades	Classe de material pozolânico		
	Classe C	Tipo F	Tipo C
Material retido na peneira 45 µm	≤ 20 %	≤ 34%	≤ 34%
Índice de desempenho com cimento Portland aos 7 dias, em relação ao controle	-	≥ 75 %	≥ 75 %
Índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias, em relação ao controle	≥ 90%	≥ 75%	≥ 75%
Atividade pozolânica com cal aos 7 dias	≥ 6 MPa	-	-
Absorção de água, em relação ao controle	-	≤ 105 %	≤ 105 %
Expansão ou retração em autoclave	-	0,8 %	0,8 %
Norma	NBR 12653 (ABNT, 2014)	ASTM C 618 (ASTM,2012)	

(\*) Esse método de ensaio deve ser adaptado, substituindo-se o metacaulim pelo material pozolânico em análise.

Gava (1999) apresentou diversas críticas a metodologia utilizada para a determinação do IAP, por não apresentarem concordância com o real desempenho das pozolanas nas argamassas. Ainda segundo a autora, o método de ensaio para determinação do

IAP pode considerar pozolanas de baixíssima reatividade, enquanto que, a realização do ensaio por outras normas, consideram o material como ótima pozolana.

A NBR 13956 - 1 (ABNT, 2012) e NBR 15894 - 1 (ABNT, 2010) tratam dos requisitos químicos e físicos da sílica ativa e metacaulim, respectivamente, e alguns desses requisitos estão presentes na Tabela 5.

Tabela 5 - Características da sílica ativa e metacaulim.

Sílica Ativa		Metacaulim	
Teor de SiO <sub>2</sub>	≥ 85%	SiO <sub>2</sub>	≥ 44% e ≤ 65%
Finura na # 45 μm	≤ 10 %	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	≥ 32% e ≤ 46%
		Finura na # 45 μm	≤ 10 %

Fonte: NBR 13.956 - 1 (ABNT, 2012) e NBR 15.894 - 1 (ABNT, 2010).

Conforme apresentado na Tabela 5, observa-se que há um maior rigor nas características químicas e físicas da sílica ativa e do metacaulim, o que confere a estes materiais uma maior reatividade em relação à cinza volante, devido à maior quantidade de óxidos que devem estar presentes nesses materiais, melhorando as reações químicas, além de terem que apresentar uma maior quantidade de partículas finas. Além disso, observa-se que o que foi dito por Mehta e Malhotra (1996) sobre o teor de SiO<sub>2</sub> é corroborado por Dal Molin (2011), já que a sílica ativa e o metacaulim são considerados superpozolanas, enquanto que a cinza volante é uma pozolana comum.

A pozolanidade da cinza está intimamente ligada ao teor de SiO<sub>2</sub>, visto ser a sílica amorfa que se combina com a cal livre e a água dando origem à formação de quantidade suplementares de C-S-H (AZEVEDO, 2002). Segundo Alonso e Wesche (1991), cinzas com teores de SiO<sub>2</sub> inferiores à 35% são praticamente inativas como pozolana, não devendo ser incorporadas ao concreto.

### 2.1.3 Características químicas da cinza volante

As características químicas das cinzas são influenciadas por diversos fatores como o tipo do carvão, processo de queima do carvão, técnicas de captação, dentre outros fatores.

Ahmaruzzaman (2009) afirma que existe, basicamente, quatro tipos de carvão que, após a queima, geram quatro tipos de cinza: antracito, betuminoso, sub betuminoso e lignito.

Os principais componentes das cinzas betuminosas são a sílica, a alumina, o óxido de ferro e o cálcio, com quantidades variáveis de carbono, medido pela perda ao fogo.

As cinzas lignitas e sub-betuminosas apresentam altas concentrações de óxidos de cálcio e magnésio e baixas concentrações de óxido de sílica e ferro, bem como menor teor de carbono, se comparado com as cinzas betuminosas. Por fim, o autor afirma que existem poucas cinzas provenientes de carvão antracito e, por isso, não há grandes quantidades de informações para a determinação das composições químicas das cinzas oriundas desse carvão. As informações da Tabela 6 foram extraídas do trabalho do autor e mostra as composições químicas das cinzas oriundas dos diferentes tipos de carvão.

Tabela 6 - Composição química das cinzas volantes de diferentes tipos de carvão

Componentes (% em peso)	Betuminoso	Sub-betuminoso	Lignito
SiO <sub>2</sub>	20-60	40-60	15-45
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5-35	20-0	10-25
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10-40	4-10	4-15
CaO	1-12	5-30	15-40
MgO	0-5	1-6	3-10
SO <sub>3</sub>	0-4	0-2	0-10
Na <sub>2</sub> O	0-4	0-2	0-6
K <sub>2</sub> O	0-3	0-4	0-4
Perda ao fogo	0-15	0-3	0-5

Fonte: Ahmaruzzaman (2009)

Ahmaruzzaman (2009) tece alguns comentários sobre as características químicas das cinzas e o tipo das cinzas de acordo com a norma ASTM C 618 - 12a (ASTM, 2012), em que, geralmente, as cinzas provenientes do carvão sub-betuminoso ou carvão lignito se enquadram como cinza tipo C, apresentando propriedades cimentícias e pozolânicas. Por outro lado, cinzas provenientes de carvão betuminoso ou antracito se enquadram como cinza tipo F.

No que tange as reações pozolânicas das cinzas, para que a mesma ocorra, é necessário que a sílica e os aluminatos reativos estejam solubilizados, o que acarreta um certo tempo. Antiohos e Tsimas (2004) afirmam que a atividade pozolânica requer a presença de Ca(OH)<sub>2</sub> e de álcalis do cimento, pH elevado para solubilização da fase vítrea da pozolana, resultando na formação de hidratos com maior ganho de resistência.

A cinza volante mais utilizada no Brasil é a que contém baixo teor de cálcio, inferior a 10%. Esta é tradicionalmente adicionada na fabricação de cimento Portland pozolânico, CP IV, que contém um teor de pozolana entre 15% e 50% (DAL MOLIN, 2011)

A substituição parcial do cimento Portland por cinza volante, ou de outra pozolana, diminui o calor de hidratação da mistura, em virtude das pozolanas reagirem após a formação de portlandita,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , que é formada na hidratação do cimento. Portanto, a reação pozolânica é uma reação secundária ou reação de 2ª ordem. Santhikumar (1993) mediu a taxa de calor de hidratação de cimento com cinza volante e observou que o pico exotérmico era retardado, conforme aumentava-se o teor de cinza volante.

A Tabela 7 apresenta as características químicas da cinza volante, obtidas pelo ensaio de FRX, extraídas de alguns autores que realizaram estudos com utilização de cinza volante com baixo teor de CaO, além disso, observa-se, também, os limites para cada variável de acordo com a NBR 12.653 (ABNT, 2014) e a norma ASTM C 618 (ASTM, 2012).

Tabela 7 - Características químicas de diferentes cinzas volantes utilizadas em diversos estudos.

Propriedades	$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{SO}_3$	Álcalis disponíveis	CaO	Perda ao fogo
Bentz <i>et al.</i> (2015)	92,70 %	0,02 %	1,78 %	0,70 %	0,80 %
Bui <i>et al.</i> (2015)	90,67 %	0,36 %	1,20 %	1,26 %	2,80 %
Görhan (2015)	76,50 %	1,54 %	2,45 %	6,34 %	3,26 %
Hoppe Filho (2008)	91,40 %	0,30 %	1,63 %	3,99 %	2,02 %
Kabay <i>et al.</i> (2015)	88,11 %	0,95 %	-	1,90 %	1,69 %
Mejía <i>et al.</i> (2015)	79,70 %	0,60 %	2,20 %	0,80 %	14,80 %
Shaikh e Supit (2015)	91,20 %	0,21 %	0,99 %	1,61 %	0,50 %
Limites ASTM C 618 - F	$\geq 70$ %	$\leq 5$ %	-	-	$\leq 6$ %
Limites ASTM C 618 - C	$\geq 50$ %	$\leq 5$ %	-	-	$\leq 6$ %
Limites NBR 12653 - C	$\geq 70$ %	$\leq 5$ %	$\leq 1,5$ %	-	$\leq 10$ %

Limbachiya *et al.* (2015) realizaram a análise química da cinza volante, durante 6 meses, sendo que, a cada mês os autores coletaram uma amostra diferente da cinza, proveniente da queima do carvão mineral em uma termoelétrica, conforme apresentado na Tabela 8.

Tabela 8 - Propriedades químicas de uma cinza volante ao longo do tempo.

Mês do ensaio	SiO <sub>2</sub> + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub>	Álcalis disponíveis	CaO
Julho	80,08 %	0,49 %	3,66 %	2,81 %
Agosto	85,24 %	0,51 %	3,12 %	3,00 %
Setembro	80,79 %	0,57 %	3,00 %	3,95 %
Outubro	81,47 %	0,61 %	2,60 %	4,20 %
Novembro	74,03 %	0,84 %	2,84 %	6,13 %
Dezembro	77,06 %	0,48 %	2,65 %	5,12 %

Fonte: Limbachiya *et al.* 2015.

Observa-se na Tabela 7 que as cinzas citadas de diferentes estudos possuem características bem semelhantes e apenas em alguns casos ocorrem poucos desvios dos limites estabelecidos pelas normas, com exceção do trabalho de Mejía *et al.* (2015), cuja a perda ao fogo foi de quase 15%.

No trabalho de Limbachiya *et al.* (2015), apresentado na Tabela 8, observa-se pouca variabilidade nas propriedades químicas da cinza volante, durante 6 meses de análise realizados pelos autores, cuja as características apresentadas se enquadram nos requisitos da ASTM C 618 - 12a (ASTM, 2012).

Portanto, de maneira geral, as cinzas volantes, que são provenientes da queima do carvão mineral em termoelétricas, apresentam características químicas que atendem aos requisitos das normas de materiais pozolânicos.

As cinzas geralmente apresentam três tipos de elementos: minerais cristalinos, partículas de carbono não queimada e partículas não cristalinas de aluminossilicato de vidro, cada qual com sua reatividade na matriz cimentícia (WARD e FRENCH, 2005). Com ajuda da técnica de DRX é possível identificar os elementos presentes na cinza volante e a suas fases cristalinas, dentre as quais se destacam: quartzo, mulita, hematita, ferrita, aluminato tricálcico e cal (CHANCEY, 2008).

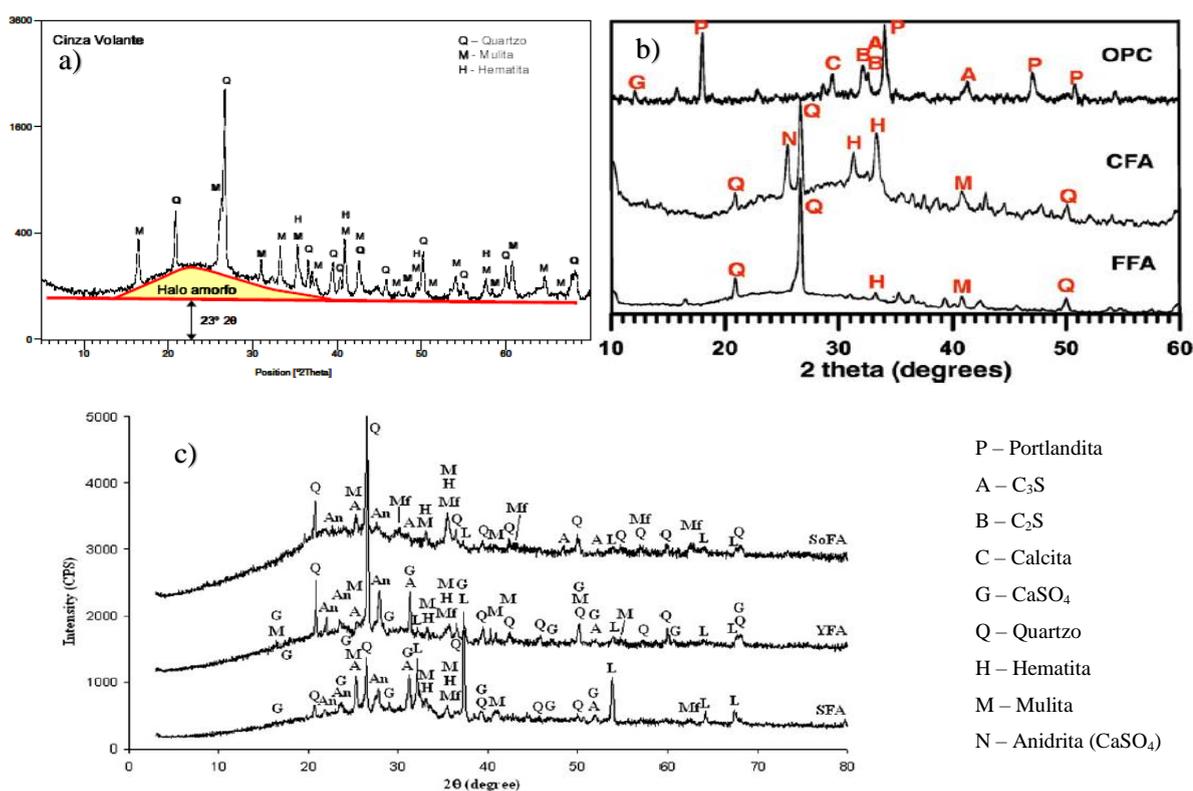
Hoppe Filho (2008) apresentou o difratograma de uma cinza volante na região do Rio Grande do Sul, cujo os compostos cristalinos presentes na cinza eram Quartzo, Mulita e Hematita. O autor observou ainda a presença de um halo amorfo, característico de materiais pozolânicos. A Figura 9a apresenta o difratograma do estudo citado.

Dakhane *et al.* (2017) analisaram quimicamente dois tipos de cinza volante, com baixo teor de cálcio (<10%) e com alto teor de cálcio (>10%). A Figura 9b apresenta o

difratograma do cimento Portland (OPC) e da cinza volante com baixo teor de cálcio (FFA) e com elevado teor de cálcio (CFA).

Yilmaz *et al.* (2015) analisaram as características de três cinzas volantes, realizando ensaios de DRX, FRX, MEV, dentre outros. A cinza SFA apresentou um teor de 32% de CaO, enquanto que as outras duas cinzas, SoFA e YFA, apresentaram composição química dentro dos limites da Classe C da NBR 12.653 (ABNT, 2014), conforme apresentado na Tabela 3. A Figura 9 apresenta o difratograma das cinzas analisadas pelos autores, e pode-se observar a semelhança do difratograma das cinzas SoFA e YFA, as quais também são semelhantes com os difratograma apresentados por outros autores.

Figura 9 - Difratograma de cinzas volantes utilizadas em diferentes estudos.



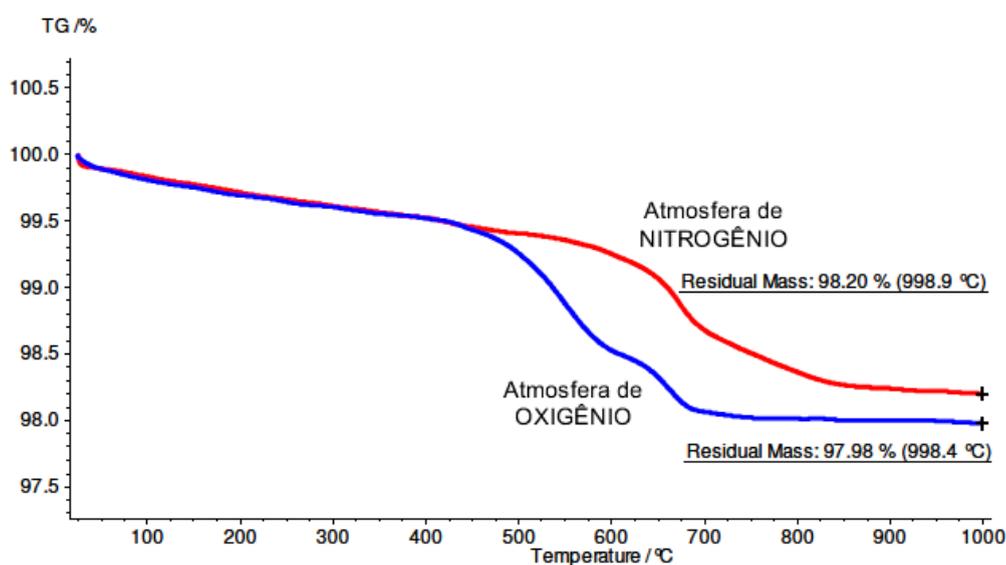
Fonte: a) Hoppe Filho (2008). b) Dakhane *et al.* (2017). c) Yilmaz *et al.* (2015).

Apesar de as cinzas serem de locais e épocas de produção distintas, pode-se observar a semelhança entre os difratogramas da cinza de Hoppe Filho (2008), da cinza FFA apresentada por Dakhane *et al.* (2017) e das cinzas SoFA e YFA apresentada por Yilmaz *et al.* (2015), principalmente no halo amorfo e no pico de quartzo, que fica entre 26° e 27°, presente nesses difratogramas.

Nas cinzas CFA, apresentada na Figura 9b, e SFA, apresentada na Figura 9c, dos autores Dakhane *et al.* (2017) e Yilmaz *et al.* (2015), respectivamente, observa-se, também, uma presença do halo amorfo e de um pico de quartzo entre o 26° e 27°, entretanto, esses picos não se sobressaem tanto em relação as primeiras cinzas.

Outro ensaio realizado na cinza volante é a termogravimetria (TG), que tem o objetivo de analisar a eficiência da queima do carvão pulverizado, através da determinação da massa residual de carbono. Hoppe Filho (2008) realizou a TG de uma cinza volante em atmosfera de nitrogênio e oxigênio, em que o autor afirma que a perda de massa em atmosfera de nitrogênio se deve a alguma decomposição/transformação de compostos orgânicos presentes na cinza volante, porém, não à queima do carvão residual presente. Em atmosfera de oxigênio a perda de massa total é de 2,02%, com perda de 1,45% após a temperatura de 450°C devido à queima do carvão residual. A Figura 10 mostra a TG realizada pelo autor.

Figura 10 - TG da cinza volante utilizada por Hoppe Filho (2008).



A perda de massa no ensaio em atmosfera de oxigênio foi de aproximadamente 2%, o que mostra a eficiência da queima do carvão nessa termoelétrica. Ainda segundo Hoppe Filho (2008), a diferença de perda de massa entre a atmosfera inerte e atmosfera oxidante revela a massa de carbono residual presente na cinza volante, ou seja, menos de 0,2%.

#### 2.1.4 Características físicas da cinza volante

As características físicas das cinzas volantes são muito variáveis e dependem de alguns fatores como: composição e grau de pulverização do carvão, da qualidade e do tipo de

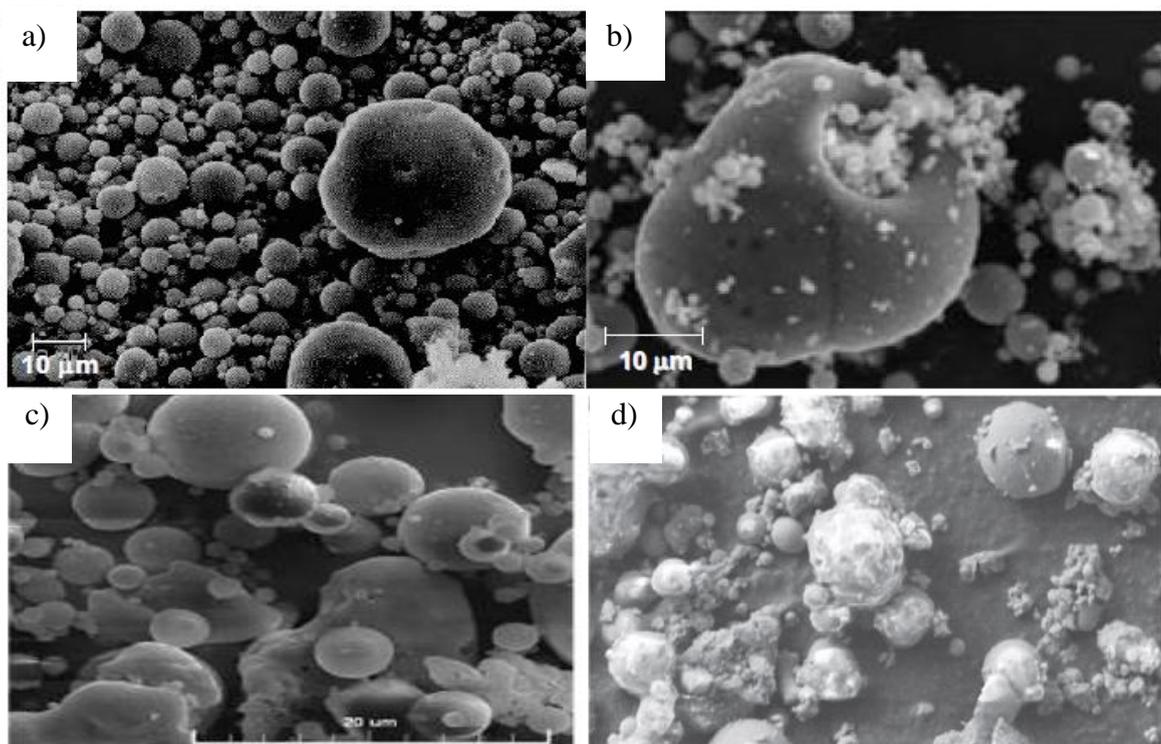
carvão, e também do método de captação das cinzas, como precipitação eletrostática ou captação pelo FGD.

As partículas das cinzas volantes geralmente são esféricas e possuem diâmetro entre  $1\mu\text{m}$  e  $150\mu\text{m}$ , com mais de 50% das partículas menores que  $20\mu\text{m}$ , já a área específica Blaine está normalmente entre  $2500\text{ cm}^2/\text{g}$  e  $6000\text{ cm}^2/\text{g}$  (NEVILLE, 1997). Nos estudos realizados por Azevedo (2002) e Dal Molin (2011) o diâmetro das partículas variou entre  $1\mu\text{m}$  e  $150\mu\text{m}$ , com a maioria dos diâmetros menor que  $45\mu\text{m}$  e a área específica Blaine variou entre  $3000\text{ cm}^2/\text{g}$  e  $7000\text{ cm}^2/\text{g}$ .

Hoppe Filho (2008) observou, através da MEV, que as partículas das cinzas eram arredondadas, entretanto, haviam, também, inúmeras partículas irregulares e de superfície rugosa, aumentando consideravelmente a área exposta do grão, quando comparada a uma superfície esférica.

A Figura 11 apresenta algumas micrografias de cinzas volante realizadas por diferentes autores. As micrografias das cinzas da Figura 11a e Figura 11b, Figura 11c e Figura 11d foram extraídas dos trabalhos de Azevedo (2002), Jalal *et al.* (2015) e Kabay *et al.* (2015), respectivamente, cuja as cinzas se classificam na classe C da NBR 12.653 (ABNT, 2014).

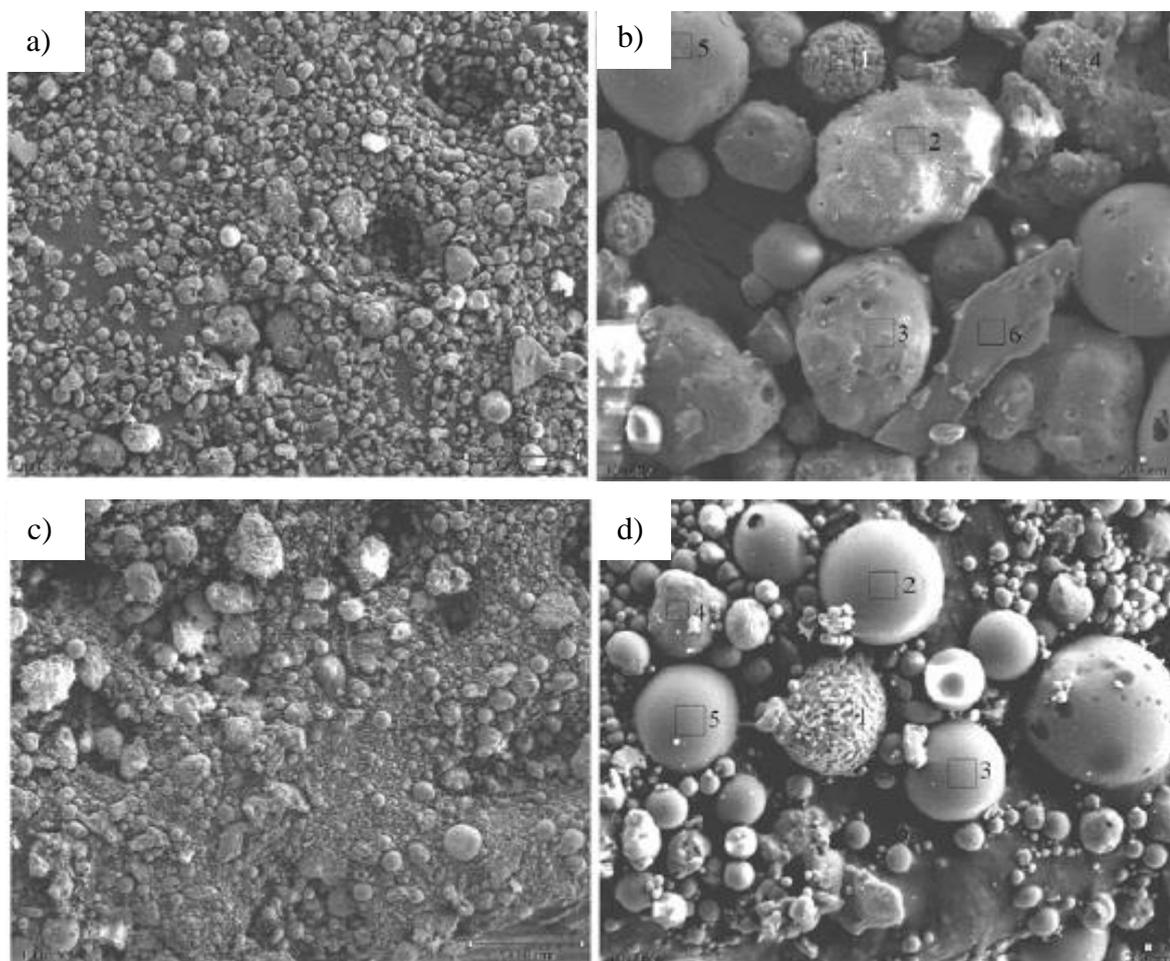
Figura 11 - Micrografias de cinzas com baixo teor de CaO, realizadas por diferentes autores.



Fonte: a) - Azevedo (2002) b) - Azevedo (2002) c) - Jalal *et al.* (2015) e d) - Kabay *et al.* (2015).

Yilmaz (2015) estudou as características de três cinzas, dentre as quais duas delas possuem um elevado teor de CaO, as quais foram nomeadas de YFA e SFA, proveniente do processo de FGD. A YFA apresentou um teor de CaO de 12,79% e SiAlFe ( $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ ) de 79,81% e a SFA apresentou um teor de CaO de 32,16% e 59,03% de SiAlFe. A Figura 12 apresenta a micrografia das cinzas citadas.

Figura 12 - Micrografias de cinzas com alto teor de CaO, realizadas por diversos autores.



Fonte: Yilmaz (2015) a) - YFA, b) - YFA, c) - SFA e d) - SFA.

As cinzas apresentadas na Figura 11 e na Figura 12 são, de maneira geral, arredondadas e de formato semelhante, em que também observam-se poucas partículas irregulares.

Outras características físicas das cinzas são a massa específica e o diâmetro médio das partículas. A primeira influencia na massa específica do compósito, em que geralmente a substituição parcial de cimento Portland por cinza volante diminui o valor da massa específica da mistura, uma vez que a cinza volante, em geral, é mais leve que o cimento. Já os tamanhos

das partículas das cinzas, que podem ser mensuradas pela granulometria das cinzas ou pela medição da superfície específica pelos métodos Blaine e BET, influenciam no efeito nucleador na fase de hidratação, no índice de vazios do concreto e na demanda de água de amassamento, conforme será visto adiante.

A Tabela 9 apresenta o diâmetro médio, a massa específica das cinzas e a finura obtida pelos métodos Blaine e BET de cinzas volantes estudadas por alguns autores.

Tabela 9 - Características físicas das cinzas volante, utilizadas por diversos autores.

Autores	D <sub>50</sub> (µm)	Massa Específica (kg/m <sup>3</sup> )	Área Específica Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	Área Específica BET (cm <sup>2</sup> /g)
Bentz <i>et al.</i> (2015)	18,4	2490	-	12800
Bui <i>et al.</i> (2015)	-	2210	3290	-
Hoppe Filho (2008)	44,25	2380	6780	36300
Kabay <i>et al.</i> (2015)	-	2210	3545	-
Mejía <i>et al.</i> (2015)	19,5	2216	-	-
Shaikh e Supit (2015)	10,0	2600	-	-

Observa-se que as áreas específicas Blaine presentes na Tabela 9 estão dentro do intervalo apresentado por Azevedo (2002) e Dal Molin (2011), citado anteriormente. Porém, existe uma diferença significativa nos limites estabelecidos, uma vez que a cinza com 6000 cm<sup>2</sup>/g ocupa o dobro da área de uma cinza com finura de 3000 cm<sup>2</sup>/g, para uma unidade de massa, e isso pode alterar significativamente as características do concreto, tanto no estado fresco quanto no estado endurecido. Uma cinza mais fina, em geral, requer uma maior quantidade de água de amassamento, ou uma maior quantidade de aditivo plastificante. Portanto, para um maior controle na produção de compósitos com cinza volante o ideal é fazer ensaios de caracterização, química e física, ao longo do tempo, principalmente das características físicas.

Os materiais sólidos podem se estruturar de maneira cristalina ou amorfa, de forma que o primeiro apresenta um arranjo tridimensional que se repete no espaço, ao passo que o segundo não apresenta um arranjo ordenado de longo alcance. Esses arranjos químicos influenciam a massa específica dos materiais e, não podendo ser diferente, a massa específica da cinza volante. A cinza volante apresenta em sua estrutura química fases cristalinas e fases amorfas, conforme observado na Figura 9. Portanto, os componentes cristalinos presentes nas cinzas volantes influenciam na massa específica da cinza, em virtude do fator de empacotamento atômico (FEA), cujo valor é calculado pela razão entre o volume dos átomos

na célula e o volume total da célula, que varia em função da estrutura cristalina, podendo ser cúbica de face centrada (CFC), cúbica de corpo centrado (CCC), hexagonal compacta (HC), dentre outros, a depender da estrutura cristalina e da massa dos átomos presentes nas células.

## 2.2 Características do concreto com CCCM

A utilização das cinzas no concreto pode ser realizada de três formas: como adição ao concreto, neste caso o consumo de cimento permanece constante e diminui o consumo de agregados, ou por substituição parcial, em massa, do cimento Portland pela cinza volante, retirando uma massa “x” de cimento e adicionando a mesma quantidade, em massa, de cinza volante, ou por substituição parcial, em volume, do cimento Portland pela cinza volante e, nesse caso, o volume de aglomerante permanece constante, podendo variar a massa de aglomerante devido às diferenças entre as massas específicas dos materiais.

As cinzas volantes apresentam alguns benefícios quando utilizadas em concreto como: melhoria da reologia do concreto no estado fresco; minimização da porosidade capilar do concreto; a redução da fissuração gerada pelas ações térmicas em concreto; o aumento da durabilidade, principalmente a ataques químicos (águas ácidas, sulfatadas e reações álcalis-agregado (RAA)), em função da diminuição do teor de hidróxido de cálcio na pasta e o aumento da resistência mecânica do concreto endurecido (MALHOTRA e MEHTA, 1996; DAL MOLIN, 2005; MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Andrade e Tutikian (2011) citam que a cinza volante é uma das principais adições minerais empregadas na fabricação de cimento Portland ou na incorporação ao concreto.

Os mecanismos de hidratação dos concretos com cinzas são influenciados pelas propriedades das cinzas como a estrutura cristalina, características químicas e físicas e fatores externos como a relação a/aglo, teor de adição ou substituição, temperatura de cura, dentre outros (DURDZIŃSKI *et al.* 2015).

A utilização da cinza volante nos compósitos cimentícios modificam tanto às características físicas quanto às características químicas da mistura. Fisicamente, a forma e o tamanho das partículas têm uma influência significativa nas propriedades do aglomerante. Já as características químicas das cinzas têm sido a base para que a substituição do cimento Portland por cinza volante seja viável (HEMALATHA e RAMASWAMY, 2017).

O entendimento da influência das cinzas nas propriedades do concreto no estado fresco e endurecido é de suma importância para prever o comportamento desse compósito.

### 2.2.1 *Influência das cinzas nas propriedades do concreto no estado fresco*

A característica inicial observada na produção de concreto é a consistência, medida por meio do ensaio de abatimento de tronco de cone, ou *slump test*, preconizado pela NBR NM 67 (ABNT, 1998). Romano *et al.* (2011) citam algumas definições de trabalhabilidade, de acordo com entidades ligadas à tecnologia do concreto, dentre elas tem-se a:

- *American Concrete Institute* (ACI): Facilidade e homogeneidade do material na mistura, lançamento, adensamento e acabamento.

As cinzas, de maneira geral, apresentam duas características que influenciam diretamente na trabalhabilidade do concreto: formato e tamanho das partículas. Quando a cinza apresenta um formato arredondado, característica presente na maioria das cinzas, conforme já observado na Figura 11 e na Figura 12, pode ocorrer um aumento na trabalhabilidade do concreto, pois, esse formato facilita o rolamento entre as partículas. Por outro lado, observa-se que, na maioria dos casos, quão mais fina é a cinza maior é a demanda de água na mistura, o que pode acarretar em uma diminuição na trabalhabilidade do concreto. Logo, observa-se que nos casos em que a trabalhabilidade do concreto aumentou com a utilização da cinza volante houve uma predominância no efeito do formato sobre a finura da cinza e nos casos em que há uma diminuição na trabalhabilidade do concreto, em virtude da utilização da cinza volante, observa-se que houve uma predominância no efeito da finura sobre o formato da cinza.

Nos estudos realizados em concretos com cinzas de FGD tem-se observado que a trabalhabilidade do concreto diminui com o aumento no teor da cinza. É o que se observou nos trabalhos de:

Ponikiewski e Golaszewski (2014) que realizaram substituição, em massa, do cimento Portland por cinza nos teores de 10%, 20% e 30%;

Khatib *et al.* (2016) que realizaram substituição volumétrica do cimento Portland por cinza nos teores de 20%, 30%, 40%, 70% e 90%; e

Chousidis *et al.* (2015) que realizaram um estudo de concreto com cinza volante obtendo valores de abatimento de tronco de cone de 23cm, 16cm e 9cm, para os concretos de referência, 5% de cinza volante e 10% de cinza volante, respectivamente.

Nos trabalhos de concretos que utilizam cinza de FGD os autores apontam que a perda de trabalhabilidade da mistura ocorre em virtude da elevada finura da cinza.

Dal Molin (2008) cita que a substituição parcial, em massa, do cimento Portland pela cinza resulta em um elevado volume de aglomerante, devido à diferença entre as massas

específicas desses materiais. A seguir, tem-se alguns estudos relatando as propriedades dos concretos com cinzas volantes que se enquadram na classe C da NBR 12.653 (ABNT, 2014).

Ikotun *et al.* (2017) executaram traços de concreto com cinza, nos teores de 30% e 50% de substituição, em massa, e observaram que o aumento no teor de cinza aumentou a trabalhabilidade do concreto.

Wang *et al.* (2017) analisaram a influência de uma cinza volante em duas classes de resistência à compressão de concreto, C20 e C30. Os autores observaram que o aumento no teor de cinza volante, feito através de substituição, em massa, nos teores de 15%, 30% e 45%, do cimento por cinza, acarretou num aumento da trabalhabilidade do concreto, nas duas classes.

Shaikh e Supit (2015) também observaram uma melhor trabalhabilidade nos concretos com cinzas, em que os autores usaram teores de substituição, em massa, de 40% e 60%.

Kabay *et al.*, (2015) constataram que o aumento do teor de cinza volante até 20%, manteve a consistência praticamente constante e houve uma diminuição na massa específica.

Cheng *et al.* (2017) observaram que o concreto com 15% de cinza volante necessitou um maior consumo de aditivo superplastificante e, no entanto, o traço apresentou menor trabalhabilidade que o traço de referência.

Sengul *et al.* (2005) observaram que os concretos com cinza volante apresentaram valores de *slump* inferiores ao concreto de referência e a massa específica da mistura diminuía com o aumento do teor de cinza.

A Tabela 10 concatena o comportamento das propriedades dos concretos com cinzas no estado fresco, verificados em diversos estudos. Observa-se que não há um consenso sobre a influência da cinza classe C na trabalhabilidade do concreto. Os estudos com cinzas de FGD, por outro lado, mostram que o uso da cinza diminui a trabalhabilidade do concreto. No que tange à massa específica, poucos autores mediam essas características, nos seus respectivos estudos, porém, há um consenso que a massa específica do concreto tende a diminuir, uma vez que as massas específicas das cinzas são menores que a massa específica do cimento Portland.

Tabela 10 - Influência das cinzas nas propriedades do concreto no estado fresco.

Autores	Tipo de substituição	Tipo de cinza	<i>Slump</i> *	Massa específica**
Ponikiewski e Golaszewski (2014)	Massa	FGD	↓	-
Khatib <i>et al.</i> (2016)	Volumétrica	FGD	↓	-
Chousidis <i>et al.</i> (2015)	Massa	FGD	↓	↓
Ikotun <i>et al.</i> (2017)	Massa	C	↑	-
Wang <i>et al.</i> (2017)	Massa	C	↑	-
Shaikh e Supit (2015)	Massa	C	↑	-
Kabay <i>et al.</i> (2015)	Massa	C	cte	↓
Cheng <i>et al.</i> (2017)	Massa	C	↓	-
Sengul <i>et al.</i> (2005)	Massa	C	↓	↓

\* (↑) O valor da variável aumenta com o uso da cinza. (↓) O valor da variável diminui com o uso da cinza.  
(Cte) O valor da variável permanece constante com o uso da cinza.

\*\* (-) Não houve realização do ensaio.

### 2.2.2 Influência das cinzas nas propriedades do concreto no estado endurecido

Características físicas, resistência mecânica e durabilidade são algumas das propriedades do concreto no estado endurecido, a qual podem ser modificadas com a utilização de cinzas volantes produção de concretos.

Hoppe Filho (2008) e Dal Molin (2011) afirmam que a cinza volante, ao compor a matriz cimentícia, atua de maneira física e química no compósito. Fisicamente observam-se dois efeitos: o efeito fíler e o efeito nucleador. O efeito fíler, ou efeito de enchimento, caracteriza-se pelo preenchimento de vazios dentro do compósito cimentício, tornando a matriz mais homogênea e, microestruturalmente, alterando a distribuição de diâmetros dos poros e interconectividade. Já o efeito nucleador atua de forma a acrescentar pontos de precipitação no

sistema, ou seja, além das partículas de cimento, haverá no sistema as partículas das cinzas para os hidratos precipitarem, aumentando, assim, os pontos de hidratação.

Já o efeito químico, que é a atividade pozolânica, está relacionado com a reação das adições com o hidróxido de cálcio,  $\text{Ca(OH)}_2$ , oriundo do processo de hidratação do cimento, formando o C-S-H, que é o principal componente responsável pela resistência das pastas de cimento hidratadas (ANDRADE e TUTIKIAN, 2011).

Mehta e Monteiro (2008) afirmam que existe uma grande quantidade de fatores que apresentam influência na resistência mecânica do concreto, a exemplo:

- Propriedades dos componentes (cimento, agregados, aditivos e adições minerais);
- Proporcionamento dos componentes (relação água/aglomerante e agregados/aglomerantes); e
- Condições de cura e idade dos corpos-de-prova, dentre outros.

Chindaprasirt *et al.* (2004) relataram que cinzas de elevada granulometria, possuem baixa reatividade, possivelmente pela perda do efeito fíler e efeito nucleador, e os concretos com essas cinzas não apresentam resistência à compressão superior aos traços de referência, além de terem maiores retrações por secagem e ataques por sulfatos. Itskos *et al.* (2010) citaram que a faixa granulométrica das cinzas volantes, para melhor obtenção do desempenho pozolânico, é de  $75\mu\text{m}$  e  $150\mu\text{m}$ .

Os efeitos físico e químico podem atuar isoladamente ou em conjunto para uma melhora na resistência à compressão dos concretos. De uma forma geral, o processo de refinamento dos poros e dos cristais presentes na pasta de cimento aumenta a resistência na zona de transição (DAL MOLIN, 2005). A microestrutura da pasta de cimento merece uma especial atenção às zonas de transição com os agregados concreto.

#### 2.2.2.1 Resistência à compressão

A Tabela 11 apresenta um resumo sobre o comportamento das cinzas na resistência à compressão do concreto, realizado por diversos autores.

Tabela 11 - Influência das cinzas na resistência à compressão do concreto.

Autores	Tipo de substituição	Tipo de cinza	Teores analisados	Teor ótimo de cinza*	Teor de cinza com perda de $f_c$ **
Khatib <i>et al.</i> (2016)	Volumétrica	FGD	10%, 20%, 30% e 40%	10%	$\geq 20\%$
Chousidis <i>et al.</i> (2015)	Massa	FGD	5% e 10%	10%	-
Ikotun <i>et al.</i> (2017)	Massa	C	30% e 50%	-	$\geq 30\%$
Wang <i>et al.</i> (2017)	Massa	C	15%, 30% e 45%	15%	$\geq 30\%$
Wang <i>et al.</i> (2015)	Massa	C	15%, 25%, 35% e 45%	15%	$\geq 35\%$
Shaikh e Supit (2015)	Massa	C	40% e 60%	-	$\geq 40\%$
Wankhede e Fulari (2014)	Massa	C	10%, 20% e 30%	20%	$\geq 30\%$
Oner <i>et al.</i> (2004)	Massa	C	25% a 60%	-	-

\* Teor para o qual ocorre o maior valor de resistência à compressão ( $f_c$ ) do concreto.

\*\* Teor para o qual, a partir dele, ocorre diminuição na  $f_c$ , em relação ao traço de referência.

(-) Não observou-se teor ótimo de cinza e/ou não houve diminuição na  $f_c$ , em relação ao traço de referência.

Conforme os dados apresentados na Tabela 11, os concretos com cinzas de FGD e os concretos com cinzas volantes, na grande maioria dos casos, influenciam na resistência à compressão do concreto.

Khatib *et al.* (2016) e Chousidis *et al.* (2015) concluíram que uma substituição de até 10% de cimento Portland por cinza de FGD acarretava em aumento da resistência à compressão do concreto, superando o valor obtido para o concreto de referência.

Os trabalhos dos autores a seguir são de concretos com cinzas que atenderam a classe C da NBR 12.653 (ABNT, 2014). A substituição parcial de cimento Portland por cinza volante, nos teores de 5% a 25, incrementou resistência à compressão no concreto, em relação ao traço de referência, conforme observado nos estudos de Wang *et al.* (2017), Wang *et al.* (2015), Wankhede e Fulari (2014), e acima de 25% a observou-se um decréscimo de resistência, conforme observado nos estudos de Ikotun *et al.* (2016), Shaikh e Supit (2015).

O único trabalho em que não houve variação significativa da resistência à compressão com a utilização da cinza volante foram os de Oner *et al.* (2004), cujo os valores se mantiveram praticamente constantes.

### 3.2.2.2 *Módulo de Elasticidade*

Dal Molin (2011) cita que as características da zona de transição na presença de adições minerais não são suficientes para causar uma melhora correspondente no módulo de elasticidade do concreto, para o qual as características dos agregados se tornam o fator limitante. Desta forma, os aumentos nos níveis de resistência à compressão obtidos nos concretos com cinzas volantes não se refletem, na mesma proporção, nos valores de módulo de elasticidade, que aumenta de forma menos intensa.

Isaia (1995) afirma que o módulo de elasticidade, assim como a resistência à compressão, é baixo nas primeiras idades e aumenta ao longo do tempo, quando utilizado adições de cinza volante, entretanto os ganhos de resistência à compressão e módulo de elasticidade não são na mesma intensidade, sendo o último inferior ao primeiro.

Araújo (2000) analisou a relação entre o módulo de elasticidade e a resistência à compressão. O autor observou, experimentalmente, que o módulo depende de diversos fatores, sendo a resistência à compressão apenas um deles, e que as propriedades elásticas do agregado têm grande influência sobre o módulo de Young, devendo essas serem consideradas nas formulações.

Wang *et al.* (2017) analisaram as propriedades mecânicas dos concretos com cinza volante e observaram que a curva do ensaio de módulo de elasticidade acompanhou a resistência à compressão, em que o traço com 15% de cinza volante obteve o melhor desempenho.

Chousidis *et al.* (2015) realizaram o ensaio de módulo de elasticidade em concretos com de cinza de FGD e observaram que, aos 28 dias, os traços com cinza apresentaram valores maiores que o traço de referência, entretanto, no ensaio realizado aos 130 dias o módulo de elasticidade permaneceu praticamente constante, em torno de 22 GPa.

Portanto, com base nas verificações realizadas pelos autores supracitados, observa-se que o módulo de elasticidade não aumenta, na mesma intensidade, com o uso das cinzas volantes e que os agregados, muitas vezes, exercem uma influência mais significativa do que a resistência à compressão do concreto.

### 2.2.2.3 Resistência à tração

A teoria das falhas, proposta por Griffith (1920), estabelece uma relação entre a tensão de fratura e tamanho da trinca. A teoria explica porque a resistência à tração dos materiais frágeis é menor que o seu valor teórico e postulou que os materiais frágeis continham defeitos microscópicos. Essa relação é conhecida como balanço de energia de Griffith e é o ponto inicial para o desenvolvimento da mecânica da fratura.

Esses defeitos são muito pequenos para serem detectados e funcionam como pontos de concentração de tensão. No concreto, embora as tensões de tração aplicadas ao material sejam baixas, as falhas presentes no material fazem com que a iniciação e propagação de microfissuras seja elevada, devido ao fato de a direção de propagação das fissuras ser transversal à direção principal da tensão, provocando a ruptura do concreto por interconexão entre essas microfissuras (ANDRADE e TUTIKIAN, 2011).

Dal Molin (2011) afirma que as cinzas volantes causam redução na porosidade da matriz e da zona de transição. Esse fato leva à melhora geral na resistência à compressão e resistência à tração do concreto, mas, aparentemente, a magnitude do aumento na resistência à tração se mantém relativamente pequena, até que a resistência intrínseca dos produtos de hidratação da zona de transição seja majorada. Ou seja, a resistência à tração do concreto com uma zona de transição de menor porosidade continuará sendo fraca enquanto houver um grande número de cristais orientados de  $\text{Ca(OH)}_2$ , que é um cristal fraco. Desta forma, o aumento da resistência à compressão não corresponderá, proporcionalmente, ao aumento da resistência à tração.

Khatib *et al.* (2016) analisaram a resistência a tração na flexão dos concretos com cinza de FGD. Os autores observaram que os traços apresentaram resistências semelhantes, de 9MPa, para os teores de 10%, 20%, 30% e 40% de substituição de cimento Portland por cinza e maiores que o traço de referência, em que a resistência à compressão desses concretos foram de 70MPa a 80 MPa.

Azevedo (2002) afirma que em concretos convencionais, que tem resistência à compressão inferior a 50 MPa, a resistência à tração do concreto é, aproximadamente, 10% da resistência à compressão. Entretanto, nos concretos que apresentam um elevado desempenho, a resistência à tração não acompanha o acréscimo de resistência à compressão, podendo, tal como cita a ACI *Committee* 363 (1992), atingir valores de 5% da resistência à compressão.

#### 2.2.2.4 Absorção de água

Os concretos podem ter sua absorção à água classificada da seguinte forma: até 3% considera-se concreto de baixa absorção, entre 3% e 5% média e acima de 5% alta absorção (Concrete Society, 2008).

As cinzas volantes, quando implementadas ao concreto, podem contribuir com a diminuição de vazios no concreto e, conseqüentemente, com a absorção de água, pois, podem preencher parte dos vazios presentes no concreto, uma vez que a partícula da cinza é menor que a partícula de cimento, obtendo, assim, uma maior compactidade.

Porém, outros fatores influenciam o comportamento da absorção no concreto. Yu *et al.* (2016) realizaram testes de absorção de água em concretos com cinzas volantes, em teores de 10% e 20% de substituição de cimento Portland por cinza volante, duas relações a/aglo 0,45 e 0,55. Os autores observaram que o concreto de referência foi quem apresentou a menor absorção e observou que o incremento de cinza volante aumentava o valor da variável.

#### 2.2.2.5 Velocidade do pulso ultrassônico (VPU)

A velocidade de ondas ultrassônicas transitando em um material sólido, como o concreto, depende da densidade e das propriedades elásticas do material (PUNDIT MANUAL, 1994).

Medeiros (2007) cita que diversos fatores influenciam no resultado dos ensaios de ultrassom, tais como o: tipo de cimento, uso de aditivo, relação a/aglo, grau de compactação, condições de cura e idade do concreto, temperatura do concreto, dentre outros. Como as cinzas influenciam o grau de compactação e a quantidade de aglomerante, as mesmas podem influenciar a VPU.

Whitehurst (1966) classifica a qualidade do concreto baseado na VPU, de acordo com a Tabela 12 a seguir

Tabela 12 – Classificação da qualidade do concreto baseada na velocidade de pulsos de ultrassom.

VPU (m/s)	Qualidade do concreto
> 4500	Excelente
3500 – 4500	Bom
3000 – 3500	Regular
2000 – 3000	Pobre
< 2000	Muito Pobre

Fonte: WHITEHURST (1966)

Evangelista (2002) analisou a VPU em diferentes traços de concreto e observou que, para uma mesma idade, não houve grandes diferenças na VPU. A diferença entre o traço com maior relação  $a/aglo = 0,65$  e o traço de menor relação  $a/aglo = 0,40$  foi de 500 m/s e aos 90 dias essa diferença foi de apenas 90 m/s.

Wang *et al.* (2017) analisaram a velocidade de ultrassom de concretos com substituição do cimento Portland por cinza volante, nos teores de 15%, 30% e 45%. Os autores observaram que para o teor de 15% de cinza, a velocidade de ultrassom aumentava, em relação ao traço de referência, entretanto, o valor da variável diminuía com o aumento no teor de cinza volante acima de 15%.

#### 2.2.2.6 Durabilidade do concreto à penetração de cloretos

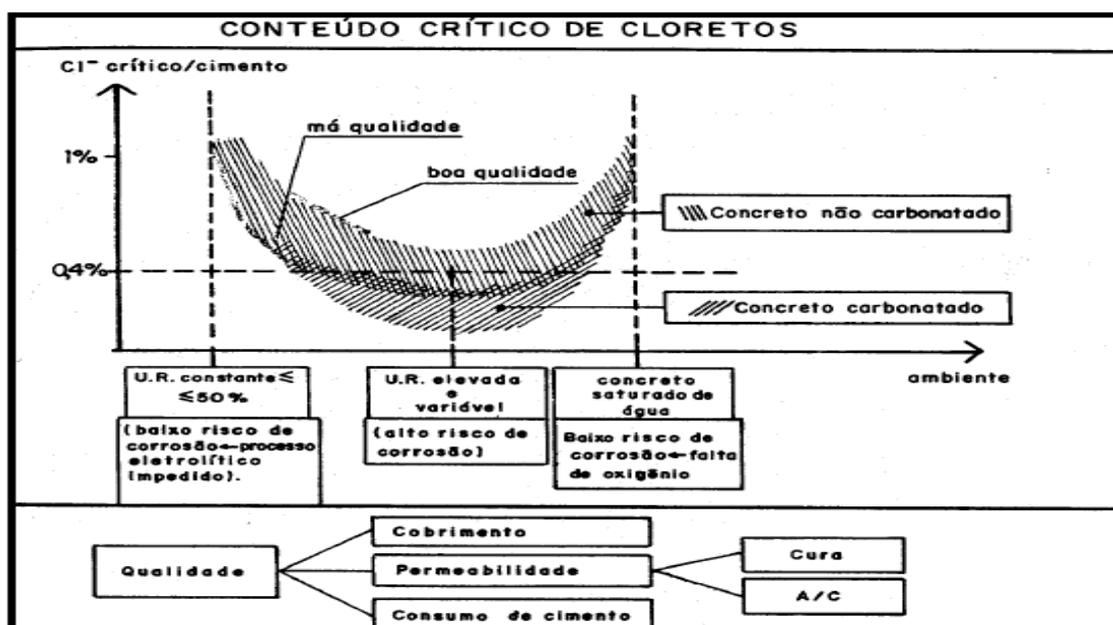
Um concreto durável é um concreto que mantém um bom desempenho das suas propriedades ao longo do tempo de forma a completar o tempo de vida útil, com as devidas manutenções.

A NBR 6118 (ABNT, 2014) cita que durabilidade consiste na capacidade da estrutura em resistir às influências ambientais previstas e definidas em conjunto pelo autor do projeto estrutural e o contratante, no início dos trabalhos de elaboração do projeto. A norma ainda cita alguns parâmetros que visam a durabilidade da estrutura como: cobrimento mínimo do concreto, umidade relativa do ar que a estrutura estará submetida, classe do concreto, agressividade do meio, dentre outros fatores.

Já a NBR 15575-1 (ABNT, 2013) define durabilidade como a capacidade da edificação ou de seus sistemas de desempenha suas funções, ao longo do tempo e sob condições de uso e manutenção especificadas no manual de uso, operação e manutenção.

A estrutura de concreto deve resistir a diversos agentes que podem causar sua degradação tal como a agressividade de cloretos, que está associada ao seu teor livre. Segundo Bishara (1991) a porção de cloretos livres na fase aquosa varia entre 75% a 80% do total de cloretos presentes. O CEB (1992) expressa o teor crítico de cloreto, em função da qualidade do concreto, a umidade do ambiente, conforme observado na Figura 13.

Figura 13 - Teores críticos de cloretos em função do ambiente e da qualidade do concreto.



Fonte: CEB (1992)

A NBR NM 137 (ABNT, 1997) limita a concentração de cloretos em função do tipo da estrutura do concreto: concreto simples até 2000 mg/L, concreto armado até 700 mg/L e para concreto protendido até 500 mg/L.

Quanto maior a relação a/aglo do concreto, maior a velocidade de penetração de cloretos na estrutura de concreto. A relação a/aglo influencia significativamente na porosidade do concreto que, por consequência, influencia na facilidade ou não da penetração de cloretos.

Figueiredo e Meira (2011) citam que a utilização de cinzas volantes apresentam dois tipos de efeitos na resistência à penetração de cloretos, um positivo e um negativo.

- Efeito positivo: Ocorre a alteração física da estrutura da pasta de cimento, por efeito fíler (físico) e pozolânico (químico), produzindo um sistema de poros refinados, menos conectados e com maior grau de tortuosidade, o que por muitas vezes é caracterizado por um menor volume total dos poros.

- Efeito negativo: redução da “reserva alcalina” - devido às reações pozolânicas, ocorre um consumo de Portlandita,  $\text{Ca(OH)}_2$ , com a cinza, ocasionando em uma redução da película passivadora de proteção da pasta de cimento.

Alguns estudos são citados a seguir sobre a penetração de cloretos em concretos com cinzas. A Tabela 13 apresenta um resumo do que foi encontrado na bibliografia e, em seguida, encontra-se o texto explicativo do que foi analisado pelos autores.

Tabela 13 - Teor ótimo de substituição de cimento Portland por cinza realizado por diversos autores, nos ensaios de penetração de cloretos em concretos com cinzas.

Autores	Tipo de ensaio	Tipo de cinza	Teores analisados	Teor ótimo de cinza*	Penetração de cloretos**
Yu <i>et al.</i> (2016)	Névoa salina	C	10% e 20%	-	cte
Liu <i>et al.</i> (2016)	Semi-ciclo	C	15% e 30%	30%	↓
Simcic <i>et al.</i> (2015)	Semi-ciclo	C	20% e 50%	20%	↓
Simcic <i>et al.</i> (2015)	Semi-ciclo	FGD	20% e 50%	20%	↓
Chindaprasirt <i>et al.</i> (2007)	Semi-ciclo	C	35%	35%	↓

\* (-) Não houve teor ótimo de cinza. \*\*(cte) A penetração de cloretos dos concretos com ou sem cinza foram as mesmas. (↓) O valor da penetração de cloretos diminuiu com o uso da cinza.

Yu *et al.* (2016) realizaram testes de penetração de cloretos em concretos com cinzas volantes, em teores de 10% e 20% de substituição de cimento Portland por cinza volante e duas relações a/aglo 0,45 e 0,55, em que foi observado que as mesmas não apresentaram um desempenho frente ao concreto de referência. A cinza utilizada se enquadrou na classe C da NBR 12.653 (ABNT, 2014).

Liu *et al.* (2016) avaliaram o comportamento do concreto com cinza volante, em teores de 15% e 30% de substituição, em massa, de cimento Portland por cinza volante, em névoa salina, com 5% de solução de NaCl, temperatura de  $35 \pm 2^\circ\text{C}$  e 70% de umidade relativa. Os autores observaram que o traço de concreto com 30% de cinza volante apresentou a melhor resistência à penetração de cloretos, seguido do traço de concreto com 15% de cinza volante e, por último, o traço de referência, aos 28 dias de ensaio.

Simcic *et al.* (2015) concluíram que os concretos com cinzas volantes apresentaram penetração de cloretos menor que o concreto de referência. Após 12 semanas de realização dos ensaios observou-se que os traços com cinza volante não ultrapassaram 20mm de penetração

de cloretos, ao passo que o traço de referência obteve 28mm de penetração. Comparando o desempenho das duas cinzas, observou-se que a cinza com 5,4% de CaO foi a que apresentou o melhor desempenho até os 84 dias, acima dessa idade, a cinza com teor de CaO de 15,2% foi a que apresentou melhor desempenho no concreto.

Já Muthulingam e Rao (2015) estimaram o coeficiente de difusão do concreto com cinza volante. O modelo apresentado apontava que o coeficiente de difusão era dependente da relação a/c e independente do teor de cinza. Entretanto, outros modelos citados pelos autores apresentaram uma relação de dependência entre coeficiente de difusão e o teor de cinza volante. O autor ainda conclui que a penetração de cloretos em concretos com cinza volante precisa de um estudo mais aprofundado.

Chindaprasirt *et al.* (2007) citam que o concreto com cinza volante é menos suscetível à agressão de íons cloretos, pois, a cinza diminui a porosidade do concreto. Os autores observaram que a finura da cinza volante influenciou na resistência à penetração de cloretos, uma vez que a cinza volante mais fina apresentou o melhor desempenho. Outra conclusão feita pelos autores foi de que quanto menor a relação a/aglo, menor é a contribuição da cinza volante, pois, para baixas relações a/aglo há um menor índice de vazios no concreto.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS DE PESQUISA

A seguir tem-se os materiais utilizados no trabalho, com suas respectivas características e os métodos adotados para utilização das cinzas, confecção dos concretos, execução de ensaios e análise dos resultados. Os ensaios de caracterização das cinzas foram feitos no Laboratório da Cimento Apodi e nos Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC), Laboratório de Raios-X (LRX), Central Analítica, Fundação Núcleo de Tecnologia Industrial do Ceará (NUTEC), Laboratório de Saneamento Ambiental (LABOSAN), todos localizados na UFC.

#### 3.1 Materiais

O cimento utilizado foi o CP-V ARI, de massa específica de  $3,00 \text{ g/cm}^3$  e de composição química obtida por FRX apresentada na Tabela 14, realizado no LRX da UFC. Agregados: areia natural, como agregado miúdo e brita como agregado graúdo. Água proveniente da rede de abastecimento. Dois tipos de cinza (CTP - I obtida através do processo FGD e CTP - II obtida através da precipitação eletrostática), proveniente da queima do carvão mineral na termoelétrica do Pecém/CE. Aditivo Plastificante.

Tabela 14 - Composição química do cimento Portland CP V - ARI.

CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	SO <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Outros
78,56%	8,99%	7,82%	2,44%	1,36%	0,83%

A caracterização dos agregados é fundamental para estimar o consumo de materiais e prever alguns comportamentos, em função das características dos materiais utilizados. Os agregados miúdo e graúdo foram caracterizados de acordo com os ensaios e normas apresentados na Tabela 15. A Figura 14 e a Figura 15 apresentam as curvas granulométricas dos agregados com os limites estabelecidos pela NBR 7211 (ABNT, 2009). Pode-se observar que o agregado miúdo está dentro dos limites estabelecidos pela norma, o mesmo não se pode dizer do agregado graúdo, entretanto, mesmo o agregado graúdo não estando totalmente dentro dos limites, a brita foi utilizada, pois, trata-se de uma brita de uso comercial e, em muitos casos, o ajuste granulométrico não é feito para a produção de concreto. As caracterizações dos agregados foram realizadas no LMCC da UFC.

Tabela 15 - Caracterização dos agregados miúdo e graúdo.

Ensaio	Ag. Miúdo	Ag. Graúdo	Norma
M.específica	2,55 g/cm <sup>3</sup>	2,64 g/cm <sup>3</sup>	NBR NM 52 (ABNT, 2009)
M. Unit solta	1,41 g/cm <sup>3</sup>	1,42 g/cm <sup>3</sup>	NBR NM 45 (ABNT, 2006)
Absorção	0,52%	0,85%	NBR NM 30 (ABNT, 2001)
DMC	4,8 mm	25 mm	NBR NM 248 (ABNT, 2003)
MF	2,67	7,28	NBR NM 248 (ABNT, 2003)

Figura 14 - Curva granulométrica do agregado miúdo.

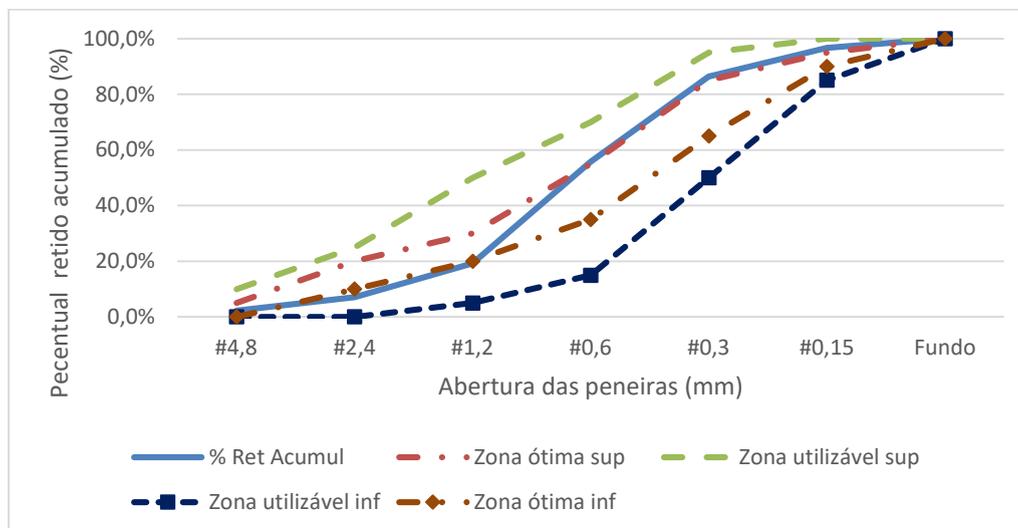
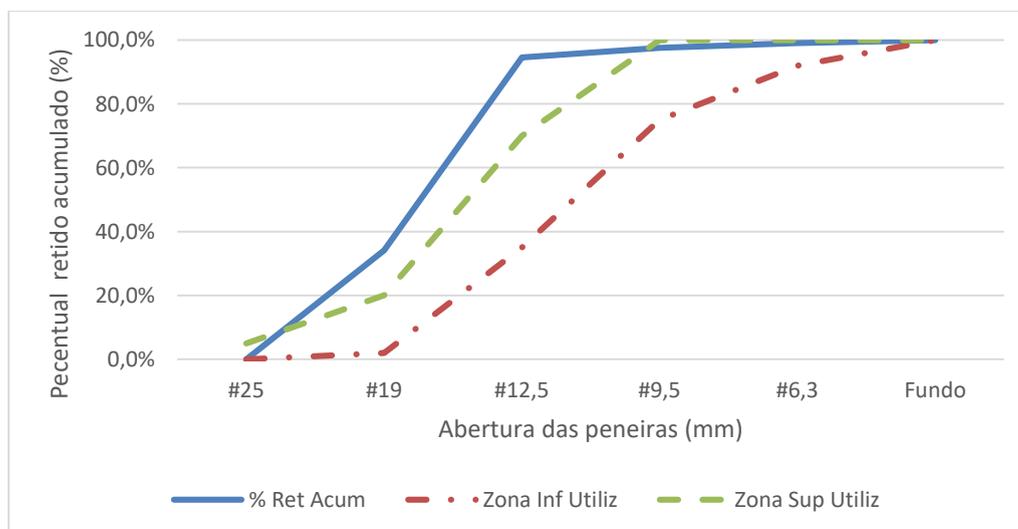


Figura 15 - Curva granulométrica do agregado graúdo



## 3.2 Métodos

### 3.2.1 Caracterização das cinzas

Os ensaios de caracterização das cinzas realizados foram: massa específica, distribuição granulométrica, morfologia MEV/EDS, termogravimetria, FRX, DRX e atividade pozolânica.

A caracterização das cinzas e os resultados obtidos em cada ensaio encontram-se a seguir.

#### 3.2.1.1 Massa específica

A massa específica da cinza foi determinada através do método de ensaio estabelecido na NBR NM 23 (ABNT, 2001). Os resultados podem ser observados na Tabela 16. O ensaio foi realizado no Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC).

Tabela 16 - Massa específica das cinzas volantes.

Cinza volante	Massa específica
CTP - I	2330 kg/m <sup>3</sup>
CTP - II	2360 kg/m <sup>3</sup>

Conforme apresentado na Tabela 16, observa-se que as massas específicas das cinzas estão dentro do intervalo, 2210kg/m<sup>3</sup> - 2600kg/m<sup>3</sup>, apresentado na Tabela 10. Além disso, observa-se que a cinza é mais leve que o cimento Portland, que possui uma massa específica próxima de 3000 kg/m<sup>3</sup>.

#### 3.2.1.2 Distribuição granulométrica

A Figura 16 e a Figura 17 apresentam a distribuição granulométrica obtida por granulometria à laser de cada cinza em análise e a Tabela 17 apresenta alguns dados granulométricos extraídos da curva granulométrica e a finura Blaine do material. O ensaio foi realizado no Laboratório da Cimento Apodi, não sendo fornecido as características do equipamento.

Figura 16 - Distribuição do tamanho das partículas da cinza CTP - I

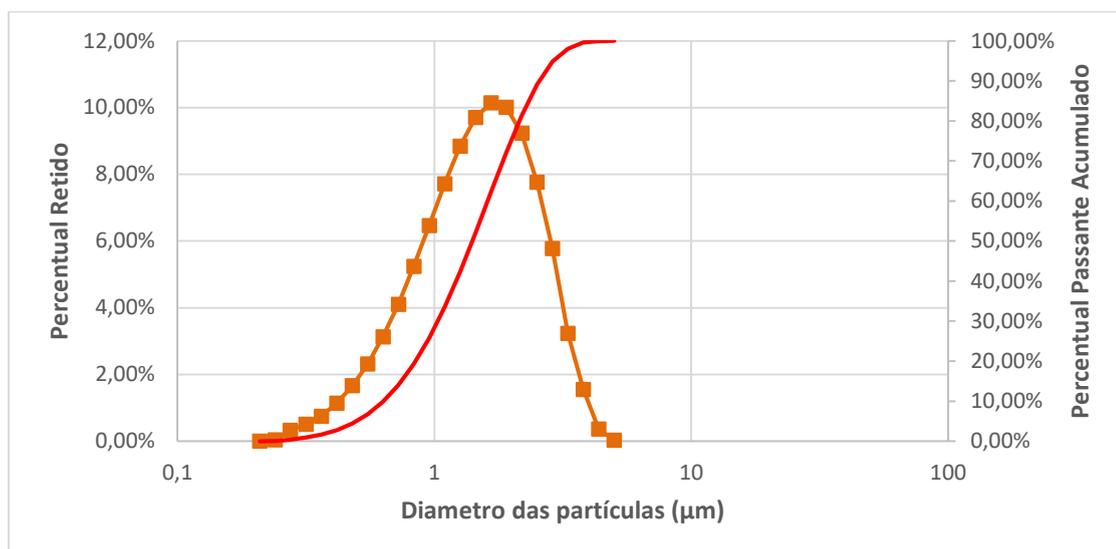
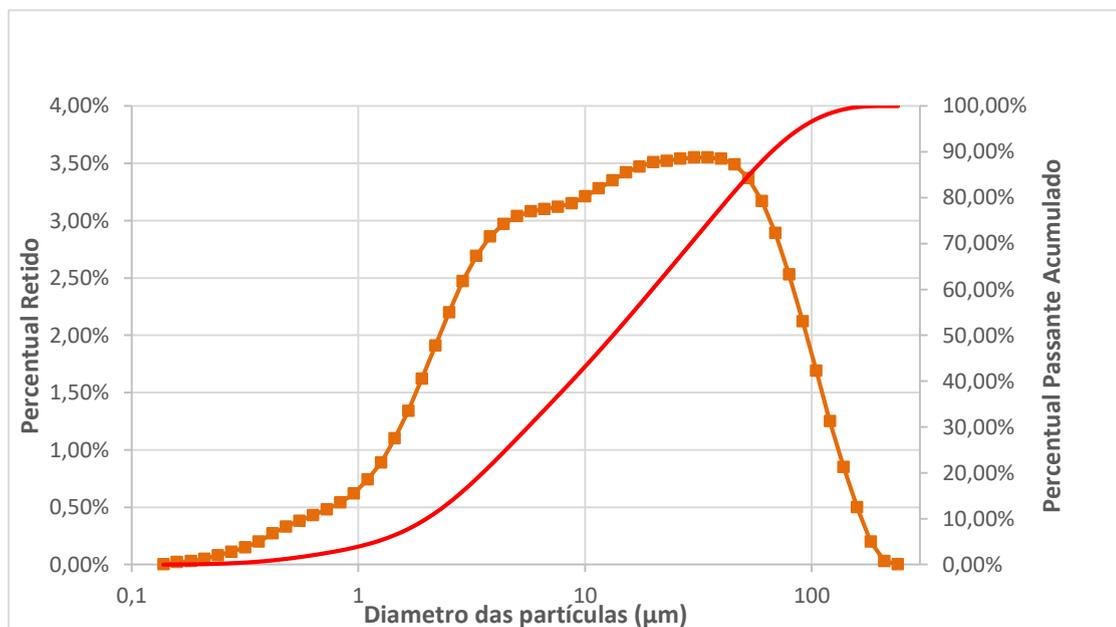


Figura 17 - Distribuição do tamanho das partículas da CTP - II

Tabela 17 - D<sub>10</sub>, D<sub>50</sub>, D<sub>90</sub>, D<sub>máx</sub> e finura Blaine das cinzas CTP - I e CTP - II.

Material	D <sub>10</sub>	D <sub>50</sub>	D <sub>90</sub>	D <sub>máx</sub>	Finura
CTP - I	0,631 μm	1,445 μm	2,52 μm	5,012 μm	8220 cm <sup>2</sup> /g
CTP - II	1,91 μm	13,19 μm	69 μm	209 μm	3760 cm <sup>2</sup> /g

Uma exigência da NBR 12.653 (ABNT, 2014) é que o material passante na peneira 45μm seja de, no mínimo, 80%. O material passante da CTP - I foi de 100% e a CTP - II foi de 90,75%, atendendo, assim, a esse requisito físico da norma.

Conforme apresentado na Figura 16 e na Figura 17, observa-se que a CTP - I apresenta uma granulometria mais uniforme, com uma baixa amplitude granulométrica, enquanto que a CTP - II apresenta uma granulometria mais distribuída. A Tabela 17 apresenta os percentuais de cinzas que passam em determinadas peneiras. Observa-se ainda, pelo ensaio de finura Blaine, que a finura da CTP - I é maior que a CTP - II, corroborando com o observado na granulometria. A cinza tende a ser mais reativa à medida que se torna mais fina e a mesma pode exigir um maior consumo de água ou aditivo plastificante em misturas em concreto, para manutenção da trabalhabilidade, devido à elevada superfície específica do material.

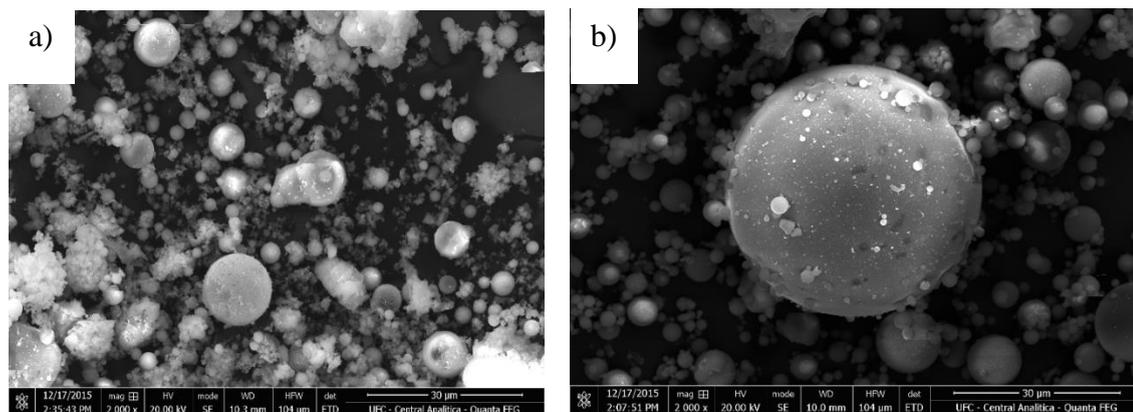
As cinzas substituirão volumetricamente o cimento, para a produção de concreto com cinza, e essa característica granulométrica das cinzas é importante para a hidratação do concreto, pois, as partículas finas são capazes de atuar como pontos preferenciais de nucleação para os hidratos do cimento, lembrando que, quanto menor o diâmetro da partícula, maior será a influência na aceleração da hidratação (LAWRENCE *et al.* 2003).

### 3.2.1.3 Análise morfológica por MEV

A análise morfológica das cinzas foi realizada por microscopia eletrônica de varredura, em equipamento MEV Inspect - 50 FEI com EDS (Energy Dispersive X-Ray Detector). A forma e a textura superficial das partículas, podem ser vistas na Figura 18. Pode-se observar que as partículas apresentam um formato arredondado, característico desses materiais.

Além disso observa-se, também, a diferença no tamanho das partículas das cinzas, corroborando com o que foi observado na granulometria à laser, cuja as partículas da CTP - II apresentaram tamanhos maiores que os da CTP - I. O ensaio foi realizado na Central Analítica da UFC, não foi fornecido a faixa de tensão para realização do ensaio.

Figura 18 – Imagem das partículas das cinzas obtidas por MEV.

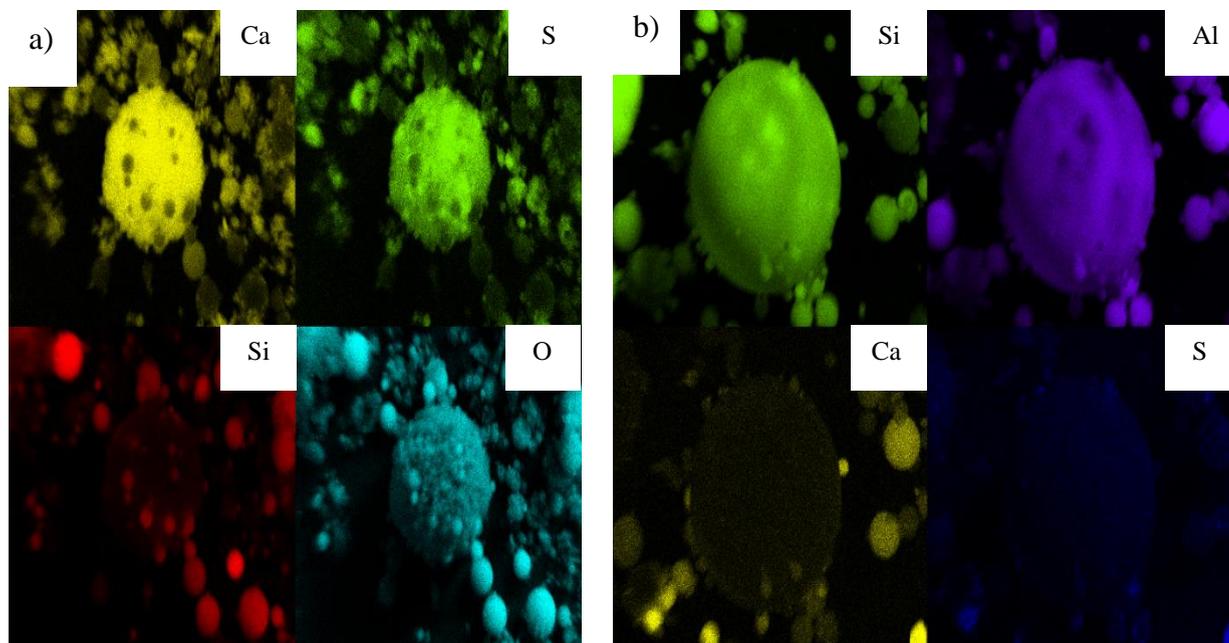


a) Partículas da CTP – I

b) Partículas da CTP - II

Além do formato das partículas que podem ser visualizados pela MEV, pode-se observar, através da técnica de EDS, a presença de elementos químicos, conforme apresentado na Figura 19. É possível observar a diferença de concentração de Si, Ca e de S presente nas cinzas. Enquanto que na cinza CTP - I foi observado uma maior intensidade de Ca e S e uma baixa intensidade de Si, o oposto ocorreu na cinza CTP - II.

Figura 19 - EDS das cinzas CTP - I e CTP - II



a) EDS da CTP – I

b) EDS da CTP – II

### 3.2.1.4 Análise química por FRX

As análises químicas das cinzas foram obtidas por FRX, cujo os resultados dos componentes químicos presentes no material são expressos na forma de óxidos, em percentuais. A Tabela 18 apresenta os resultados encontrados na fluorescência de Raios-X das duas cinzas. Os ensaios foram realizados no LRX da UFC.

Tabela 18 - Análises químicas das cinzas, obtidas por fluorescência de raios X

Compostos	CTP - I (%)	CTP - II (%)
CaO	31,06	6,76
SiO <sub>2</sub>	29,98	50,44
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11,05	14,97
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10,97	18,62
SO <sub>3</sub>	10,78	1,64
K <sub>2</sub> O	1,32	2,27
Na <sub>2</sub> O	0,75	1,24
Outros	Menos de 1,5%	Menos de 1,5%

Observa-se que a CTP - I não se caracteriza como cinza volante, de acordo com os requisitos químicos da NBR 12.653 (ABNT, 2014), citados na Tabela 3 deste trabalho, além da soma SiAlFe ser inferior a 70%, há uma grande quantidade de SO<sub>3</sub>, devido ao processo do FGD, ultrapassando, também, o limite máximo estabelecido por norma. A CTP - II atendeu a todos os requisitos químicos da NBR 12.653 (ABNT, 2014), caracterizando-se, nos requisitos químicos, como cinza volante.

A análise química da CTP - II apresenta concentrações dos elementos químicos semelhante à de diversos autores como Bentz *et al.* (2015), Bui *et al.* (2015), Görhan (2015), Kabay *et al.* (2015), Shaikh e Supit (2015) e Hoppe Filho (2008), conforme apresentado na Tabela 7.

A Tabela 19 apresenta as demais características químicas das cinzas e o valor dos requisitos mínimos exigidos pela NBR 12.653 (ABNT, 2014).

Tabela 19 - Características químicas das cinzas.

Propriedade	Classe C* (%)	CTP - I (%)	CTP - II (%)
SiO <sub>2</sub> + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	≥ 70	51,99	84,03
SO <sub>3</sub>	≤ 5	10,78	1,64
Teor de umidade	≤ 3	0,88	0,35
Perda ao fogo	≤ 10	6,57	2,07
Álcalis disponíveis em Na <sub>2</sub> O	≤ 1,5	0,75	1,37

\*Requisito Classe C da NBR 12.653 (ABNT, 2014).

Conforme os dados apresentados na Tabela 19, observa-se que apenas a CTP - II classifica-se quimicamente como cinza volante. O mesmo não ocorre com a CTP - I. Que não apresenta a soma de óxidos necessários e contém elevado teor de SO<sub>3</sub>. Porém, a condição de atendimento químico é necessária para a classificação da cinza, mas não é condição suficiente, pois, é necessário que as mesmas atendam aos requisitos físicos da NBR 12.653 (ABNT, 2014).

### 3.2.1.5 Análise mineralógica por DRX

Outro ensaio realizado para caracterização de elementos nas cinzas é a DRX, cujo os difratogramas estão apresentadas na Figura 20 e na Figura 21.

A CTP - I apresenta característica de cinza lignita, uma vez que apresenta elevado teor de CaO e a CTP - II apresenta característica de cinza betuminosa, conforme apresentado por Ahmaruzzaman (2009) e citado na Tabela 6.

Figura 20 - Difratoograma da CTP - I.

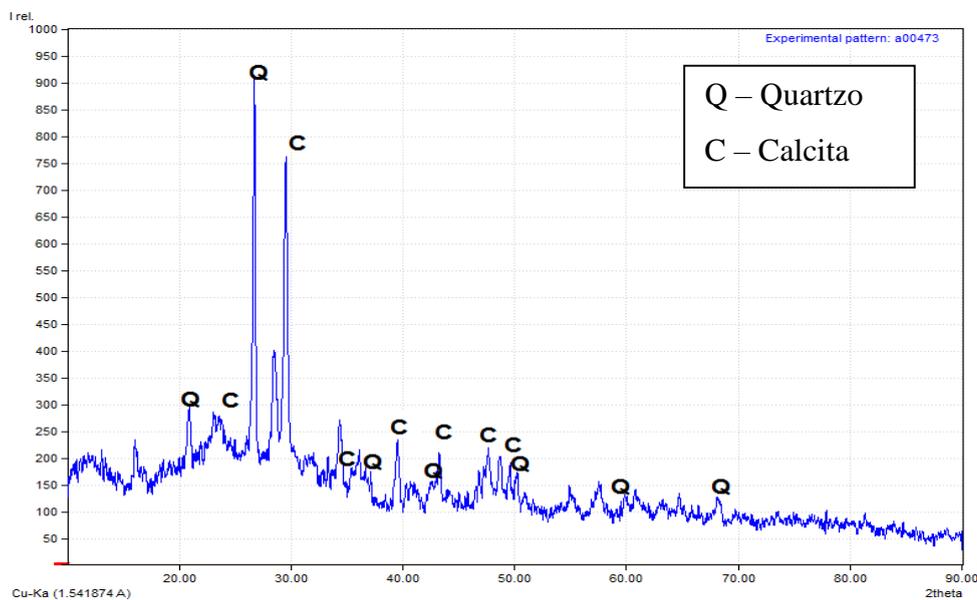
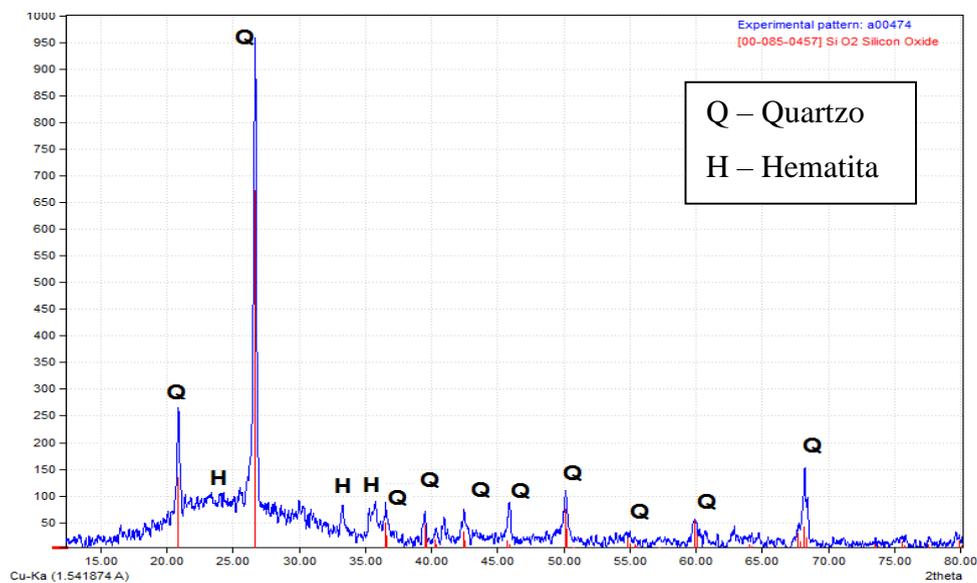


Figura 21 - Difratoograma da CTP - II.



A CTP - I apresentou uma grande quantidade de calcita, proveniente do processo de FGD, e quartzo. Já a CTP - II apresenta fases características de cinzas volantes e o difratograma dessas cinzas geralmente são semelhantes quando comparadas com as cinzas volantes de outros autores, conforme apresentado na Figura 9.

### 3.2.2 Dosagem do concreto

Para uma maior análise das cinzas foram estabelecidos traços de concreto com a cinza CTP - II, que atende aos requisitos químicos e físicos da NBR 12.653 (ABNT, 2014). A CTP - I, por não se enquadrar em todos os parâmetros da NBR 12.653 (ABNT, 2014) e por conter um alto teor de sulfato, inicialmente, foi utilizada na produção de argamassas, a fim de avaliar se os produtos obtidos no lixiviado e/ou solubilizado dessa argamassa estão dentro dos limites estabelecidos pela NBR 10.004 (ABNT, 2004). Após a comprovação de que a CTP - I atingiu os limites estabelecidos por norma, estabeleceu-se os traços de concreto para a cinza CTP - I. Os resultados de lixiviação e solubilização em argamassas serão vistos mais à frente.

As cinzas CTP-I e CTP - II foram utilizadas na matriz cimentícia, substituindo o cimento Portland pela cinza nos teores de 7,5% e 15%, em volume.

O consumo de materiais e os traços determinados estão apresentados na Tabela 20 e na Tabela 21. Esses valores foram obtidos pelo método de dosagem do IPT. A trabalhabilidade dos concretos produzidos, medida pelo abatimento do tronco de cone, conforme a NBR NM 67 (ABNT, 1998), foi fixado em  $100 \pm 20$  mm. Para tanto fez-se o uso de aditivo plastificante para alcançar a plasticidade desejada.

Tabela 20 - Consumo de materiais para concreto com CTP - I (kg/m<sup>3</sup>).

Traço	Cimento	CTP - I	Ag. Miúdo	Ag. Graúdo	Água	a/aglo
0,4 - Ref	450	-	663	1029,6	180	0,40
0,4 - 7,5%	416,2	26,2	663	1029,6	180	0,41
0,4 - 15%	382,5	52,4	663	1029,6	180	0,41
0,5 - Ref	360	-	693,6	1077,1	180	0,50
0,5 - 7,5%	333	20,9	693,6	1077,1	180	0,51
0,5 - 15%	306	41,9	693,6	1077,1	180	0,52
0,6 - Ref	300	-	714	1108,8	180	0,60
0,6 - 7,5%	277,5	17,4	714	1108,8	180	0,61
0,6 - 15%	255	34,9	714	1108,8	180	0,62

Tabela 21 - Consumo de materiais para concreto com CTP - II (kg/m<sup>3</sup>).

Traço	Cimento	CTP - II	Ag. Miúdo	Ag. Graúdo	Água	a/aglo
0,4 - Ref	450	-	663	1029,6	180	0,40
0,4 - 7,5%	416,2	26,5	663	1029,6	180	0,41
0,4 - 15%	382,	53,1	663	1029,6	180	0,41
0,5 - Ref	360	-	693,6	1077,1	180	0,50
0,5 - 7,5%	333	21,2	693,6	1077,1	180	0,51
0,5 - 15%	306	42,4	693,6	1077,1	180	0,52
0,6 - Ref	300	-	714	1108,8	180	0,60
0,6 - 7,5%	277,5	17,7	714	1108,8	180	0,61
0,6 - 15%	255	35,4	714	1108,8	180	0,62

Observa-se na Tabela 20 e na Tabela 21 que a relação a/aglo varia, conforme o teor de cinza no concreto aumenta. Isso ocorre devido à diferença de massa específica entre as cinzas e o cimento Portland, sendo aquelas menores que essa, entretanto o volume de aglomerante é constante em todos os traços, pois, as substituições dos materiais foram feitas em volume. Apesar disto, a relação a/aglo, em massa, sofreu pouca variação.

Para a realização dos ensaios previstos em concreto, fez-se necessário que para cada traço fossem produzidos 25 corpos-de-prova cilíndricos (100mm de diâmetro por 200mm de altura), conforme apresentado na Tabela 22. O total de corpos-de-prova produzidos foi de 450.

Tabela 22 - Ensaios realizados em concretos.

Ensaio	Norma	Quantidade de corpos-de-prova por idade	Quantidade de corpos-de-prova total
<b>Resistência à compressão</b>	NBR 5739 (ABNT, 2007)	2 x 4 idades (3, 7, 28 e 91 dias)	8
<b>Resistência à tração</b>	NBR 7222 (ABNT, 2011)	2 x 1 idade (28 dias)	2
<b>Módulo de Elasticidade</b>	NBR 8522 (ABNT, 2017)	3 x 1 idade (28 dias)	3
<b>Absorção</b>	NBR 9778 (ABNT, 2009)	2 x 1 idade (28 dias)	2
<b>Agressividade por cloretos</b>	-	2 x 2 idades (6 e 12 semanas)	4
<b>Extras</b>	-	-	6
<b>Total de Cp's para concreto com CTP - I e II (25*9*2traços)</b>			450

### 3.3 Ensaio de penetração de cloretos

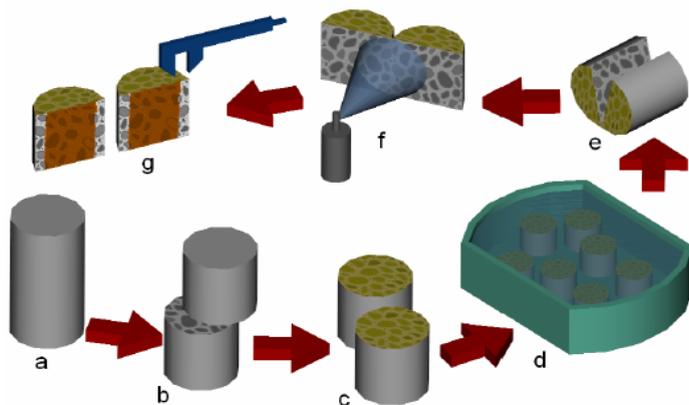
Para cada leitura de penetração de cloretos, foram utilizados dois corpos-de-prova de dimensões cilíndricas 10x20cm. Após o período de cura dos corpos-de-prova (28 dias de cura em água) as amostras foram serradas ao meio para formarem amostras de 10x10cm cilíndricas.

Uma vez serrada, cada amostra foi identificada, em função do traço, impermeabilizada nas faces paralelas, topo e base, e imersas no tanque com solução de NaCl, numa concentração de 3,5%

O método adotado foi o ensaio de semiciclo por imersão e secagem. O semiciclo estabelecido foi de sete dias em que nos dois primeiros dias o concreto ficava completamente imerso na solução e nos cinco dias restantes o concreto era posto em abrigo a temperatura ambiente, repetindo-se essa sequência dos semiciclos. Esses semiciclos foram repetidos durante 12 semanas, realizando as leituras de penetração de cloretos na 6ª semana e na 12ª semana, pois, o mesmo já havia sido feito por MONTEIRO (1996), CABRAL (2000) e MONTEIRO (2002), que obtiveram resultados satisfatórios.

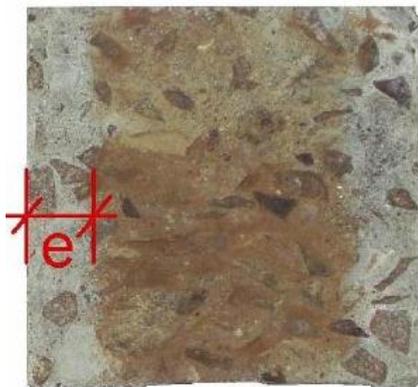
Após o tempo estabelecido, 42 e 84 dias, o corpo-de-prova foi serrado diametralmente e mediu-se o avanço da penetração de cloretos. A Figura 22 e a Figura 23 foram extraídas do trabalho de Schneider (2005) apenas para exemplificar a metodologia desse ensaio.

Figura 22 - Procedimentos do ensaio de penetração de cloretos.



Fonte: Schneider (2005) a) corpo-de-prova após 28 dias em cura. b) serragem ao meio do corpo-de-prova 10x20cm c) impermeabilização das faces paralelas do corpo-de-prova d) período de imersão em solução de NaCl. e) Serragem diametral do corpo-de-prova f) Borrifamento do corpo-de-prova com nitrato de prata. g) Leitura da penetração de cloretos.

Figura 23 - Medição da penetração de cloretos.



Fonte: Schneider (2005)

Na Figura 23 observa-se uma mancha central amarelada onde não houve o avanço de cloreto, dessa forma faz-se a leitura da frente de cloreto na região cinza, representado na Figura 23 pela letra “e”. Para que haja a reação na região observada, utilizou uma solução de nitrato de prata (0,1 M).

### 3.4 Análise estatística

Para analisar os resultados obtidos nos ensaios utilizou-se da ferramenta estatística de análise de variância. A ANOVA é uma ferramenta utilizada para verificar se existe diferença significativa entre tratamentos e se os fatores em estudos exercem influência em alguma variável dependente (RODRIGUES, 2015). Para aplicação da ANOVA na análise estatística dos dados foi estabelecido um grau de confiança de 95%, com a verificação da influência dos fatores controláveis na variável resposta. Desta forma, se o valor “F” for superior ao “fcrítico” e o valor-p menor ou igual a 5%, deduz-se que a variável influencia significativamente a variável resposta.

## 4 APRESENTAÇÃO, ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Serão apresentados os resultados das argamassas, cujo os ensaios realizados foram: atividade pozolânica, índice de consistência, lixiviação, solubilização e determinação do teor de cloretos e sulfatos, e os concretos nos estados fresco e endurecido, que foram analisados estatisticamente e com algumas referências sobre o assunto.

### 4.1 Resultado das argamassas com as CTP - I e CTP - II.

#### 4.1.1 Avaliação da atividade pozolânica.

Um dos requisitos para classificação da cinza como se dá através do índice de desempenho pozolânico com cimento e atividade pozolânica com cal, a Tabela 23 apresenta os resultados obtidos nestes ensaios, que foram realizados no LMCC da UFC.

Tabela 23 - Resultados da atividade pozolânica em argamassas.

Argamassa	Índice de desempenho com cimento Portland	Atividade pozolânica com cal
Referência	26,76 MPa	-
Arg - CTP - I	101%	6,6 MPa
Arg - CTP - II	106%	7,6 MPa
Limites	≥ 90%	≥ 6 MPa
Norma	NBR 5752 (ABNT, 2014)	NBR 5751 (ABNT, 2015)

Os valores acima atendem aos requisitos físicos exigidos pela NBR 12.653 (ABNT, 2014), entretanto, conforme apresentado nos resultados anteriores, a CTP - I não se classifica na classe C, pois, não atendeu aos requisitos químicos, conforme apresentado na Tabela 19.

#### 4.1.2 Índice de consistência em argamassas com cinzas

Os ensaios foram realizados medindo-se o índice de consistência (IC) das argamassas com cinzas, pelo método estabelecido na NBR 13.276 (ABNT, 2016), e a variação do IC ao longo do tempo, com o mesmo teor de argamassa estabelecido nos traços para a produção de concreto, conforme apresentado na Tabela 20 e Tabela 21.

O objetivo deste ensaio é analisar a influência das cinzas na consistência da argamassa e verificar qual seria o efeito preponderante na trabalhabilidade. Conforme já dito, a utilização da cinza pode aumentar a trabalhabilidade do compósito e, nesse caso, o formato da cinza apresentará efeito preponderante em relação ao tamanho das partículas, devido à esfericidade da cinza volante apresentada nas imagens de MEV, conforme ilustrado na Figura 18, ou se a trabalhabilidade diminuir, o efeito preponderante será o tamanho das partículas conforme ilustrado na Tabela 17. Para verificação desse efeito não se utilizou aditivo plastificante para manutenção do IC.

A Figura 24 e a Figura 25 apresentam o índice de consistência, obtido através do método estabelecido na NBR 13.276 (ABNT, 2005), das argamassas produzidas a partir dos traços estabelecidos na Tabela 20 e Tabela 21.

Figura 24 - Índice de Consistência da argamassa com CTP - I.

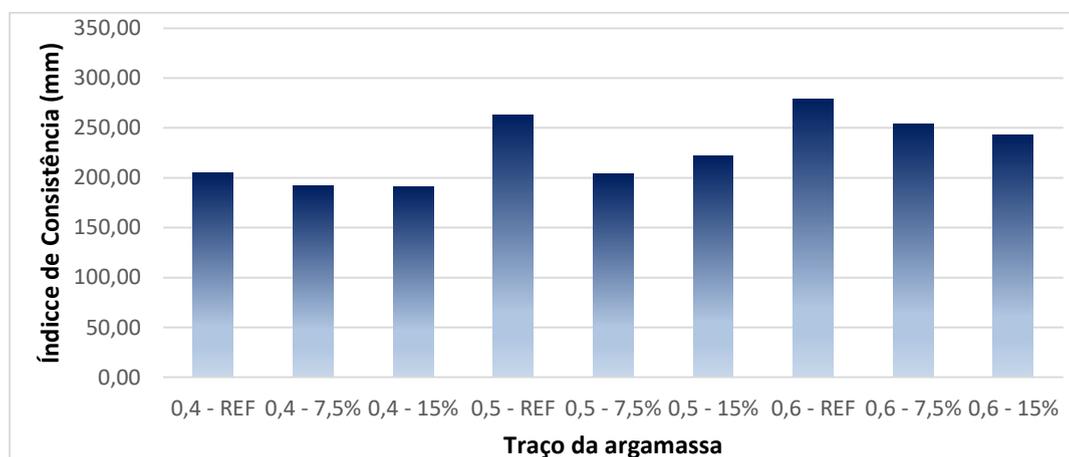
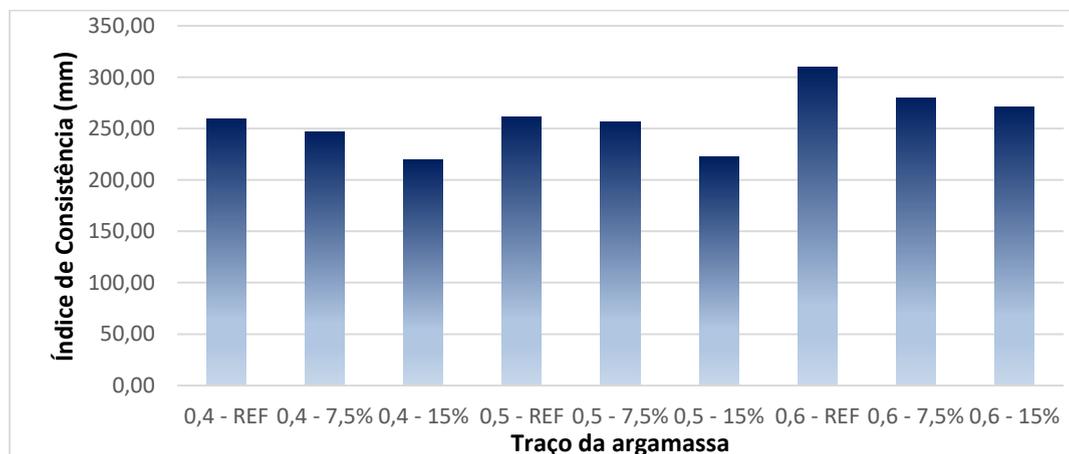


Figura 25 - Índice de consistência das argamassas com CTP - II.



Conforme observado na Figura 24 e Figura 25, à medida que se aumenta o teor de cinza na matriz, ocorre uma diminuição do índice de consistência, para os dois tipos de cinza. Esse efeito é devido ao fato de as partículas das cinzas serem mais finas que as partículas do cimento, aumentando a superfície específica do aglomerante e como a quantidade de água é constante para todos os traços e não há uso de aditivo plastificante, observa-se uma diminuição no IC, portanto, provavelmente os concretos a serem produzidos demandarão uma maior quantidade de aditivo, à medida que o teor de cinza no concreto for aumentado, para manter a mesma trabalhabilidade.

O ensaio preconizado pela NBR 10.342 (ABNT, 2012), sobre a perda de fluidez ao longo do tempo, foi analisado para as argamassas com CTP - I e CTP - II. A norma determina que seja medido o espalhamento da argamassa a cada 15 minutos, em um intervalo de 60 minutos. A Tabela 24 apresenta a média de três medidas do índice de consistência medido para cada traço, entretanto está apresentado apenas o índice de consistência no instante  $t = 0$  min e  $t = 60$  min. Os demais dados encontram-se no Apêndice A deste trabalho.

Tabela 24 - Variação do Índice de Consistência (IC) ao longo do tempo, em mm.

Traço	CTP - I			CTP - II		
	IC t = 0	IC t= 60min	Perda	IC t = 0	IC t= 60min	Perda
0,4 - REF	204,62	184,50	20,12	259,87	224,88	34,99
0,4 - 7,5%	192,30	168,68	23,62	246,57	218,38	28,19
0,4 - 15%	191,20	178,07	13,13	219,87	177,83	42,04
0,5 - REF	262,80	230,07	32,73	261,68	221,85	39,83
0,5 - 7,5%	203,88	179,35	24,53	256,85	226,97	29,88
0,5 - 15%	222,45	191,42	31,03	222,52	198,28	24,24
0,6 - REF	278,47	228,25	50,22	309,77	252,15	57,62
0,6 - 7,5%	254,10	226,32	27,78	280,17	238,72	41,45
0,6 - 15%	243,08	223,32	19,76	271,65	235,42	36,23

De maneira geral, observa-se que conforme se aumentou o teor de cinza, o IC diminuiu, entretanto, na maioria dos casos, a perda de abatimento nos traços com cinza foram menores que nos traços sem a cinza, ou seja, os traços com cinzas mantêm por mais tempo a trabalhabilidade.

### 4.1.3 Lixiviação e solubilização das argamassas

Observou-se, através dos resultados apresentados na Tabela 19, que a CTP - I não se classifica como cinza volante. Portanto, a fim de avaliar a viabilidade técnica na utilização da CTP - I em compósitos cimentícios foram produzidas argamassas, com o teor de substituição de 7,5% e 15% de cimento Portland por cinza, para realização dos ensaios de lixiviação, solubilização e pH dessas argamassas e avaliar se há algum tipo de periculosidade na produção desses compósitos. Além disso, para fins de verificação, foram realizados ensaios de lixiviação, solubilização e pH nas argamassas com as cinzas CTP - II.

A NBR 10.004 (ABNT, 2004) classifica os resíduos sólidos em perigosos (Classe I), não perigosos e não-inertes (Classe IIA) e não perigosos inertes (Classe - IIB). A NBR 10.005 (ABNT, 2004) e NBR 10.006 (ABNT, 2004), estabelecem a metodologia para obtenção do lixiviado e solubilizado respectivamente. A proporção de materiais utilizados para produção das argamassas é a mesma apresentada na Tabela 20 e Tabela 21.

A Tabela 25 apresenta os resultados de lixiviação e solubilização das argamassas com CTP - I e CTP - II. Os ensaios foram realizados no LABOSAN da UFC.

Tabela 25 - Resultados de lixiviação e solubilização, em mg/L, das argamassas com CTP - I e CTP - II.

Argamassa	Lixiviado de F <sup>-</sup>	Solubilizado de F <sup>-</sup>	Solubilizado de NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Solubilizado de Cl <sup>-</sup>	Solubilizado de SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	pH
Arg - 7,5% CTP - I	5,12	2,21	-	155,23	83,1	11,52
Arg - 15% CTP - I	16,22	2,55	5,24	175,93	17,72	11,51
Arg - 7,5% CTP - II	6,74	1,94	17,43	70,56	65,97	11,49
Arg - 15% CTP - II	39,47	3,37	10,25	70,05	187,41	11,47
Valor limite	150	1,5	10	250	250	2 ≤ pH ≤ 12,5

Todas as concentrações do ensaio de lixiviação estão abaixo do máximo estabelecido pelo anexo F da respectiva norma, desta forma, os resíduos dessas argamassas não se classificam como resíduo perigoso. Entretanto, observa-se que no ensaio de solubilização, alguns valores ultrapassaram o limite estabelecido pela norma, desta forma, o material

classifica-se como resíduo não perigoso e não inerte, Classe II-A, de acordo com a NBR 10.004 (ABNT, 2004).

Vale ressaltar que nenhuma das cinzas se caracterizam como resíduo corrosivo, uma vez que de acordo com a NBR 10.004 (ABNT, 2004), essa classificação é para resíduos com pH inferior a 2, ou superior a 12,5, em água.

Além da verificação do lixiviado e solubilizado das amostras deve-se, também, avaliar a concentração de alguns íons presentes na matriz cimentícia, para que não haja manifestação patológica no compósito, em virtude da alta concentração desses componentes.

A NBR NM 137 (ABNT, 1997) estabelece os teores máximo de cloretos e sulfatos que devem estar presentes no concreto e os ensaios necessários para determinação desses íons.

A Tabela 26 apresenta os limites de sulfatos e cloretos estabelecidos em norma e a Tabela 27 apresenta os valores encontrados nas argamassas contendo as cinzas CTP - I e CTP - II. Os ensaios foram realizados no NUTEC.

Tabela 26 - Limites máximos de sulfatos e cloretos permitidos em concretos.

Requisito	Limites (mg/L)	Norma
Sulfatos (expresso em $\text{SO}_4^{2-}$ )	2000	BS EN 1008
Sulfatos (expresso em $\text{SO}_4^{2-}$ )	2000	NBR NM 137:97
Cloretos ( $\text{Cl}^-$ ) - Concreto simples	2000	NBR NM 137:97
Cloretos ( $\text{Cl}^-$ ) - Concreto armado	700	NBR NM 137:97
Cloretos ( $\text{Cl}^-$ ) - Concreto protendido	500	NBR NM 137:97

Fonte: Tabela 3 - NBR NM 137 (ABNT, 1997).

Tabela 27 - Concentrações de íons cloretos e sulfatos encontradas nas argamassas.

Argamassa	Concentração de $\text{Cl}^-$ (mg/L)	Concentração de $\text{SO}_4^{2-}$ (mg/L)
Arg - 7,5% CTP - I	700	1100
Arg - 15% CTP - I	700	1300
Arg - 7,5% CTP - II	600	900
Arg - 15% CTP - II	600	1000

Comparando os valores encontrados na Tabela 26 com os limites estabelecidos na Tabela 27, pode-se observar que as cinzas são adequadas para o uso em concreto simples e em

concreto armado, entretanto para o concreto protendido é inviável, pois, ultrapassa o limite máximo estabelecido por norma.

#### 4.2 Resultados do concreto no estado fresco

A Figura 26 e a Figura 27 apresentam os percentuais de aditivo plastificante utilizados durante a produção de concreto, com os dois tipos de cinza. Conforme citado no capítulo 3, a trabalhabilidade dos concretos foi fixada em  $100 \pm 20$  mm.

Figura 26 - Percentual do consumo de aditivo do concreto com CTP - I, em relação à massa de aglomerante.

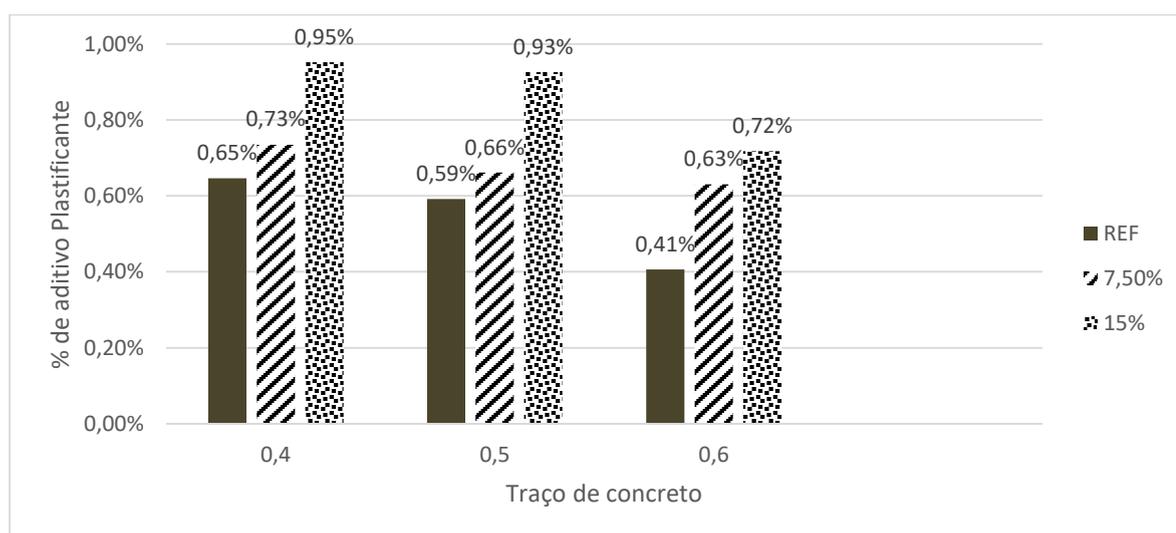
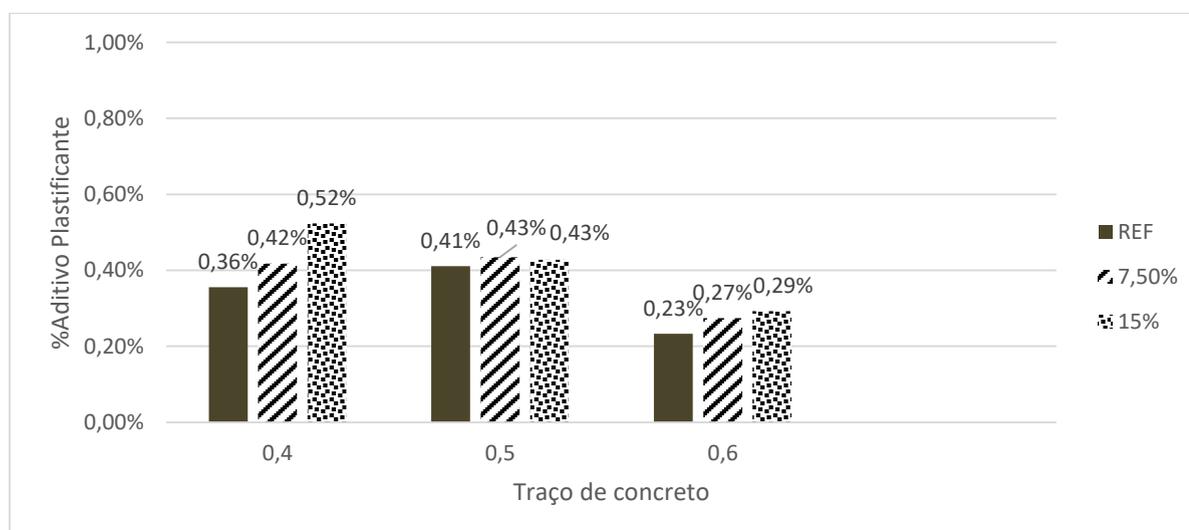


Figura 27 - Percentual do consumo de aditivo do concreto com CTP - II, em relação a massa de aglomerante.



O consumo de água é o mesmo para os dois concretos, e, como os concretos com CTP - I apresentaram teor de aditivo maior que os concretos com CTP - II, pode-se verificar que a finura da CTP - I, que é mais fina que a CTP - II conforme apresentado na Tabela 17, influenciou para um maior consumo de aditivo plastificante.

O comportamento observado na CTP - I, que é proveniente do FGD, foi observado também nos estudos de Ponikiewski e Golaszewski (2014), Khatib *et al.* (2016) e Chousidis *et al.* (2015), que utilizaram a cinza de FGD e observaram que as cinzas quando utilizadas em concreto diminuía a trabalhabilidade, conforme citado na Tabela 10.

Para a CTP - II, Cheng *et al.* (2017) e Sengul *et al.* (2005) observaram uma diminuição na trabalhabilidade no concreto com cinzas volantes, entretanto, outros autores observaram um ganho na trabalhabilidade, dentre os quais pode-se citar Ikotun *et al.* (2017), Wang *et al.* (2017) e Shaikh e Supit (2015). Esse comportamento depende do fator predominante, formato ou tamanho da partícula, que pode acarretar em uma maior ou menor trabalhabilidade.

#### **4.3 Apresentação dos resultados do concreto no estado endurecido**

A Tabela 28 apresenta a média dos resultados de diversos ensaios para o concreto no estado endurecido. Posteriormente, será feita uma análise de cada variável, comparando com a bibliografia existente e uma análise estatística, através da análise de variância (ANOVA). Os resultados de todos os ensaios encontram-se no APÊNDICES B, C e D.

Tabela 28 - Resultados dos concretos no estado endurecido.

CTP - I										
Ensaio	$f_{c3}$	$f_{c7}$	$f_{c28}$	$f_{c91}$	$f_{t28}$	$E_{c28}$	$VPU_{28}$	Abs	$Cl_{42}$	$Cl_{84}$
Unidade	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	GPa	Km/s	%	mm	mm
<b>0,4 - Ref</b>	27,96	33,45	33,65	50,72	3,67	32,22	5,30	3,22	13,78	15,85
<b>0,4 - 7,5%</b>	26,42	26,22	47,04	52,30	3,29	31,29	5,34	3,21	11,93	15,32
<b>0,4 - 15%</b>	17,41	16,31	30,59	38,75	3,07	30,28	6,00	4,24	14,98	15,19
<b>0,5 - Ref</b>	21,76	24,37	35,70	39,47	3,10	34,14	4,46	4,00	16,24	18,97
<b>0,5 - 7,5%</b>	16,89	25,79	35,90	42,31	2,84	33,86	4,41	3,69	14,26	18,19
<b>0,5 - 15%</b>	13,88	20,78	27,84	32,55	2,74	29,97	5,63	2,49	12,09	17,89
<b>0,6 - Ref</b>	16,53	18,93	23,84	26,15	2,64	30,30	4,92	4,25	18,18	24,54
<b>0,6 - 7,5%</b>	18,39	22,60	28,53	34,63	2,92	28,99	4,88	3,49	16,93	23,68
<b>0,6 - 15%</b>	17,28	21,70	27,39	33,17	2,66	31,79	4,92	3,67	16,26	23,46
CTP - II										
Ensaio	$f_{c3}$	$f_{c7}$	$f_{c28}$	$f_{c91}$	$f_{t28}$	$E_{c28}$	$VPU_{28}$	Abs	$Cl_{42}$	$Cl_{84}$
Unidade	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	GPa	Km/s	%	mm	mm
<b>0,4 - Ref</b>	27,74	35,07	41,39	46,87	3,61	29,84	5,12	2,72	13,45	17,87
<b>0,4 - 7,5%</b>	34,99	40,38	49,42	51,74	3,58	31,69	5,10	2,43	11,79	15,73
<b>0,4 - 15%</b>	28,71	37,13	43,19	47,92	4,04	33,51	5,16	2,08	11,49	14,27
<b>0,5 - Ref</b>	26,65	31,24	35,56	36,47	3,61	31,16	5,14	3,05	16,11	19,65
<b>0,5 - 7,5%</b>	22,76	29,42	34,06	36,48	2,94	34,33	5,12	2,72	12,24	17,8
<b>0,5 - 15%</b>	24,65	31,20	36,07	39,41	3,43	33,28	5,15	2,33	12,19	15,06
<b>0,6 - Ref</b>	17,26	19,05	26,14	30,39	2,77	30,21	5,10	3,35	18,5	25,6
<b>0,6 - 7,5%</b>	14,55	20,41	26,90	27,16	2,95	28,60	5,12	2,88	15,47	24,17
<b>0,6 - 15%</b>	12,64	18,87	24,93	27,63	2,91	28,11	5,15	2,69	13,62	23,97

## 4.4 Análise dos resultados do concreto no estado endurecido

### 4.4.1 Resistência à compressão

A Tabela 29 apresenta o resultado estatístico obtido pela análise de variância utilizando ANOVA para a resistência à compressão dos concretos com as cinzas de CTP - I e CTP - II. Analisou-se a influência do tipo de cinza, a relação a/aglo e o teor de cinza na resistência à compressão. Além disso, a Tabela 30 e a Tabela 31 apresentam os resultados estatísticos obtidos pela ANOVA dos concretos com CTP - I e CTP - II, respectivamente. Já a Figura 28, a Figura 29, a Figura 30 e a Figura 31 apresentam o comportamento da resistência à compressão dos concretos, em função da relação a/aglo e do teor de cinza.

Tabela 29 - Resultados estatísticos obtidos pela ANOVA para a Resistência à compressão dos Concretos com CTP - I e CTP - II.

Resultados ANOVA da resistência à compressão aos 3 dias			
Parâmetro	F	valor-P	Significância*
Tipo de cinza	8,461	0,005	S
a/aglo	25,240	0,000	S
teor de cinza	3,549	0,041	S
Resultados ANOVA da resistência à compressão aos 7 dias			
Parâmetro	F	valor-P	Significância*
Tipo de cinza	13,376	0,000	S
a/aglo	16,561	0,000	S
teor de cinza	1,504	0,238	NS
Resultados ANOVA da resistência à compressão aos 28 dias			
Parâmetro	F	valor-P	Significância*
Tipo de cinza	4,658	0,039	S
a/aglo	36,389	0,000	S
teor de cinza	5,386	0,010	S
Resultados ANOVA da resistência à compressão aos 91 dias			
Parâmetro	F	valor-P	Significância*
Tipo de cinza	0,176	0,678	NS
a/aglo	44,458	0,000	S
teor de cinza	2,374	0,110	NS

\*S – Significativo e NS – Não significativo.

Tabela 30 - Resultados estatísticos obtidos pela ANOVA para a Resistência à compressão do Concreto com CTP - I.

Resultados ANOVA da resistência à compressão aos 3 dias			
Parâmetro	F	valor-P	Significância*
a/aglo	8,356	0,005	S
teor de cinza	5,604	0,018	S
Resultados ANOVA da resistência à compressão aos 7 dias			
Parâmetro	F	valor-P	Significância*
a/aglo	1,317	0,301	NS
teor de cinza	3,075	0,081	NS
Resultados ANOVA da resistência à compressão aos 28 dias			
Parâmetro	F	valor-P	Significância*
a/aglo	7,773	0,006	S
teor de cinza	5,348	0,020	S
Resultados ANOVA da resistência à compressão aos 91 dias			
Parâmetro	F	valor-P	Significância*
a/aglo	20,653	0,000	S
teor de cinza	5,509	0,018	S

\*S – Significativo e NS – Não significativo.

Figura 28 - Comportamento da resistência à compressão do concreto com CTP - I, em função da relação a/aglo.

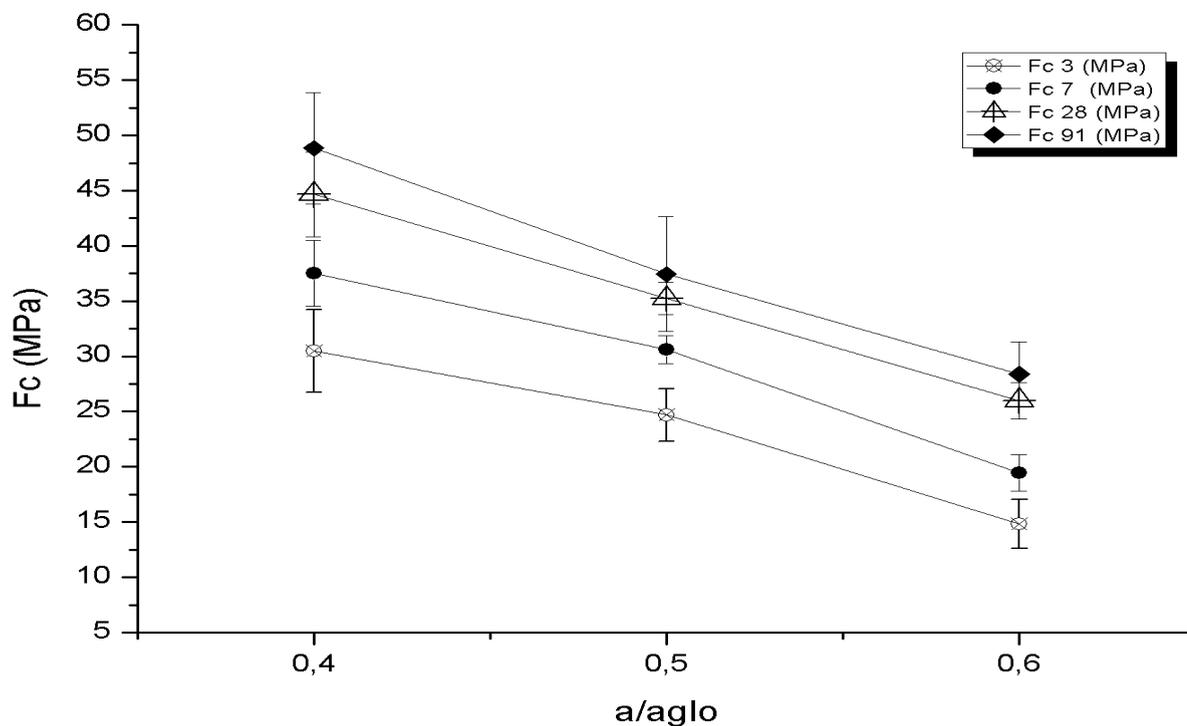


Figura 29 - Comportamento da resistência à compressão do concreto com CTP - I, em função do teor de cinza.

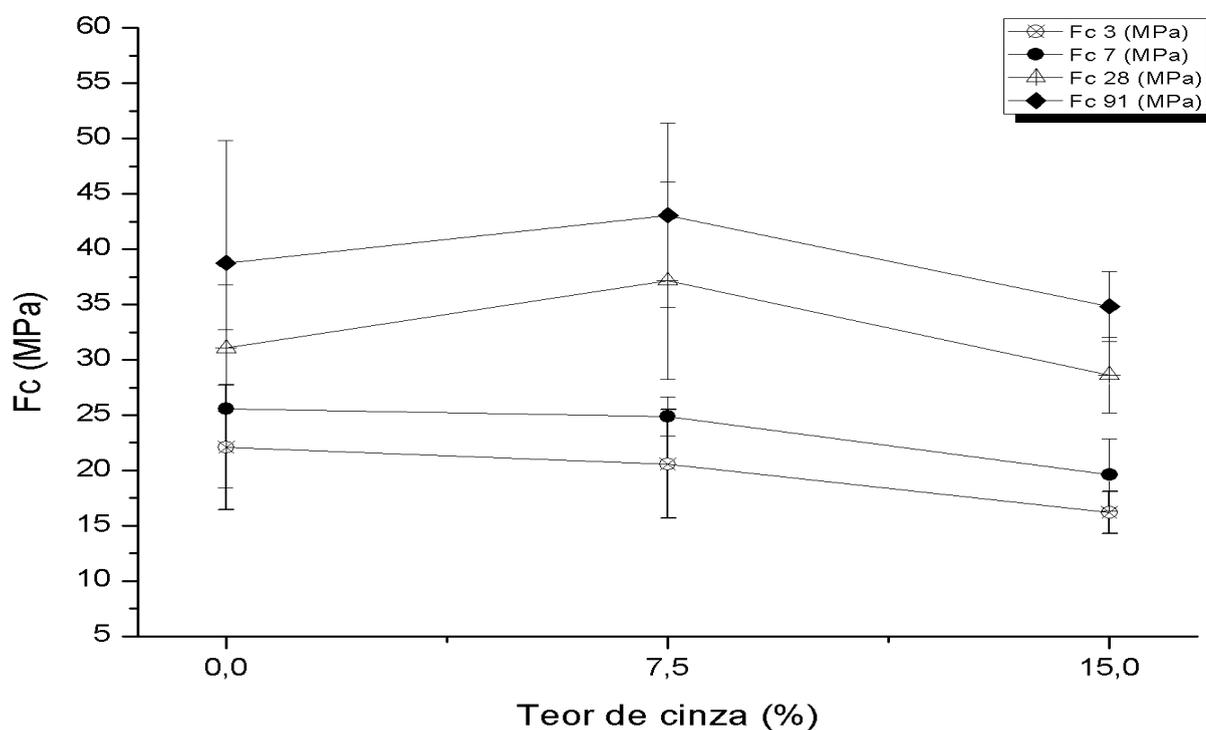


Tabela 31 - Resultados estatísticos obtidos pela ANOVA para a Resistência à compressão do Concreto com CTP - II.

Resultados ANOVA da resistência à compressão aos 3 dias			
Parâmetro	F	valor-P	Significância*
a/aglo	45,896	0,000	S
teor de cinza	0,977	0,402	NS
Resultados ANOVA da resistência à compressão aos 7 dias			
Parâmetro	F	valor-P	Significância*
a/aglo	111,016	0,000	S
teor de cinza	0,888	0,435	NS
Resultados ANOVA da resistência à compressão aos 28 dias			
Parâmetro	F	valor-P	Significância*
a/aglo	87,606	0,000	S
teor de cinza	1,720	0,217	NS
Resultados ANOVA da resistência à compressão aos 91 dias			
Parâmetro	F	valor-P	Significância*
a/aglo	27,065	0,000	S
teor de cinza	0,021	0,979	NS

\*S – Significativo e NS – Não significativo.

Figura 30 - Comportamento da resistência à compressão do concreto com CTP - II, em função da relação a/aglo.

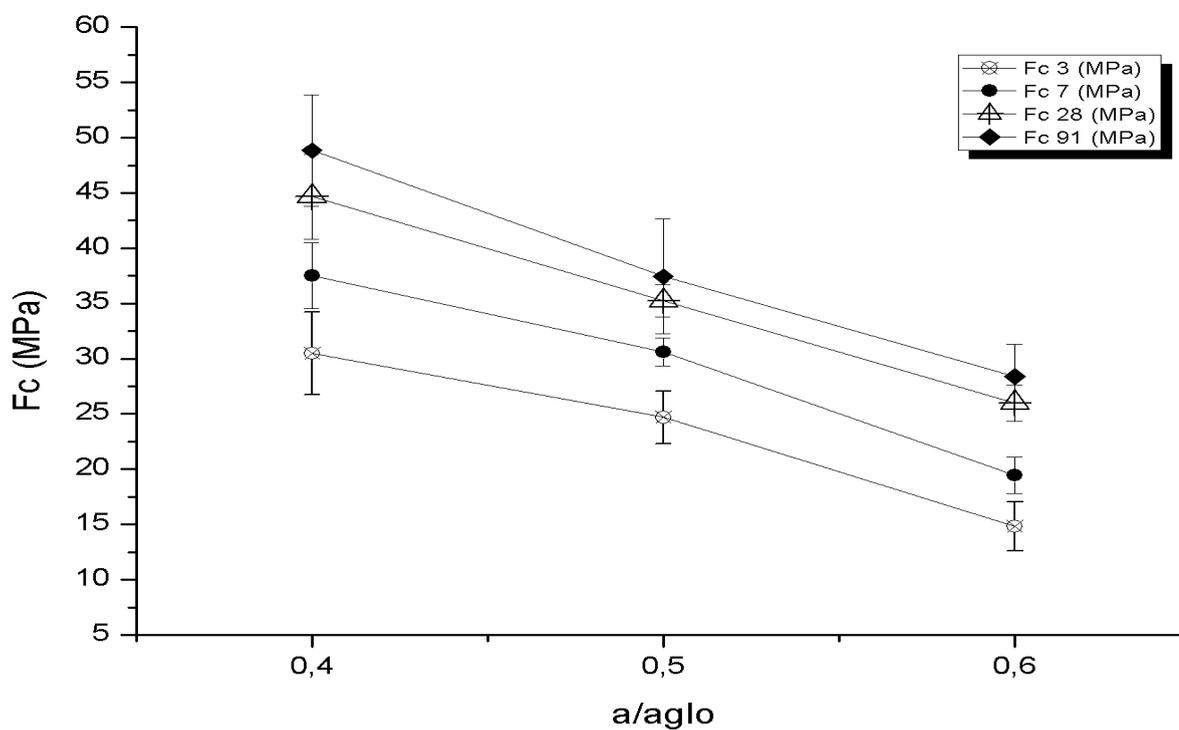
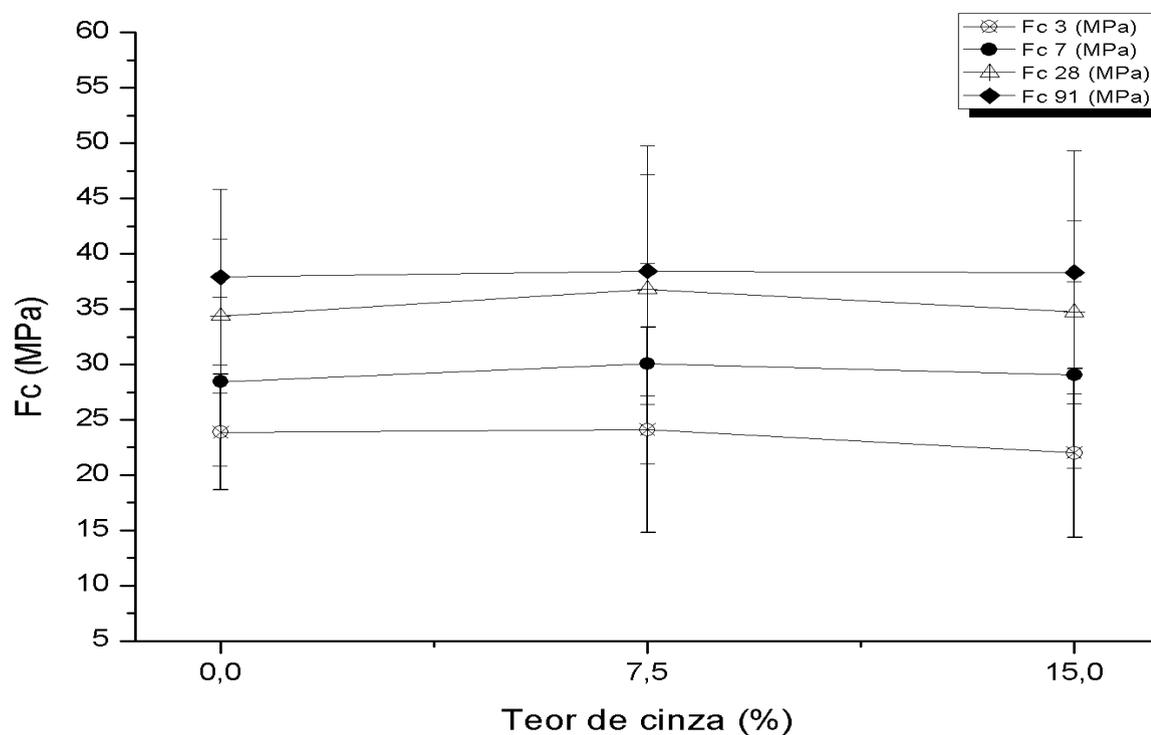


Figura 31 - Comportamento da resistência à compressão do concreto com CTP - II, em função do teor de cinza.



Observa-se, através da Tabela 29, que a relação a/aglo influenciou a variável resposta em todas as idades, o que era esperado uma vez que há uma relação entre resistência à compressão e a relação a/aglo. Além disso, observa-se que na maioria dos casos houve influência significativa do tipo da cinza utilizada e do teor de cinza na variável resposta. A influência do tipo de cinza é esperada, uma vez que as cinzas apresentam características físicas e químicas bem distintas. Já o teor da cinza, é algo particular de cada cinza e é melhor analisado na Tabela 30 e na Tabela 31.

Analisando a Tabela 30 observa-se que a relação a/aglo não influenciou significativamente a resistência à compressão aos 7 dias, esse comportamento não é esperado, pois, esse resultado diz que não houve diferença significativa entre a resistência à compressão com a variação da relação a/aglo. Porém, a Figura 28 mostra o comportamento padrão do  $f_{c7}$  x a/aglo, em que o valor resistência à compressão diminuiu com o aumento da relação a/aglo. Além disso, o teor de cinza influenciou a resistência à compressão em todas as idades, o que mostra uma boa reatividade dessa cinza na matriz cimentícia.

Na Tabela 31 observou-se que as relações a/aglo influenciaram significativamente a resistência à compressão, em todas as idades. O mesmo já não ocorreu com o teor de cinza, cujo o fator não influenciou a resistência à compressão em nenhuma das idades.

Analisando a Figura 28 e a Figura 30 observa-se, nas duas figuras, o comportamento típico da  $f_c$  x a/aglo, a qual à medida que aumenta-se o valor da a/aglo a resistência à compressão do concreto diminuiu. Já na Figura 29 observa-se uma diminuição da resistência à compressão com o aumento do teor de cinza nos concretos com CTP - I, aos 3 dias e 7 dias, já aos 28 dias e 91 dias é observado a formação de um pico de resistência no teor de 7,5% de cinza. Para os concretos com CTP - II pode-se observar na Figura 31 que, em todas as idades, houve apenas pequenas variações na resistência à compressão do concreto, em função do teor de cinza.

A influência significativa apenas da CTP - I na resistência à compressão do concreto pode ser explicada pelo fato da CTP - I apresentar uma finura Blaine 2 vezes maior que a finura da CTP - II, conforme apresentado Tabela 17 e, por consequência, ser mais reativa.

De maneira geral observou-se que houve um crescimento acentuado no traço com relação a/aglo de 0,4, havendo um pico de resistência no traço 0,4 - 7,5%, para ambos os traços. Nos demais traços as resistências mantiveram-se próximas umas das outras, o que indica que a cinza volante atuou significativamente na menor relação a/aglo e apenas manteve a resistência nas demais relações a/aglo. Todos os traços tiveram, pelo menos, 75% da sua resistência à compressão máxima obtida aos 7 dias.

Hoppe Filho (2008), observou que concretos com alto teor de cinza volante, a partir de 50%, em massa, apresentam como desvantagem a perda de resistência à compressão, gerando diferenças de mais de 10Mpa em relação ao traço de referência, aos 7 dias.

Khatib *et al.* (2016) observaram que os concretos com teores de cinza acima de 20% obtiveram perda de resistência à compressão. Chousidis *et al.* (2015) observaram que os concretos com teores de até 10% de cinza obtiveram resistência à compressão superior ao traço de referência. Ambos utilizaram cinzas semelhantes à CTP – I.

As cinzas utilizadas pelos autores a seguir classificam-se na classe C da NBR 12.653 (ABNT, 2014).

Ikotun *et al.* (2016) observaram que a resistência à compressão dos concretos com cinza, nos teores de 30% e 50% e *a/aglo* de 0,4 e 0,5, foi inferior ao concreto de referência.

Wang *et al.* (2015) observaram que as resistências à compressão do concreto em idades avançadas superaram a resistência do concreto de referência, para os teores de substituição de 15% e 25%, já para os teores de 35% e 45%, mesmo em idades avançadas, as resistências não superaram a resistência do concreto de referência.

Wankhede e Fulari (2014) observaram que os traços de concreto com 10% e 20% de cinza volante obtiveram resistência à compressão superior ao concreto de referência e o traço com 30% de cinza volante obteve uma resistência à compressão abaixo do traço de referência, nas idades de 7, 14 e 28 dias.

A referências citadas mostram que um alto consumo de cinza, seja ela de FGD ou classe C, não apresenta um bom desempenho na resistência à compressão do concreto, o que corrobora com os resultados encontrados para as cinzas CTP - I e CTP – II.

#### **4.4.2 Resistência à tração**

A Tabela 32 a apresenta o resultado estatístico obtido pela análise de variância utilizando ANOVA para a resistência à tração dos concretos com as cinzas de CTP - I e CTP - II. Já a Tabela 33 apresenta a os resultados da ANOVA dos traços executados para cada cinza.

Tabela 32 - Resultados ANOVA da resistência à tração dos concretos com as CTP - I e CTP - II aos 28 dias.

Parâmetro	F	valor-P	Significância*
Tipo de cinza	9,366	0,005	S
a/aglo	16,173	0,000	S
teor de cinza	0,656	0,526	NS

\*S – Significativo e NS – Não significativo.

Tabela 33 - Resultados ANOVA da resistência à tração do concreto com CTP - I e do concreto com CTP - II, aos 28 dias.

Resultados ANOVA da resistência à tração aos 28 dias, para os concretos com CTP - I			
Parâmetro	F	valor-P	Significância*
a/aglo	5,019	0,024	S
teor de cinza	1,290	0,308	NS
Resultados ANOVA da resistência à tração aos 28 dias, para os concretos com CTP - II			
Parâmetro	F	valor-P	Significância*
a/aglo	16,157	0,000	S
teor de cinza	2,005	0,174	NS

\*S – Significativo e NS – Não significativo.

A Figura 32 e a Figura 33 apresentam o comportamento da resistência à tração dos concretos em função da relação a/aglo e do teor de cinza.

Figura 32 - Comportamento da resistência à tração do concreto com CTP - I, em função da relação a/aglo e do teor de cinza.

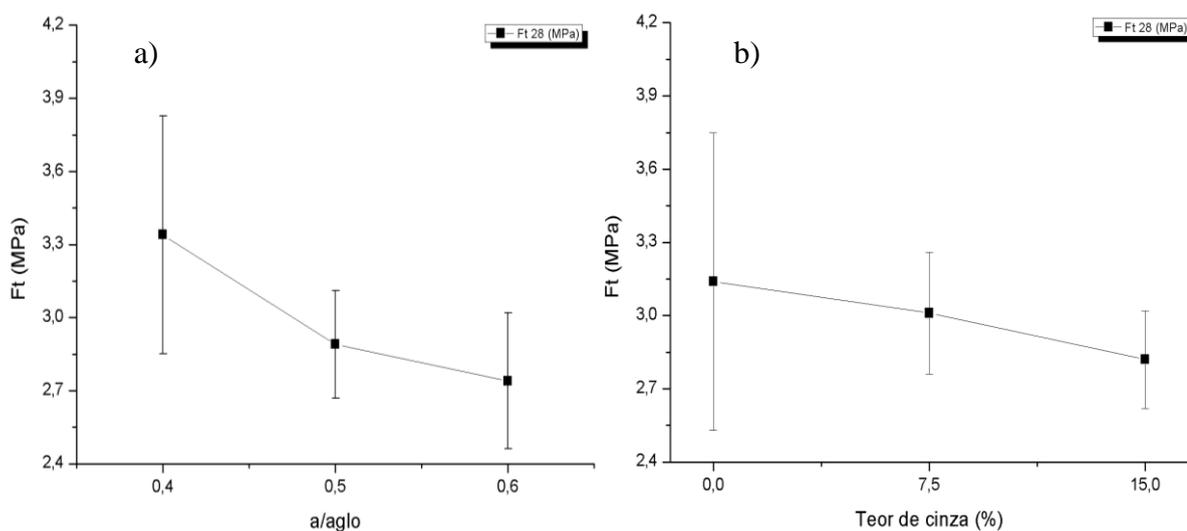
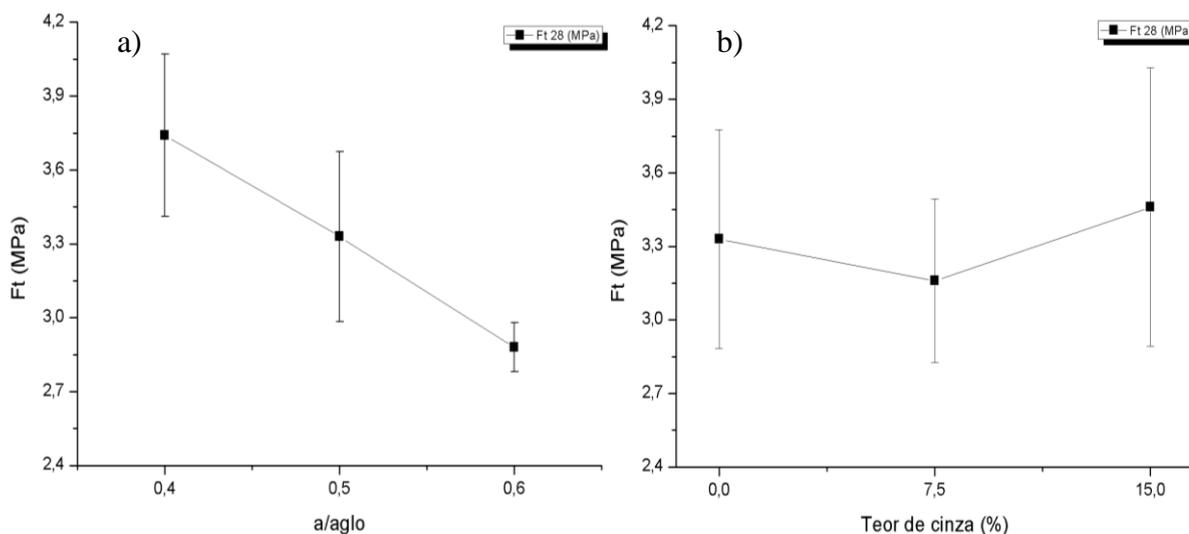


Figura 33 - Comportamento da resistência à tração do concreto com CTP - II, em função da relação a/aglo e do teor de cinza.



Observa-se que o teor de cinza não influenciou significativamente os concretos, em nenhum dos casos analisados, já as relações a/aglo influenciaram significativamente a resistência à tração, em todos os casos, conforme observado na Tabela 32 e Tabela 33. A Figura 32a e a Figura 33a mostram o comportamento típico da resistência à tração, em função da relação a/aglo. Esse comportamento gráfico é bem semelhante aos apresentados na Figura 28 e na Figura 30. Já a Figura 32b e a Figura 33b mostram uma variação da resistência à tração com o uso da cinza, entretanto, conforme observado essas variações não são significativas.

Os valores de resistência à tração são aproximadamente 10% dos valores de resistência à compressão dos concretos, conforme citado por Azevedo (2002), atingindo um máximo de 4,04 MPa com o traço de 0,4 - 15% de CTP - II. Era esperado que os valores de resistência à tração fossem baixos, uma vez que esse material não possui boa resistência a esse tipo de esforço. Os baixos valores de resistência apresentados corroboram com o que foi dito por Dal Molin (2011), Azevedo (2002) e com a teoria das falhas proposta por Griffith (1920).

#### 4.4.3 Módulo de Elasticidade

A Tabela 34 apresenta o resultado estatístico obtido pela análise de variância utilizando ANOVA, para o módulo de elasticidade dos concretos com as cinzas de CTP - I e CTP - II. Em seguida, analisou-se os resultados obtidos pela ANOVA para cada tipo de cinza, cujo os resultados encontram-se na Tabela 35. Já a Figura 34 e a Figura 35 apresentam o

comportamento do módulo de elasticidade, em função da relação a/aglo e do teor de cinza, respectivamente.

Tabela 34 - Resultados ANOVA do módulo de elasticidade dos concretos com as CTP - I e CTP - II aos 28 dias.

<b>Parâmetro</b>	<b>F</b>	<b>valor-P</b>	<b>Significância*</b>
Tipo de cinza	0,21	0,652	NS
a/aglo	12,36	0,000	S
teor de cinza	0,11	0,892	NS

\*S – Significativo e NS – Não significativo.

Tabela 35 - Resultados ANOVA do módulo de elasticidade do concreto com CTP - I e do concreto com CTP - II, aos 28 dias.

Resultados ANOVA do módulo de elasticidade aos 28 dias, para os concretos com CTP - I			
<b>Parâmetro</b>	<b>F</b>	<b>valor-P</b>	<b>Significância*</b>
a/aglo	3,923	0,035	S
Teor de cinza	1,739	0,199	NS
Resultados ANOVA do módulo de elasticidade aos 28 dias, para os concretos com CTP - II			
<b>Parâmetro</b>	<b>F</b>	<b>valor-P</b>	<b>Significância*</b>
a/aglo	10,485	0,001	S
teor de cinza	1,202	0,320	NS

\*S – Significativo e NS – Não significativo.

Analisando a Tabela 34 observou-se que não houve influência do teor de cinza e do tipo de cinza no módulo de elasticidade. Apenas a relação a/aglo influenciou significativamente.

O mesmo ocorreu na análise de variância obtido pela ANOVA apresentada na Tabela 35. Araújo (2000) afirmou que o módulo de elasticidade depende de diversos fatores, sendo a resistência à compressão apenas um deles, e que as propriedades elásticas do agregado têm grande influência sobre o módulo de Young, devendo essas serem consideradas nas formulações. Logo, há uma influência da resistência à compressão, entretanto ela não é o único fator a influenciar essa variável.

Figura 34 - Comportamento do módulo de elasticidade do concreto com CTP - I, em função da relação a/aglo e do teor de cinza.

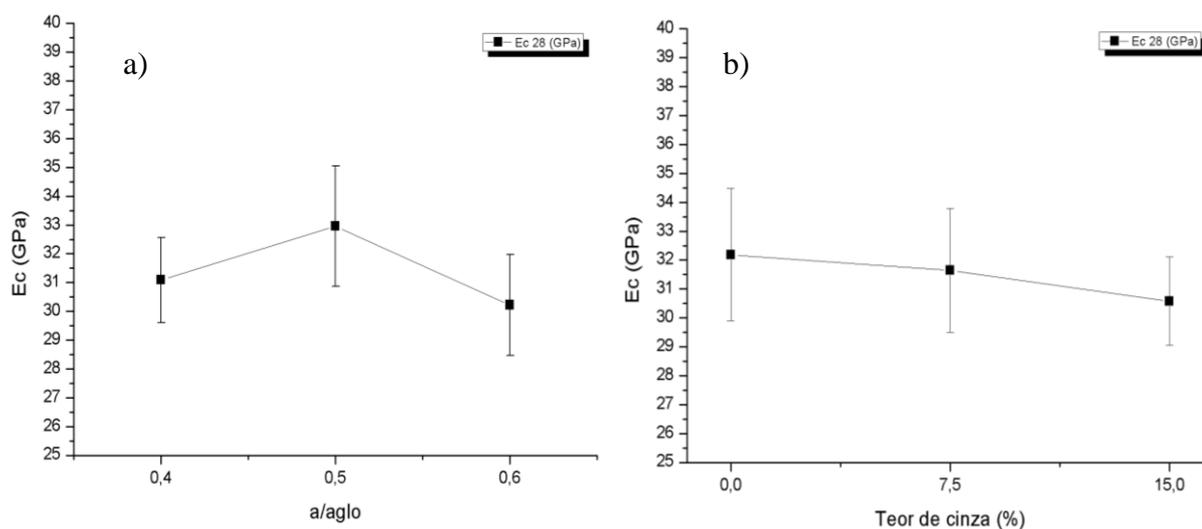
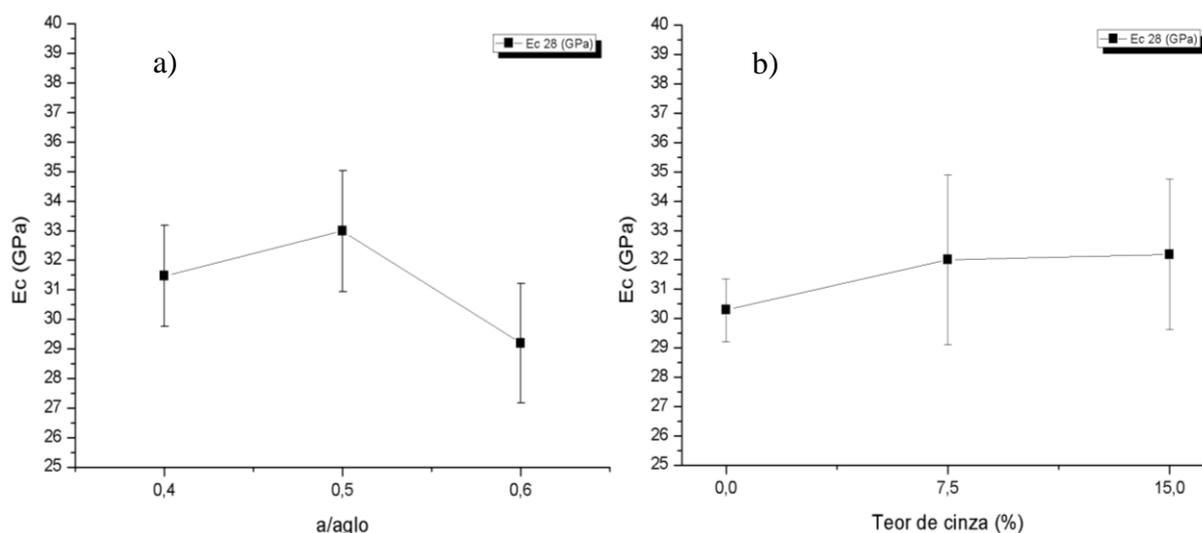


Figura 35 - Comportamento do módulo de elasticidade do concreto com CTP - II, em função da relação a/aglo e do teor de cinza.



Analisando a Figura 34a e a Figura 35a observa-se que os traços com a relação a/aglo de 0,5 apresentam os maiores valores de módulo de elasticidade. Pode-se esperar que os concretos com as maiores resistências à compressão apresentem os maiores valores de módulo de elasticidade, uma vez que o módulo de elasticidade pode ser calculado em função da resistência à compressão, entretanto, conforme já citado por Araújo (2000), outros fatores influenciam o comportamento do módulo de elasticidade, além da resistência à compressão, como a quantidade o tipo de agregados presentes no concreto, em função da elevada rigidez que esses materiais, geralmente, apresentam. O consumo de agregados nos traços executados aumentam, à medida que aumenta-se a relação a/aglo, conforme apresentado na Tabela 20 e na

Tabela 21. Esse fato pode justificar o aumento da rigidez dos traços com relação a/aglo de 0,4 para os traços com a/aglo de 0,5. A brita é o componente de maior rigidez presente em todos traços de concreto executados, logo, uma maior quantidade desse material pode justificar o maior módulo de elasticidade obtido nesse traço.

Já os traços com relação a/aglo de 0,6 obtiveram os menores valores de módulo de elasticidade. Nesse caso, o ganho de rigidez em função do aumento no consumo de agregados não foi suficiente para compensar a perda de resistência à compressão obtida nesses traços.

No que se refere ao teor de cinza, observa-se na Figura 34b e na Figura 35b que não houve variações significativas no módulo de elasticidade, à medida que se alterou os teores de cinzas nos traços executados.

#### 4.4.4 Velocidade de pulso ultrassônico (VPU)

A Tabela 36 apresenta o resultado estatístico obtido pela análise de variância utilizando ANOVA, para a VPU dos concretos com as cinzas de CTP - I e CTP - II. Em seguida, analisou-se os resultados obtidos pela ANOVA, para cada tipo de cinza, cujo os resultados encontram-se na Tabela 37. Já a Figura 36 e a Figura 37 apresentam a influência dos fatores a/aglo e teor de cinza, respectivamente, na VPU.

Tabela 36 - Resultados ANOVA da VPU dos concretos com as CTP - I e CTP - II aos 28 dias.

Parâmetro	F	valor-P	Significância*
Tipo de cinza	0,10	0,750347	NS
a/aglo	5,12	0,012	S
teor de cinza	5,07	0,013	S

\*S – Significativo e NS – Não significativo.

Tabela 37 - Resultados ANOVA da VPU dos concretos com CTP - I e CTP - II, aos 28 dias.

Concreto com CTP - I			
Parâmetro	F	valor-P	Significância*
a/aglo	12,091	0,001	S
Teor de cinza	10,474	0,002	S
Concreto com CTP - II			
Parâmetro	F	valor-P	Significância*
a/aglo	1,071	0,371	NS
teor de cinza	5,562	0,018	S

\*S – Significativo e NS – Não significativo.

Figura 36 - Comportamento da VPU do concreto com CTP - I, em função da relação a/aglo e do teor de cinza.

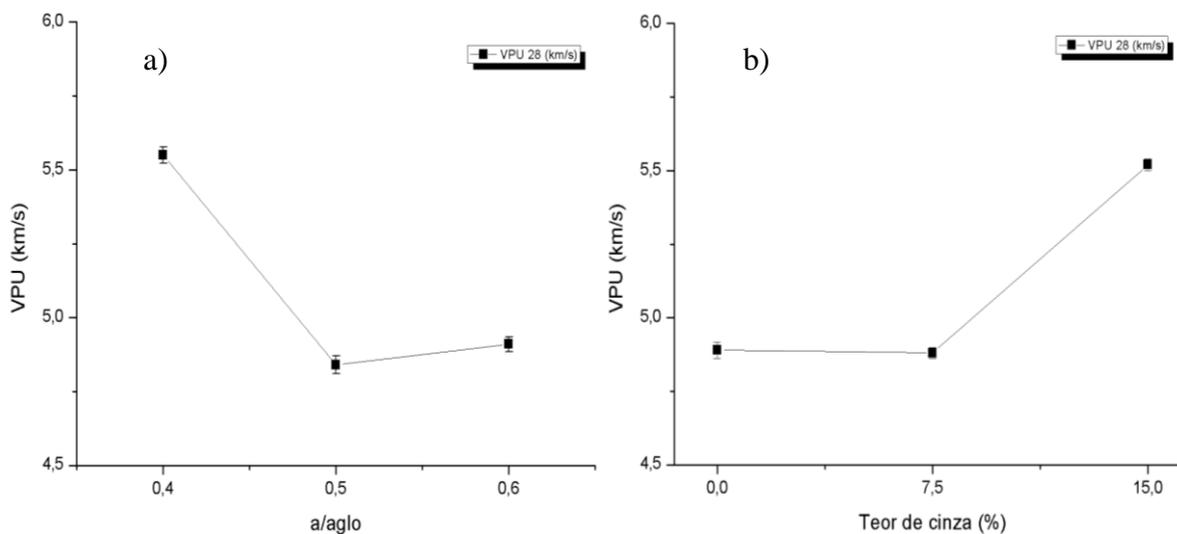
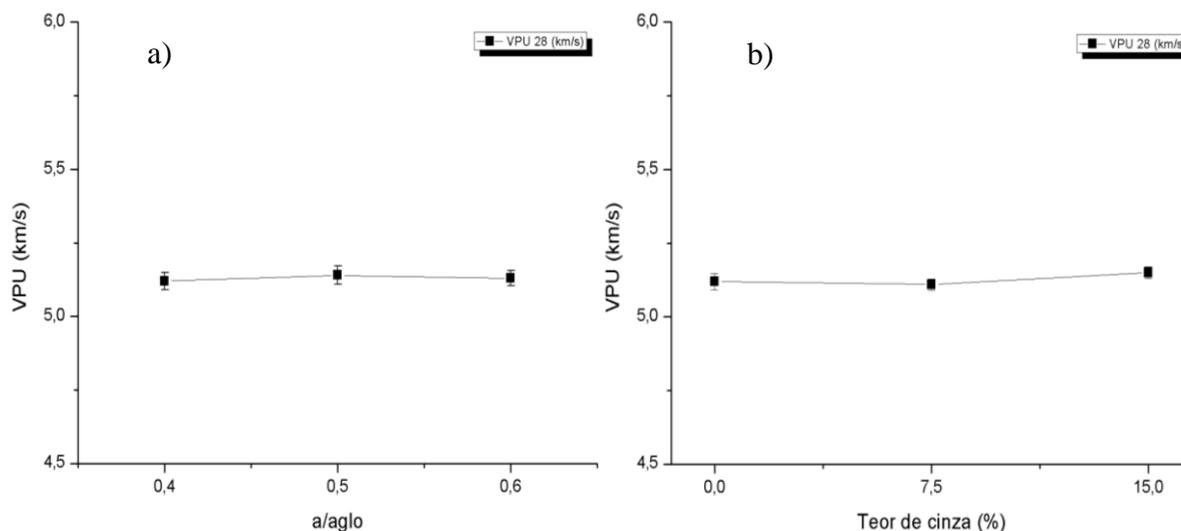


Figura 37 - Comportamento da VPU do concreto com CTP - II, em função da relação a/aglo e do teor de cinza.



Observou-se, em virtude dos resultados apresentados na Tabela 36 e Tabela 37, que apenas a relação a/aglo no concreto com CTP - II não influenciou significativamente a VPU do concreto, os demais fatores apresentam influência significativa.

Graficamente, através da Figura 36 e Figura 37, observa-se que a VPU dos concretos com CTP - I apresentaram uma maior variação que os concretos com CTP - II.

Whitehurst (1996) e Ricon et al. (1998) comentam que um concreto de excelente qualidade possui, como uma das características, velocidade da onda ultrassônica superior a 4,5 km/s e para velocidades superiores a 4,0 km/s a qualidade é ótimo. Portanto, pode-se observar

que todos os traços com CTP - II apresentaram qualidade excelente e no concreto com CTP - I apenas dois apresentaram ótima, os demais foram excelentes. Isso é uma evidência de que o compósito não tinha grandes vazios internamente.

#### 4.4.5 Absorção de água

A Tabela 38 apresenta o resultado estatístico obtido pela análise de variância utilizando ANOVA para a absorção de água dos concretos com as cinzas de CTP - I e CTP - II. Em seguida, analisou-se os resultados obtidos pela ANOVA para cada tipo de cinza, cujo os resultados encontram-se na Tabela 39. Já a Figura 38 e a Figura 39 apresentam o comportamento dos fatores a/aglo e teor de cinza na absorção de água.

Tabela 38 - Resultados ANOVA da absorção de água dos concretos com as CTP - I e CTP - II aos 28 dias.

<b>Parâmetro</b>	<b>F</b>	<b>valor-P</b>	<b>Significância*</b>
Tipo de cinza	31,032	0,000	S
a/aglo	2,482	0,101	NS
teor de cinza	3,614	0,039	S

\*S – Significativo e NS – Não significativo.

Tabela 39 - Resultados ANOVA da absorção de água do concreto com CTP - I e do concreto com CTP - II, aos 28 dias.

<b>Concreto com CTP - I</b>			
<b>Parâmetro</b>	<b>F</b>	<b>valor-P</b>	<b>Significância*</b>
a/aglo	0,536	0,598	NS
teor de cinza	0,539	0,596	NS
<b>Concreto com CTP - II</b>			
<b>Parâmetro</b>	<b>F</b>	<b>valor-P</b>	<b>Significância*</b>
a/aglo	24,071	0,000	S
teor de cinza	33,867	0,000	S

\*S – Significativo e NS – Não significativo.

Figura 38 - Comportamento da absorção do concreto com CTP - I, em função da relação a/aglo e do teor de cinza.

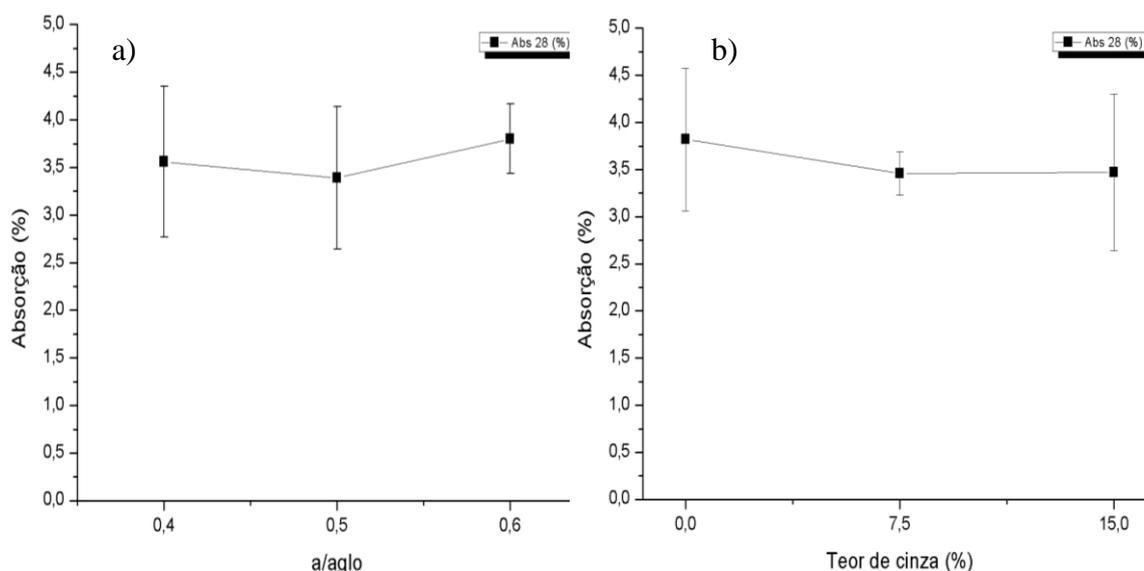
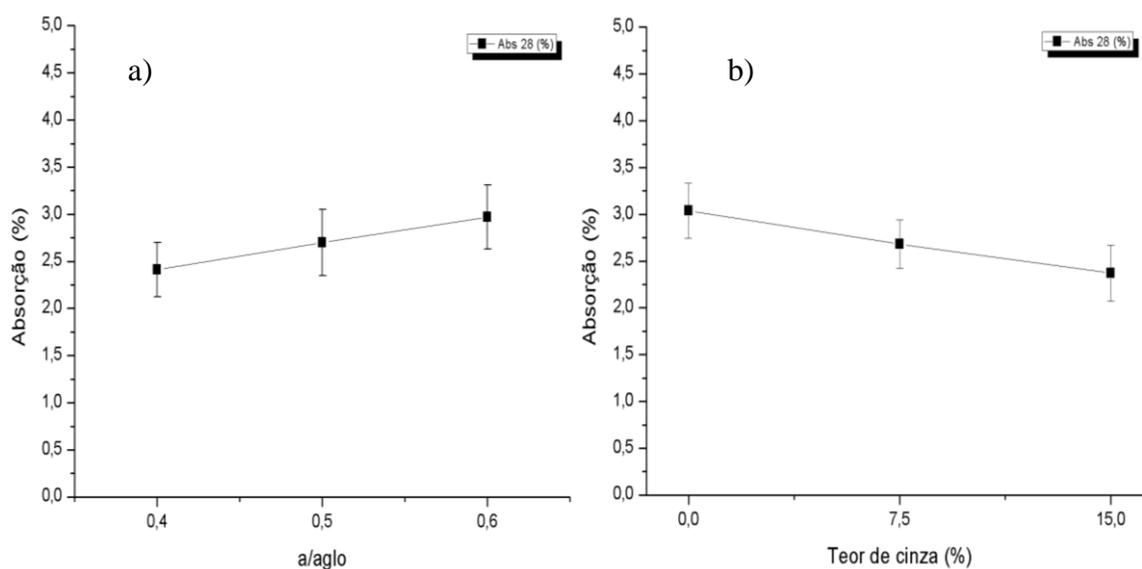


Figura 39 - Comportamento da absorção do concreto com CTP - II, em função da relação a/aglo e do teor de cinza.



Observa-se, através dos resultados apresentados na Tabela 38, que o tipo de cinza e o teor de cinza influenciaram significativamente o comportamento da variável dos concretos com cinzas, entretanto o mesmo não ocorreu com a relação a/aglo. Analisando os resultados da Tabela 39 observa-se que não houve influência significativa de nenhum dos fatores para os concretos com CTP - I. O oposto já ocorre para os concretos com CTP - II, cujo os dois fatores influenciam significativamente.

Apesar de os dois fatores, relação a/aglo e teor de cinza, analisados não apresentarem influência significativa nos concretos com CTP - I, esperava-se que os gráficos

apresentados na Figura 38, especialmente o gráfico da absorção em função da relação a/aglo, fossem semelhantes aos gráficos apresentados na Figura 39, ou seja, que a absorção aumentasse com o aumento da relação a/aglo e que a absorção diminuísse com o aumento do teor de cinza.

Já para os concretos com CTP - II a Figura 39 retrata o comportamento esperado, que é a absorção diminuindo com a diminuição da relação a/aglo e com o aumento no teor de cinza, pois, geralmente concretos com baixas relações a/aglo tendem a apresentar menores índices de vazios, bem como o uso da cinza volante tende a diminuir a quantidade de vazios no concreto.

Segundo a classificação da *Concrete Society* (2008) observa-se que a maioria dos traços de concreto com CTP-I são de média absorção, uma vez que os valores de absorção estão entre 3% e 5%, e a maioria dos concretos com traço de CTP - II são de baixa absorção, valores de até 3%.

#### 4.4.6 Penetração de cloretos

A Tabela 40 apresenta o resultado estatístico obtido pela análise de variância utilizando ANOVA para a penetração de cloretos dos concretos com as cinzas de CTP - I e CTP - II, nas idades de 42 dias e 84 dias, respectivamente. Em seguida, analisou-se os resultados obtidos pela ANOVA para cada tipo de cinza, cujo os resultados encontram-se nas Tabela 41 e Tabela 42. Já a Figura 40, Figura 41, Figura 42 e Figura 43 apresentam o comportamento dos fatores a/aglo e teor de cinza na penetração de cloretos.

Tabela 40 - Resultados ANOVA da penetração de cloretos dos concretos com as CTP - I e CTP - II, aos 42 dias e 84 dias.

<b>Resultados ANOVA de penetração de cloretos aos 42 dias</b>			
<b>Parâmetro</b>	<b>F</b>	<b>valor-P</b>	<b>Significância*</b>
Tipo de cinza	4,081	0,0443	S
a/aglo	37,097	0,0000	S
teor de cinza	22,374	0,0000	S
<b>Resultados ANOVA de penetração de cloretos aos 84 dias</b>			
<b>Parâmetro</b>	<b>F</b>	<b>valor-P</b>	<b>Significância*</b>
Tipo de cinza	0,028	0,867	NS
a/aglo	139,774	0,000	S
teor de cinza	5,940	0,003	S

\*S – Significativo e NS – Não significativo.

Tabela 41 - Resultados ANOVA da penetração de cloretos do concreto com CTP - I, aos 42 dias e 84 dias.

<b>Resultados ANOVA de penetração de cloretos aos 42 dias</b>			
<b>Parâmetro</b>	<b>F</b>	<b>valor-P</b>	<b>Significância*</b>
a/aglo	22,137	0,000	S
teor de cinza	7,905	0,001	S
<b>Resultados ANOVA de penetração de cloretos aos 84 dias</b>			
<b>Parâmetro</b>	<b>F</b>	<b>valor-P</b>	<b>Significância*</b>
a/aglo	71,132	0,000	S
teor de cinza	1,003	0,369	NS

\*S – Significativo e NS – Não significativo.

Tabela 42 - Resultados ANOVA da penetração de cloretos do concreto com CTP - II, aos 42 dias e 84 dias.

<b>Resultados ANOVA de penetração de cloretos aos 42 dias</b>			
<b>Parâmetro</b>	<b>F</b>	<b>valor-P</b>	<b>Significância*</b>
a/aglo	15,600	0,000	S
teor de cinza	18,515	0,000	S
<b>Resultados ANOVA de penetração de cloretos aos 84 dias</b>			
<b>Parâmetro</b>	<b>F</b>	<b>valor-P</b>	<b>Significância*</b>
a/aglo	72,540	0,000	S
teor de cinza	6,983	0,001	S

\*S – Significativo e NS – Não significativo.

Figura 40 - Comportamento da penetração de cloreto, aos 42 dias e 84 dias, em concreto com CTP - I, em função da relação a/aglo.

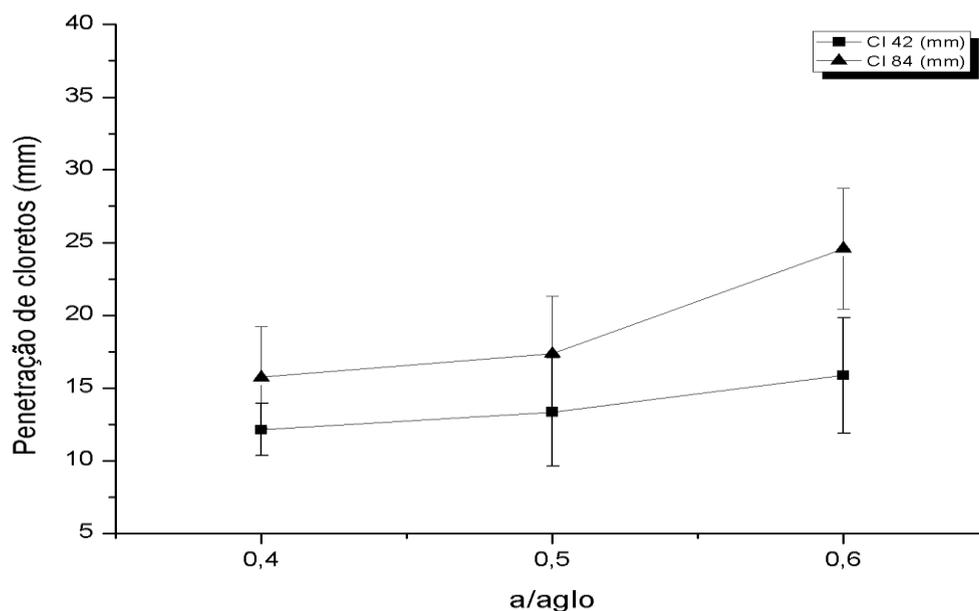


Figura 41 - Comportamento da penetração de cloreto, aos 42 dias e 84 dias, em concreto com CTP - I, em função do teor de cinza.

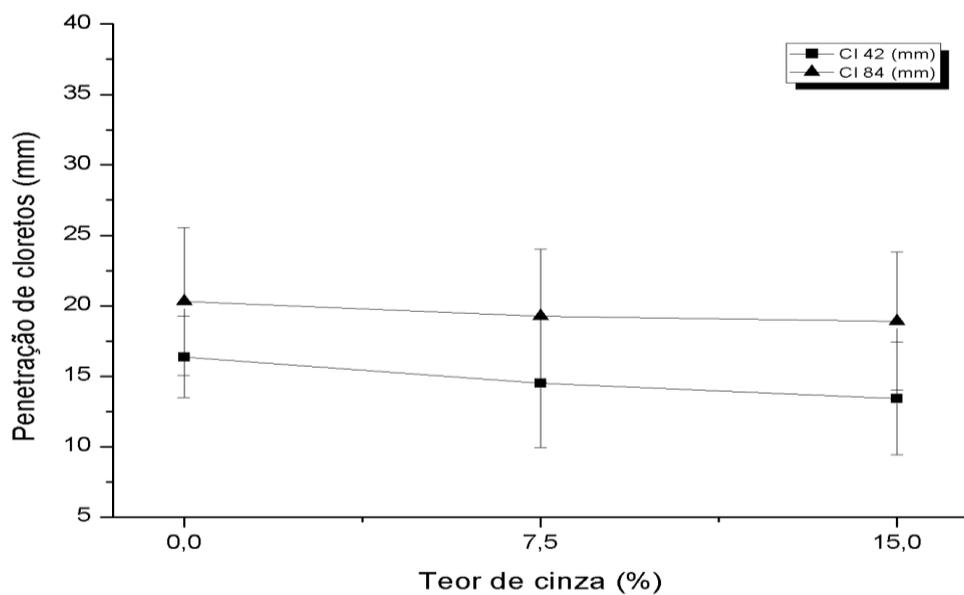


Figura 42 - Comportamento da penetração de cloreto, aos 42 dias e 84 dias, em concreto com CTP - II, em função da relação a/aglo.

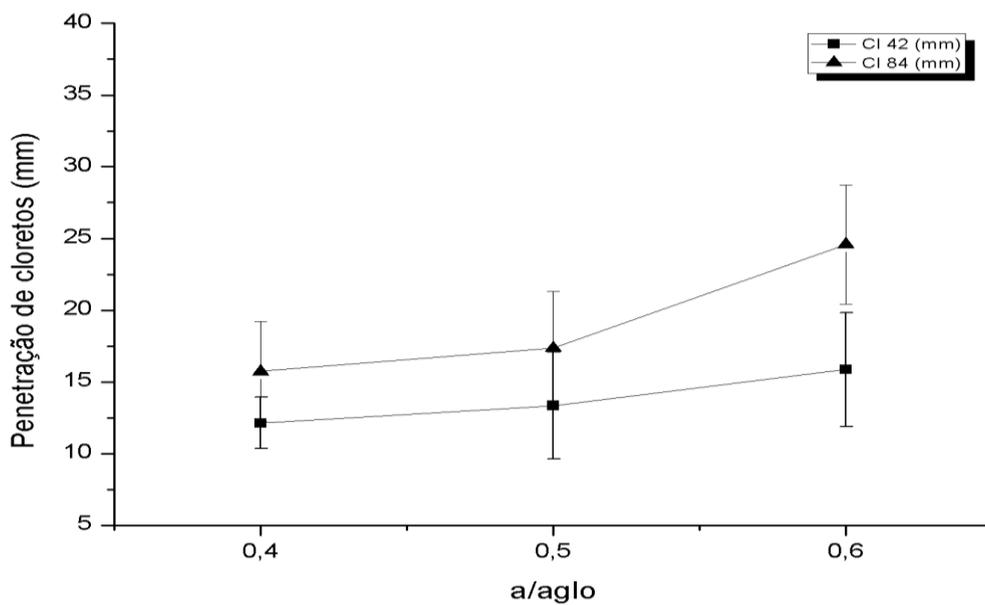
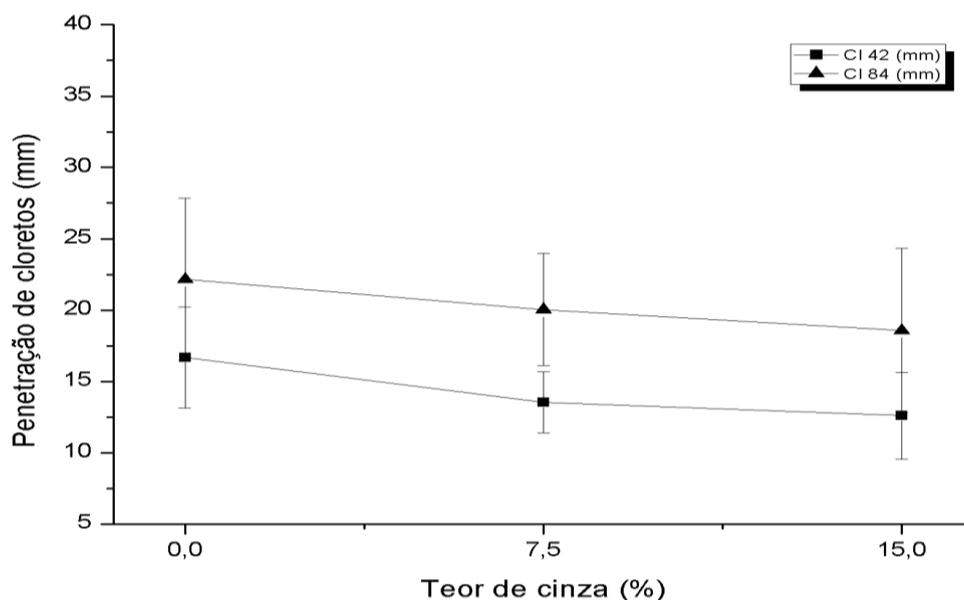


Figura 43 - Comportamento da penetração de cloreto, aos 42 dias e 84 dias, em concreto com CTP - II, em função do teor de cinza.



Analisando a Tabela 40, observa-se que todos os fatores influenciaram o comportamento da penetração de cloretos com exceção do fator tipo de cinza aos 84 dias que não influenciou e que aos 42 dias apresentou um valor próximo, porém inferior, a 5%. Isso significa que para essa variável as características que distinguem as cinzas não se diferenciam entre si, ou seja, o tipo da cinza não influencia no comportamento da penetração de cloretos. Já nas demais tabelas, observa-se que todos os fatores influenciaram significativamente a variável resposta, com exceção do teor de cinza na penetração de cloretos aos 84 dias em concretos com CTP - I. Através da Figura 40 e da Figura 42 observa-se que o aumento na relação a/aglo aumenta a penetração de cloretos nos concretos, uma vez que concretos com elevadas relações a/aglo tendem a ser mais porosos, facilitando a entrada do íon e o aumento no teor de cinza, observados na Figura 41 e Figura 43, diminui o valor da penetração de cloretos, observando essa tendência inclusive para a penetração aos 84 dias do concreto com CTP - I, cuja variável não influenciou significativamente.

Os resultados de penetração de cloretos apresentam o mesmo padrão de comportamento dos resultados de absorção de água do concreto, uma vez que os gráficos apresentam uma diminuição nos resultados obtidos, à medida que aumentou-se o teor de cinza.

Além disso, os resultados apresentados corroboram com Simcic *et al.* (2015) em que os autores analisaram cinzas semelhantes a CTP - I e CTP - II e observaram que, em todos os casos, a penetração de cloretos por semiciclos de imersão e secagem foram menores em

concretos com cinzas. Comparando as duas cinzas analisadas pelos autores, os mesmos concluíram que a cinza com menor teor de CaO apresentou o melhor desempenho, semelhante ao traço com 0,4 - 15 de CTP - II que obteve o menor valor de penetração.

As conclusões apresentadas por Chindapasirt *et al.* (2007) e Liu *et al.* (2016) corroboram com os resultados apresentados, pois, nos trabalhos desses autores o aumento no teor de cinza no concreto diminuiu a penetração de cloretos nos corpos de provas analisados.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

### 5.1 Conclusões

Pode-se concluir o grande potencial de utilização da cinza CTP – I na produção de concreto simples e armado, mesmo sem atender à todos os requisitos químicos da NBR 12.653 (ABNT, 2014) e mesmo tendo apresentando um elevado teor de  $SO_3$  na sua composição.

A cinza CTP – II, que atende a todos os requisitos químicos e físicos exigidos pela NBR 12.653 (ABNT, 2014), também apresentam grande potencial de utilização na produção de concreto simples e armado.

Em virtude das análises e discussões dos resultados sobre os ensaios realizados nas cinzas, nas argamassas e nos concretos, pode-se concluir que:

- Para as argamassas produzidas com as cinzas CTP – I e CTP – II observou-se uma diminuição da trabalhabilidade da argamassa com o aumento do teor de cinza volante. Nos concretos, para que se mantivesse o valor do *slump* estabelecido, fez-se necessário a utilização de aditivo plastificante, cujo o consumo aumentos à medida que aumentou-se o teor de cinza volante no concreto.
- O concreto com a cinza CTP - II apresentou valores de resistência à compressão acima de 40 MPa, para os traços com a/aglo de 0,4. Já nos concretos com CTP - I observou-se redução da resistência à compressão nos traços com 15% de cinza, entretanto, a cinza CTP – I pode ser utilizada no teor de 7,5%, caso queira-se obter maiores valores de resistência à compressão, em relação ao concreto de referência. No geral, os teores de 7,5% e 15% apresentam grande potencial de utilização, pois a maioria dos concretos com cinza apresentaram valores de resistência à compressão acima de 30MPa, aos 91 dias.
- No que tange a durabilidade do concreto, observou-se que os traços com cinza de CTP – I e CTP - II, na maioria dos casos, apresentaram um desempenho em relação ao concreto de referência. Os traços com as menores relações a/aglo e os maiores consumos de cinza, em geral, apresentaram os menores valores para os ensaios de absorção de água e penetração de cloretos.

- Além da viabilidade técnica há também o desenvolvimento sustentável promovido pela utilização das cinzas, uma vez que ocorre a reciclagem do resíduo e a diminuição no consumo de cimento Portland.

## 5.2 Sugestões de trabalhos futuros

Uma das preocupações dessa pesquisa se deu no alto teor de  $\text{SO}_3$  presente na cinza CTP - I, o que suscitou dúvidas sobre a viabilidade técnica dessa cinza no concreto, além disso há também o fator da representatividade da amostra e da variabilidade do carvão e dos processos até a geração da cinza. Portanto, algumas propostas para continuidade da pesquisa são:

- Analisar quais variáveis mais influenciam no comportamento químico e físico da cinza, tais como: temperatura de queima, tipo de carvão mineral, processo de captação da cinza, dentre outros;
- Analisar a viabilidade técnica de cinzas com características químicas e físicas distintas, verificando a potencialidade na utilização de argamassa e/ou concreto; e
- Analisar a viabilidade financeira na substituição de cimento Portland por cinza volante, considerando o teor ótimo dentro das margens de segurança, além dos custos no processo de utilização da cinza como controle tecnológico, processamento das cinzas, transportes, dentre outros.

**REFERÊNCIAS**

- ACI COMMITTEE 201, GUIDE TO DURABLE CONCRETE. **ACI Manual of Concrete Practice**. ACI. Farmington Hills, p. 41. 2002.
- AHMARUZZAMAN, M. A review on the utilization of fly ash. **Progress in Energy and Combustion Science**, p. 327-363, 2009.
- ALONSO, J. L.; WESCHE, K. Characterization of fly ash. Fly ash in concrete: properties and performance. **RILEM**, p. 3-23, 1991.
- AMERICAS SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **C618 - 12a**. West Conshohocken, p. 5. 2012.
- ANDRADE, J. J. O.; TUTIKIAN, B. F. Resistência Mecânica do Concreto. In: ISAIA, G. C. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. São Paulo: Ibracon, 2011. p. 615 - 651.
- ANTIOHOS, S.; TSIMAS, S. Activation of fly ash cementitious system in the presence of quicklime. Part I. Compressive strength and pozzolanic reaction rate. **Cement and Concrete Research**, p. 769-779, May 2004.
- ARAÚJO, J. M. O módulo de deformação longitudinal no concreto. **Teoria e Prática na Engenharia**, p. 9-16, 2000.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Preparo da mistura e determinação do índice de consistência**. Rio de Janeiro. 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5736: Cimento Portland Pozolânico**. Rio de Janeiro. 1991.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 137: Argamassa e concreto - Água para amassamento e cura de argamassa e concreto de cimento portland**. Rio de Janeiro. 1997.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 67: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento de tronco de cone**. Rio de Janeiro. 1998.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 67: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone**. Rio de Janeiro. 1998.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 24: Materiais pozolânicos - Determinação do teor de umidade**. Rio de Janeiro. 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 25: Materiais pozolânicos - Determinação do teor de álcalis disponíveis**. Rio de Janeiro. 2003.

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004: Resíduos Sólidos - Classificação**. Rio de Janeiro. 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10005: Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduo sólido**. Rio de Janeiro. 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10006: Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos**. Rio de Janeiro. 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos**. Rio de Janeiro. 2007.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739: Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos**. Rio de Janeiro. 2007.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8522: Concreto - Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão**. Rio de Janeiro. 2008.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9833: Concreto fresco - Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico**. Rio de Janeiro. 2008.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Agregados para concreto - Especificação**. Rio de Janeiro. 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9778: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica**. Rio de Janeiro. 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15894-3: Metacaulim para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta. Parte 3: Determinação da finura por meio da peneira 45 µm**. Rio de Janeiro. 2010.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7222: Concreto e argamassa - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro. 2011.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7222: Concreto e argamassa - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos**. Rio de Janeiro. 2011.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10342: Concreto - Perda de abatimento - Método de ensaio**. Rio de Janeiro. 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8802: Concreto endurecido - Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica**. Rio de Janeiro. 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 16: Cimento Portland - Análise química - Determinação de anidrido sulfúrico**. Rio de Janeiro. 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 18: Cimento Portland - Análise química - Determinação de perda ao fogo.** Rio de Janeiro. 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 22: Cimento Portland com adições de materiais pozolânicos - Análise química - Método de arbitragem.** Rio de Janeiro. 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575 - 1. Edificações habitacionais - Desempenho - Parte 1: Requisitos gerais.** Rio de Janeiro. 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653: Materiais Pozolânicos - Requisitos.** Rio de Janeiro. 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5752: Materiais pozolânicos - Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias.** Rio de Janeiro. 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5751: Materiais pozolânicos - Determinação da atividade pozolânica com cal aos sete dias.** Rio de Janeiro. 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do índice de consistência.** Rio de Janeiro. 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Concreto - Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão.** Rio de Janeiro. 2017.

AZEVEDO, A. F. F. L. C. D. **BETÕES DE ELEVADO DESEMPENHO COM INCORPORAÇÃO DE CINZAS VOLANTES.** UNIVERSIDADE DO MINHO. GUIMARÃES, p. 487. 2002.

BENTZ, D. P.; JONES, S. Z.; SNYDER, K. A. Design and performance of ternary blend high-volume fly ash concretes of moderate slump. **Construction and Building MATERIALS**, Gaithersburg, p. 409-415, Março 2015.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION. **Mixing water for concrete. Specification for sampling, testing and assessing the suitability of water, including water recovered from processes in the concrete industry, as mixing water for concrete.** [S.I.]. 2002.

BUI, P. T. et al. A study on pozzolanic reaction of fly ash cement paste activated by an injection of alkali solution. **Construction and Building MATERIALS**, p. 28-34, Julho 2015.

CABRAL, A. E. B. **Avaliação da eficiência de sistemas de reparo no combate à iniciação e à propagação da corrosão do aço induzida por cloretos.** Porto Alegre. 2000.

CARVALHO, J. **Análise do ciclo de vida ambiental aplicada a construção civil - Estudo de caso: comparação de cimento portland com adição de resíduos.** Universidade de São Paulo (USP). São Paulo. 2002.

- CHENG, S. et al. Effects of fly ash, blast furnace slag and metakaolin on mechanical properties and durability of coral sand concrete. **Applied Clay Science**, p. 111-117, 2017.
- CHIES, F.; SILVA, N. I. W.; ZWONOK, O. Desenvolvimento de blocos e tijolos a partir de cinzas de fundo de carvão - CIPECAL. In: ROCHA, J. C.; JOHN, V. M. **Utilização de Resíduos na Construção Habitacional**. Porto Alegre: Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído - ANTAC, v. 4, 2003. p. 272.
- CHINDAPRASIRT, P. et al. Influence of fly ash fineness on the chloride penetration of concrete. **Construction and Building Materials**, p. 356 - 361, 2007.
- CHINDAPRASIRT, P.; HOMWUTTIWONG, S.; SIRIVIVATNANON, V. INFLUENCE OF FLY ASH FINENESS ON STRENGTH, DRYING SHRINKAGE AND SULFATE RESISTANCE OF BLENDED CEMENT MORTAR. **Cement and Concrete Research**, p. 1087 - 1092, 2004.
- CHOUSIDIS, N. et al. mechanical properties and durability performance of reinforced concrete containing fly ash. **Construction and Building MATERIALS**, p. 810-817, 2015.
- CINCOTTO, M. A. Reações de Hidratação e Pozolânicas. In: ISAIA, G. C. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. 1ª. ed. São Paulo: IBRACON, v. I, 2011. Cap. 11, p. 381-413.
- CONCRETE SOCIETY. **Permeability testing of site concrete, Report TR31**. London. 2008.
- DAKHANE, A. et al. Mechanical and microstructural characterization of alkali sulfate activated high volume fly ash binders. **Materials and Design**, p. 236-246, 2017.
- DAL MOLIN, D. C. C. Adições Minerais. In: ISAIA, G. C. **CONCRETO: CIÊNCIA E TECNOLOGIA**. 1ª. ed. São Paulo: IBRACON, v. I, 2011. Cap. 8, p. 261-309.
- DNPM - DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL. **Sumário Mineral 2014**. Ministério de Minas e Energia. Brasília, p. 152. 2014. (ISSN 0101-2053).
- DURDZIŃSKIA, P. T. et al. A new quantification method based on SEM-EDS to assess fly ash composition and study the reaction of its individual components in hydrating cement paste. **Cement and Concrete Research**, p. 111-122, 2015.
- EVANGELISTA, A. C. J. **Avaliação da resistência do concreto usando diferentes ensaios não destrutivos**. UFRJ. Rio de Janeiro. 2002.
- FARIA, E. F. **Predição da exotermia da reação de hidratação do concreto através de modelos termo-químico e modelo de dados**. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, p. 145. 2004.
- FGV PROJETOS, LCA CONSULTORIA. Brasil 2022: Planejar, Construir, Crescer. **Construbusiness**, São Paulo, n. 9, 2010.
- FIGUEIREDO, E. P. Ação dos Cloretos no Concreto. In: ISAIA, G. C. **CONCRETO: CIÊNCIA E TECNOLOGIA**. São Paulo: IBRACON, 2011. p. 887 - 901.

- GAVA, G. P. **Estudo comparativo de diferentes metodologias para avaliação da atividade pozolânica**. Florianópolis. 1999.
- GRIFFITHS, A. A. **The theory of rupture and flow in solids**. London. 1920.
- HEMALATHA, T.; RAMASWAMY, A. A review on fly ash characteristics - Towards promoting high volume utilization in developing sustainable concrete. **Journal of Cleaner Production**, p. 546-559, 2017.
- HOPPE FILHO, J. **Sistemas cimento, cinza volante e cal hidratada: Mecanismo de hidratação, microestrutura e carbonatação do concreto**. Universidade de São Paulo. São Paulo. 2008.
- IEA/WBCSD. **Cement technology roadmap: carbon emissions reduction up to 2050**. (OECD/IEA/WBCSD). [S.l.]. 2009.
- IKOTUN, B. D.; FANOURAKIS, G. C.; BHARDWAJ, S. M. The effect of fly ash,  $\beta$ -cyclodextrin and fly ash- $\beta$ -cyclodextrin composites on concrete workability and strength. **Cement and Concrete Composites**, p. 1-12, 2016.
- ISAIA, G. C. **Efeito de mistura binárias e ternárias de pozolanas em concreto de elevado desempenho: um estudo de durabilidade com vistas à corrosão da armadura**. SÃO PAULO. 1995.
- ISAIA, G. C.; GASTALDINI, A. L. G. Perspectivas ambientais e econômicas do concreto com altos teores de adições minerais: um estudo de caso. **Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 4, n. 2, p. 19-30, agosto 2004. ISSN 1415-8876.
- ITSKOS, G.; ITSKOS, S.; KOUKOUZAS, N. Size fraction characterization of highly-calcareous fly ash. **Fuel Processing Technology**, p. 1558-1563, 2010.
- JALAL, M. et al. Comparative study on effects of Class F fly ash, nano silica and silica fume on properties of high performance self compacting concrete. **Construction and Building MATERIALS**, p. 90-104, 2015.
- KABAY, N. et al. Properties of concrete with pumice powder and fly ash as cement replacement materials. **Construction and Building MATERIALS**, Istanbul, p. 1-8, Março 2015.
- KHATIB, J. M.; MANGAT, P. S.; WRIGHT, L. Mechanical and physical properties of concrete containing FGD waste. **MAGAZINE OF CONCRETE RESEARCH**, p. 550-560, 2016.
- KIM, J. H.; NOEMI, N.; SHAH, S. P. Effect of powder materials on the rheology and formwork pressure of self-consolidating concrete. **Cement and Concrete Research**, p. 746-753, 2012.

- LAWRENCE, P.; CYR, M.; RINGOT, E. Mineral admixture in mortars. Effect of inert materials on short-term hydration. **Cement and Concrete Research**, v. 33, n. 12, p. 1939 - 1947, Dezembro 2003.
- LEE, C. Y.; LEE, H.; LEE, K. Strength and microstructural characteristics of chemically activated fly ash-cement systems. **Cement and Concrete Research**, p. 425-431, 2003.
- LIMBACHIYA, V.; GANJIAN, E.; CLAISSE, P. The impact of variation in chemical and physical properties of PFA and BPD semi-dry cement paste on strength properties. **Construction and Building MATERIALS**, Coventry, p. 248-255, Agosto 2015.
- LIN, B.; ANKRAH, I.; MANU, S. A. Brazilian energy efficiency and energy substitution: A road to cleaner national energy system. **Cleaner Production**, p. 1275-1284, 2017.
- LIU, J. et al. Degradation of fly ash concrete under the coupled effect of carbonation and chloride aerosol ingress. **Corrosion Science**, p. 364-372, 2016.
- MARTINS, J. L. **Aproveitamento de cinza de carvão mineral na agricultura**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2001.
- MEDEIROS, A. **Aplicação do ultra-som na estimativa da profundidade de fendas superficiais e na avaliação da eficácia de injeções em elementos de concreto armado**. Santa Catarina. 2007.
- MEHTA, P. K.; AITCIN, J. C. Principles underlying production of high-performance concrete. **Cement & Concrete Aggregates**, Philadelphia, p. 70-78, 1990.
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. CONCRETO. Microestrutura, propriedades e materiais. **IBRACON**, 2008.
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. Micro estrutura do concreto. In: MONTEIRO, P. K. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 2ª. ed. São Paulo: IBRACON, v. I, 2014. Cap. 2, p. 782.
- MEJÍA, J. M. et al. Preparation and characterization of a hybrid alkaline binder based on a fly ash with no commercial value. **Construction and Building MATERIALS**, Cali, p. 346-352, Maio 2015.
- MONTEIRO, E. C. B. **Estudo da capacidade de proteção de alguns tipos de cimentos nacionais, em relação à corrosão de armaduras sob ação conjunta de CO<sub>2</sub> e íons cloretos**. Brasília. 1996.
- MONTEIRO, E. C. B. **Avaliação do método de extração eletroquímica de cloretos para reabilitação de estruturas de concreto com problemas de corrosão de armaduras**. SÃO PAULO. 2002.
- NEVILLE, A. M. Chloride Attack of Reinforced Concrete: An Overview. **Materials and Structures**, v. 28, p. 63-70, 1995.
- NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. São Paulo: Pini, 1997.

NOGUEIRA, C. L.; WILLAN, K. Ultrasonic testing of damage in concrete. **ACI Materials Journal**, 2001.

ONER, A.; AKYUZ, S.; YILDIZ, R. An experimental study on strenght development of concrete containing fly ash and optimum usage of fly ash in concrete. **Cement and Concrete Research**, p. 1165 - 1171, 2004.

PONIKIEWSKI, T.; GOLASZEWSKI, J. The influence of high-falcium fly ash on the properties of fresh and hardened self-compacting concrete and high performance self-compacting concrete. **Journal of Cleaner Production**, p. 212-221, 2014.

POON, C. S.; LAM, L.; WOONG, Y. L. A study on high strength concrete prepared with large volumes of low calcium fly ash. **Cement and Concrete Research**, v. 30, p. 447-455, 2000.

RINCÓN, O. T. et al. Manual de inspeccion, evaluacion y diagnostico de corrosion em estruturas de hormigon armado. **DURAR: Red Temática XV. B Durabilidad de la Armadura - Programa Iberoamericano de Ciência y Tecnologia para el desarrollo**, 1998.

RODRIGUES, L. L. M. **ANÁLISE DE VARIÂNCIA EM SÉRIES TEMPORAIS: UMA ABORDAGEM USANDO ONDALETAS**. LAVRAS. 2015.

ROMANO, R. C. O.; CARDOSO, F. A.; PILEGGI, R. G. Propriedades do Concreto no Estado Fresco. In: ISAIA, G. C. **CONCRETO: CIÊNCIA E TECNOLOGIA**. São paulo: IBRACON, 2011. p. 453-500.

SANTHIJUMAR, S. **Temperature dependent heat generation model for mixed cement concrete with mutual interactions among consituent minerals**. University of Tokyo. Tokyo. 1993.

SCHNEIDER, J. A. **Penetração de Cloretos em concretos com escória de alto forno e ativador químico submetidos a diferentes períodos de cura**. UFSM. Santa Maria. 2005.

SENGUL, O.; TASDEMIR, C.; TASDEMIR, M. A. Mechanical Properties and Rapid Chloride Permeability of Concretes with Ground Fly Ash. **ACI MATERIALS JOURNAL**, p. 414-421, 2005.

SHAIKH, F. U. A.; SUPIT, S. W. M. Compressive strength and durability properties of high volume fly ash (HFVA) concretes containing ultrafine fly ash (UFFA). **Construction and Building MATERIALS**, Perth, p. 192-205, Março 2015.

SILVA, N. I. W. et al. Caracterização de cinzas volantes para aproveitamento cerâmico. **Cerâmica**, São Paulo, v. 45, n. 296, Novembro/Dezembro 1999. ISSN 1678-4533.

SIMCIC, T. et al. Chloride ion penetration into fly ash modified concrete during wetting-drying cycles. **Construction and Building Materials**, p. 1216-1223, 2015.

SNIC - SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO. Rio de Janeiro. 2013.

- TUTIKIAN, B. F.; ISAIA, G. C.; HELENE, P. R. L. Concreto de Alto e Ultra-Alto Desempenho. In: ISAIA, G. C. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. 1ª. ed. São Paulo: IBRACON, v. II, 2011. Cap. 36, p. 1283-1325.
- USMEN, M.; ANDERSON, D. A.; MOULTON, L. K. Applicability of conventional test methods and materials specifications to coal-associated waste aggregates. **Transport Research Record**, n. 691, p. 49-57, 1978.
- VARGAS, J.; HALOG, A. Effective carbon emission reductions from using upgraded fly ash in the cement industry. **Construction and Building MATERIALS**, Brisbane, p. 948-959, Abril 2015.
- WALLER, V. **Relations entre Composition des Betons, Exothermie en Cours de Prise et Resistance en Compression**. École Nationale des Ponts et Chaussées. França. 1999.
- WANG, A.; ZHANG, C.; SUN, W. Fly ash effects: II. The active effect of fly ash. **CEMENT and CONCRETE RESEARCH**, v. 34, p. 2057-2060, November 2004a.
- WANG, A.; ZHANG, C.; SUN, W. Fly ash effects III. The microaggregate effect of fly ash. **CEMENT and CONCRETE RESEARCH**, Nanjing, n. 34, p. 2061-2066, November 2004c.
- WANG, W. et al. Effects of pore water saturation on the mechanical properties of fly ash concrete. **Construction and Building Materials**, p. 54-63, 2017.
- WANG, X. Y.; PARK, K. B. Analysis of compressive strength development of concrete containing high volume fly ash. **Construction and Building Materials**, p. 810-819, 2015.
- WANKHEDE, P. R.; FULARI, V. A. Effect of fly ash on properties of concrete. **International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering**, p. 284-289, 2014.
- WHITEHURST, E. A. Evaluation of concrete properties form Sonic test. **American Concrete Institute**, p. 84, 1966.
- WHITEHURST, E. A. Evaluation of concrete properties form sonic tests. **American Concrete Institute**, 1996.
- WORRELL, E. et al. Carbon Dioxide Emissions From the Global Cement Industry. **Annual Review Energy and the Environment**, p. 303-329, 2001.
- YILMAZ, H. Characterization and comparison of leaching behaviors of fly ash samples form three different power plants in Turkey. **Fuel Processing Technology**, p. 240-249, Abril 2015.
- YU, Y.; YU, J.; GE, Y. Water and chloride permeability research on ordinary cement mortar and concrete with compound admixture and fly ash. **Construction and Building Materials**, p. 556 - 564, 2016.

ZHANG, Y. M.; SUN, W.; YAH, H. D. Hydration of high-volume flw ash cement pastes.  
**Cement & Concrete Composites**, v. 22, p. 445 - 452, December 2000.

**APÊNDICE A - ENSAIO DA PERDA DE ABATIMENTO DE ACORDO COM A NBR  
10.342 (ABNT, 2012).**

<b>Ensaio de abatimento da argamassa com CTP I</b>					
<b>TRAÇO</b>	<b>Horário (h)</b>	<b>RESULTADOS (mm)</b>			<b>MÉDIA (mm)</b>
0,4 - REF	11h12	198,30	209,45	206,10	<b>204,62</b>
	11h27	205,70	202,20	204,75	<b>204,22</b>
	11h45	200,25	198,80	195,85	<b>198,30</b>
	12h00	188,80	195,70	184,65	<b>189,72</b>
	12h16	183,80	186,60	183,10	<b>184,50</b>
0,4 - 7,5%	13h30	196,70	190,50	189,70	<b>192,30</b>
	13h45	191,75	186,50	196,10	<b>191,45</b>
	14h00	177,55	183,15	175,50	<b>178,73</b>
	14h18	177,90	173,05	175,40	<b>175,45</b>
	14h33	168,85	163,70	173,50	<b>168,68</b>
0,4 - 15%	14h56	190,20	188,35	195,05	<b>191,20</b>
	15h11	186,65	190,80	189,70	<b>189,05</b>
	15h26	188,90	187,65	188,35	<b>188,30</b>
	15h42	180,80	180,40	178,00	<b>179,73</b>
	15h57	178,30	175,75	180,15	<b>178,07</b>
0,5 - REF	13h15	262,45	261,45	264,50	<b>262,80</b>
	13h31	264,80	258,05	252,20	<b>258,35</b>
	13h46	250,35	250,90	250,80	<b>250,68</b>
	14h02	236,80	241,20	246,00	<b>241,33</b>
	14h17	222,65	232,95	234,60	<b>230,07</b>
0,5 - 7,5%	14h30	203,50	207,55	200,60	<b>203,88</b>
	14h45	204,30	196,20	207,90	<b>202,80</b>
	15h00	188,55	193,05	196,20	<b>192,60</b>
	15h15	177,80	190,15	186,70	<b>184,88</b>
	15h32	183,45	176,60	178,00	<b>179,35</b>
0,5 - 15%	15h45	223,70	220,75	222,90	<b>222,45</b>
	16h00	223,20	213,30	212,70	<b>216,40</b>
	16h15	208,65	213,05	208,40	<b>210,03</b>
	16h30	202,25	202,45	203,15	<b>202,62</b>
	16h46	195,70	189,90	188,65	<b>191,42</b>
0,6 - REF	14h00	280,35	279,85	275,20	<b>278,47</b>
	14h15	277,10	267,15	272,00	<b>272,08</b>
	14h30	249,15	254,00	256,60	<b>253,25</b>
	14h46	231,75	242,05	236,70	<b>236,83</b>
	15h02	227,95	231,60	225,20	<b>228,25</b>
0,6 - 7,5%	15h15	248,95	262,70	250,65	<b>254,10</b>
	15h30	246,90	246,00	249,70	<b>247,53</b>
	15h47	244,85	249,00	242,55	<b>245,47</b>
	16h03	236,00	227,50	233,70	<b>232,40</b>
	16h18	222,60	225,35	231,00	<b>226,32</b>

0,6 - 15%	10h03	248,90	237,85	242,50	<b>243,08</b>
	10h18	239,80	237,00	240,15	<b>238,98</b>
	10h35	233,95	230,75	235,50	<b>233,40</b>
	10h50	229,85	230,40	232,05	<b>230,77</b>
	11h05	225,50	220,90	223,55	<b>223,32</b>
<b>Ensaio de abatimento da argamassa com CTP - II</b>					
<b>TRAÇO</b>	<b>Horário (h)</b>	<b>RESULTADOS (mm)</b>			<b>MÉDIA (mm)</b>
0,4 - REF	12h20	257,60	255,65	266,35	<b>259,87</b>
	12h35	252,70	252,05	255,80	<b>253,52</b>
	12h52	248,10	255,40	256,25	<b>253,25</b>
	13h10	236,90	237,65	241,85	<b>238,80</b>
	13h26	223,70	218,50	232,45	<b>224,88</b>
0,4 - 7,5%	14h25	245,70	248,20	245,80	<b>246,57</b>
	14h42	244,75	245,30	241,00	<b>243,68</b>
	14h58	226,70	223,05	224,65	<b>224,80</b>
	15h15	220,50	221,60	219,10	<b>220,40</b>
	15h30	216,45	220,00	218,70	<b>218,38</b>
0,4 - 15%	15h46	219,55	216,50	222,95	<b>219,67</b>
	16h03	207,25	212,70	217,85	<b>212,60</b>
	16h18	199,50	200,45	200,75	<b>200,23</b>
	16h35	195,10	193,60	193,05	<b>193,92</b>
	16h51	178,05	177,10	178,35	<b>177,83</b>
0,5 - REF	12h09	258,75	262,50	263,80	<b>261,68</b>
	12h25	245,50	254,15	247,45	<b>249,03</b>
	12h41	240,65	246,05	237,20	<b>241,30</b>
	12h58	233,90	230,60	231,80	<b>232,10</b>
	13h14	221,35	224,30	219,90	<b>221,85</b>
0,5 - 7,5%	15H50	254,05	261,35	255,15	<b>256,85</b>
	16H07	244,10	261,90	244,75	<b>250,25</b>
	16H23	240,20	238,55	235,95	<b>238,23</b>
	16H40	234,90	231,80	236,60	<b>234,43</b>
	16H56	227,40	228,00	225,50	<b>226,97</b>
0,5 - 15%	14H28	219,90	224,90	222,75	<b>222,52</b>
	14H44	222,70	221,00	223,40	<b>222,37</b>
	15H	213,20	217,10	211,30	<b>213,87</b>
	15H15	213,45	211,20	212,50	<b>212,38</b>
	15H32	198,20	193,75	202,90	<b>198,28</b>
0,6 - REF	10H28	305,30	318,00	306,00	<b>309,77</b>
	10H45	286,60	292,35	288,20	<b>289,05</b>
	11H	280,06	282,70	286,40	<b>283,05</b>
	11H16	270,80	278,20	275,95	<b>274,98</b>
	11H33	251,80	253,75	250,90	<b>252,15</b>
0,6 - 7,5%	14H08	277,20	276,10	287,20	<b>280,17</b>
	14H25	264,65	261,45	256,50	<b>260,87</b>
	14H40	254,25	259,00	253,55	<b>255,60</b>

	14H56	247,00	250,00	240,25	<b>245,75</b>
	15H12	247,20	232,65	236,30	<b>238,72</b>
0,6 - 15%	15H35	270,30	269,65	275,00	<b>271,65</b>
	15H50	269,00	267,20	260,35	<b>265,52</b>
	16H06	253,05	258,90	253,75	<b>255,23</b>
	16H22	246,55	247,80	251,50	<b>248,62</b>
	16H37	232,60	239,45	234,20	<b>235,42</b>

## APÊNDICE B - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO, TRAÇÃO, VPU E ABSORÇÃO DOS CONCRETOS.

Tipo de cinza	a/aglo	teor de cinza	$f_{c3}$ (MPa)	$f_{c7}$ (MPa)	$f_{c28}$ (MPa)	$f_{c91}$ (MPa)	$f_{t28}$ (MPa)	VPU (km/s)	Abs (%)
CTP - I	0,4	0	29,10	31,17	33,61	52,23	4,28	5,21	2,31
CTP - I	0,4	0	26,82	35,72	33,69	49,20	3,06	5,40	4,12
CTP - I	0,4	7,5	29,06	26,48	51,81	48,66	3,15	5,31	3,26
CTP - I	0,4	7,5	23,78	25,96	42,27	55,94	3,42	5,38	3,16
CTP - I	0,4	15	17,61	16,01	35,12	37,52	2,93	6,04	4,05
CTP - I	0,4	15	17,20	16,61	26,06	39,97	3,20	5,96	4,43
CTP - I	0,5	0	20,66	25,21	35,40	38,92	2,95	4,44	3,79
CTP - I	0,5	0	22,85	23,53	36,00	40,02	3,25	4,48	4,21
CTP - I	0,5	7,5	16,20	25,95	36,08	40,37	3,00	4,43	3,64
CTP - I	0,5	7,5	17,58	25,63	35,71	44,24	2,67	4,39	3,74
CTP - I	0,5	15	14,51	17,75	29,38	32,37	2,81	5,64	2,19
CTP - I	0,5	15	13,24	23,81	26,29	32,72	2,67	5,63	2,79
CTP - I	0,6	0	19,95	22,80	24,71	25,52	2,62	4,89	4,21
CTP - I	0,6	0	13,11	15,06	22,97	26,78	2,65	4,95	4,28
CTP - I	0,6	7,5	18,78	22,37	26,64	35,03	2,97	5,00	3,37
CTP - I	0,6	7,5	18,00	22,83	30,42	34,23	2,87	4,77	3,60
CTP - I	0,6	15	16,33	20,75	27,72	32,88	3,03	4,95	3,75
CTP - I	0,6	15	18,22	22,64	27,06	33,46	2,28	4,89	3,59
CTP - II	0,4	0	27,02	36,92	41,04	46,78	3,50	5,12	2,74
CTP - II	0,4	0	28,46	33,22	41,74	46,96	3,72	5,13	2,69
CTP - II	0,4	7,5	36,12	42,04	50,66	50,60	3,66	5,10	2,41
CTP - II	0,4	7,5	33,86	38,71	48,17	52,88	3,50	5,09	2,45
CTP - II	0,4	15	30,21	35,77	43,05	54,94	3,69	5,17	2,02
CTP - II	0,4	15	27,20	38,49	43,32	40,90	4,39	5,15	2,13
CTP - II	0,5	0	25,76	32,43	35,58	38,93	3,74	5,17	3,11
CTP - II	0,5	0	27,54	30,04	35,54	34,01	3,47	5,12	2,98
CTP - II	0,5	7,5	21,25	29,53	32,54	33,24	2,90	5,14	2,88
CTP - II	0,5	7,5	24,27	29,31	35,57	39,72	2,98	5,10	2,56
CTP - II	0,5	15	26,43	31,95	36,95	46,11	3,63	5,18	2,49
CTP - II	0,5	15	22,87	30,44	35,19	32,71	3,23	5,13	2,17

CTP - II	0,6	0	16,30	17,60	27,95	26,73	2,80	5,10	3,24
CTP - II	0,6	0	18,21	20,50	24,32	34,05	2,74	5,09	3,46
CTP - II	0,6	7,5	13,87	21,94	27,88	26,54	2,96	5,11	3,08
CTP - II	0,6	7,5	15,23	18,88	25,91	27,78	2,93	5,13	2,68
CTP - II	0,6	15	13,20	17,93	25,58	26,62	2,99	5,16	2,75
CTP - II	0,6	15	12,08	19,80	24,27	28,64	2,83	5,14	2,63

### APÊNDICE C - MÓDULO DE ELASTICIDADE DOS CONCRETOS.

Tipo de cinza	a/aglo	teor de cinza	Ec28 (GPa)
CTP- I	0,4	0	32,33
CTP - I	0,4	0	32,83
CTP - I	0,4	0	31,49
CTP - I	0,4	7,5	31,30
CTP - I	0,4	7,5	32,07
CTP - I	0,4	7,5	30,49
CTP- I	0,4	15	29,90
CTP - I	0,4	15	28,29
CTP - I	0,4	15	32,66
CTP - I	0,5	0	34,33
CTP - I	0,5	0	32,75
CTP - I	0,5	0	35,35
CTP- I	0,5	7,5	33,81
CTP - I	0,5	7,5	34,08
CTP - I	0,5	7,5	33,68
CTP - I	0,5	15	29,04
CTP - I	0,5	15	30,67
CTP - I	0,5	15	30,19
CTP- I	0,6	0	30,46
CTP - I	0,6	0	27,94
CTP - I	0,6	0	32,49
CTP - I	0,6	7,5	28,36
CTP - I	0,6	7,5	29,43
CTP - I	0,6	7,5	29,18
CTP- I	0,6	15	31,72
CTP - I	0,6	15	32,16
CTP - I	0,6	15	31,50
CTP - II	0,4	0	29,57
CTP - II	0,4	0	29,93
CTP - II	0,4	0	30,02
CTP - II	0,4	7,5	30,59
CTP - II	0,4	7,5	33,16
CTP - II	0,4	7,5	31,32

CTP - II	0,4	15	33,62
CTP - II	0,4	15	33,51
CTP - II	0,4	15	33,39
CTP - II	0,5	0	30,78
CTP - II	0,5	0	32,15
CTP - II	0,5	0	30,56
CTP - II	0,5	7,5	34,05
CTP - II	0,5	7,5	36,83
CTP - II	0,5	7,5	32,11
CTP - II	0,5	15	33,85
CTP - II	0,5	15	33,60
CTP - II	0,5	15	32,40
CTP - II	0,6	0	28,49
CTP - II	0,6	0	30,85
CTP - II	0,6	0	31,28
CTP - II	0,6	7,5	26,86
CTP - II	0,6	7,5	31,04
CTP - II	0,6	7,5	27,90
CTP - II	0,6	15	30,78
CTP - II	0,6	15	26,38
CTP - II	0,6	15	27,16

#### APÊNDICE D - VALORES DA PENETRAÇÃO DE CLORETOS DOS CONCRETOS.

Tipo de cinza	a/aglo	teor de cinza	Cl <sub>42</sub> (mm)	T Cl <sub>84</sub> (mm)
CTP- I	0,4	0	13,50	15,00
CTP - I	0,4	0	10,65	17,00
CTP - I	0,4	0	11,20	15,45
CTP - I	0,4	0	15,70	19,00
CTP - I	0,4	0	12,90	16,70
CTP - I	0,4	0	13,50	13,20
CTP- I	0,4	0	15,05	12,30
CTP - I	0,4	0	16,00	17,50
CTP - I	0,4	0	14,20	13,00
CTP - I	0,4	0	11,00	14,56
CTP - I	0,4	0	13,60	14,20
CTP - I	0,4	0	14,95	19,50
CTP- I	0,4	0	16,85	18,70
CTP - I	0,4	7,5	14,00	16,40
CTP - I	0,4	7,5	14,37	12,50
CTP - I	0,4	7,5	7,20	12,30
CTP - I	0,4	7,5	17,10	8,95
CTP - I	0,4	7,5	8,45	12,20
CTP- I	0,4	7,5	11,30	12,00

CTP - I	0,4	7,5	10,45	15,75
CTP - I	0,4	7,5	16,50	12,60
CTP - I	0,4	7,5	9,45	19,85
CTP - I	0,4	7,5	10,50	21,80
CTP - I	0,4	7,5	17,70	14,85
CTP - I	0,4	7,5	8,20	16,70
CTP - I	0,4	7,5	10,50	18,60
CTP - I	0,4	7,5	10,20	17,60
CTP - I	0,4	7,5	9,00	16,00
CTP - I	0,4	7,5	15,95	17,00
CTP - I	0,4	15	7,10	16,40
CTP - I	0,4	15	13,50	16,20
CTP - I	0,4	15	7,20	17,40
CTP - I	0,4	15	19,40	9,00
CTP - I	0,4	15	8,45	18,20
CTP - I	0,4	15	11,30	14,25
CTP - I	0,4	15	12,80	10,00
CTP - I	0,4	15	14,90	20,10
CTP - I	0,4	15	9,45	15,85
CTP - I	0,4	15	11,00	16,80
CTP - I	0,4	15	17,70	14,65
CTP - I	0,4	15	8,20	11,75
CTP - I	0,4	15	10,50	12,55
CTP - I	0,4	15	10,20	12,00
CTP - I	0,4	15	9,50	17,50
CTP - I	0,4	15	16,55	17,00
CTP - I	0,4	15	18,00	18,80
CTP - I	0,4	15	9,50	19,10
CTP - I	0,4	15	9,30	11,00
CTP - I	0,5	0	16,85	22,30
CTP - I	0,5	0	20,70	21,40
CTP - I	0,5	0	18,95	19,80
CTP - I	0,5	0	15,00	17,20
CTP - I	0,5	0	13,50	24,80
CTP - I	0,5	0	14,90	15,50
CTP - I	0,5	0	16,70	20,60
CTP - I	0,5	0	17,45	19,30
CTP - I	0,5	0	19,40	17,20
CTP - I	0,5	0	14,80	18,40
CTP - I	0,5	0	19,95	14,75
CTP - I	0,5	0	12,20	12,45
CTP - I	0,5	0	14,20	16,45
CTP - I	0,5	0	15,95	25,80
CTP - I	0,5	0	14,80	18,15
CTP - I	0,5	0	21,20	22,35

CTP- I	0,5	0	17,30	16,95
CTP - I	0,5	0	13,70	17,15
CTP - I	0,5	0	16,40	20,40
CTP - I	0,5	0	10,75	18,50
CTP - I	0,5	7,5	26,60	16,70
CTP - I	0,5	7,5	18,30	16,00
CTP- I	0,5	7,5	15,60	19,70
CTP - I	0,5	7,5	10,00	15,10
CTP - I	0,5	7,5	8,00	15,85
CTP- I	0,5	7,5	9,60	14,00
CTP - I	0,5	7,5	7,30	21,65
CTP - I	0,5	7,5	12,20	17,55
CTP - I	0,5	7,5	13,55	22,00
CTP - I	0,5	7,5	14,40	13,50
CTP - I	0,5	7,5	28,45	20,60
CTP- I	0,5	7,5	20,10	24,50
CTP - I	0,5	7,5	11,40	17,50
CTP - I	0,5	7,5	14,65	14,80
CTP - I	0,5	7,5	20,55	20,10
CTP- I	0,5	7,5	19,50	19,50
CTP - I	0,5	7,5	5,80	18,00
CTP - I	0,5	7,5	6,20	14,15
CTP - I	0,5	7,5	8,70	24,45
CTP - I	0,5	15	9,00	17,05
CTP - I	0,5	15	8,30	16,85
CTP- I	0,5	15	10,40	21,80
CTP - I	0,5	15	9,65	22,80
CTP - I	0,5	15	12,50	18,80
CTP - I	0,5	15	9,35	15,25
CTP - I	0,5	15	10,40	19,80
CTP - I	0,5	15	10,70	14,15
CTP- I	0,5	15	7,90	13,10
CTP - I	0,5	15	18,00	24,50
CTP - I	0,5	15	20,00	22,45
CTP - I	0,5	15	15,00	20,00
CTP - I	0,5	15	10,30	13,80
CTP - I	0,5	15	14,30	11,35
CTP- I	0,5	15	8,70	14,80
CTP - I	0,5	15	7,65	22,80
CTP - I	0,5	15	12,00	20,95
CTP- I	0,5	15	19,80	15,25
CTP - I	0,5	15	13,75	12,45
CTP - I	0,5	15	14,10	19,85
CTP - I	0,6	0	16,85	17,80
CTP - I	0,6	0	20,70	21,50

CTP - I	0,6	0	18,95	19,35
CTP- I	0,6	0	15,00	25,40
CTP - I	0,6	0	18,50	29,80
CTP - I	0,6	0	14,90	26,15
CTP - I	0,6	0	16,70	24,00
CTP- I	0,6	0	17,45	30,00
CTP - I	0,6	0	19,40	21,10
CTP - I	0,6	0	23,00	18,80
CTP - I	0,6	0	19,95	22,00
CTP - I	0,6	0	17,00	28,05
CTP - I	0,6	0	19,20	29,75
CTP- I	0,6	0	15,95	35,00
CTP - I	0,6	0	19,00	28,70
CTP - I	0,6	0	21,20	31,30
CTP - I	0,6	0	17,30	16,80
CTP - I	0,6	0	18,70	22,20
CTP - I	0,6	0	16,40	24,00
CTP- I	0,6	0	17,50	19,00
CTP - I	0,6	7,5	18,50	19,80
CTP - I	0,6	7,5	15,00	27,20
CTP - I	0,6	7,5	13,75	24,00
CTP - I	0,6	7,5	15,60	17,80
CTP - I	0,6	7,5	21,40	23,00
CTP- I	0,6	7,5	16,10	26,60
CTP - I	0,6	7,5	15,95	24,50
CTP - I	0,6	7,5	23,45	17,50
CTP- I	0,6	7,5	18,70	13,80
CTP - I	0,6	7,5	17,50	19,85
CTP - I	0,6	7,5	14,50	30,95
CTP - I	0,6	7,5	15,90	32,70
CTP - I	0,6	7,5	12,45	23,45
CTP - I	0,6	7,5	15,40	26,30
CTP- I	0,6	7,5	19,35	21,85
CTP - I	0,6	7,5	19,65	21,35
CTP - I	0,6	7,5	18,90	25,10
CTP - I	0,6	7,5	14,00	26,00
CTP - I	0,6	7,5	15,50	28,15
CTP - I	0,6	15	19,90	26,70
CTP- I	0,6	15	21,35	19,65
CTP - I	0,6	15	17,50	23,20
CTP - I	0,6	15	12,00	25,80
CTP - I	0,6	15	16,70	30,00
CTP - I	0,6	15	13,50	19,80
CTP - I	0,6	15	15,15	25,00
CTP- I	0,6	15	14,10	21,00

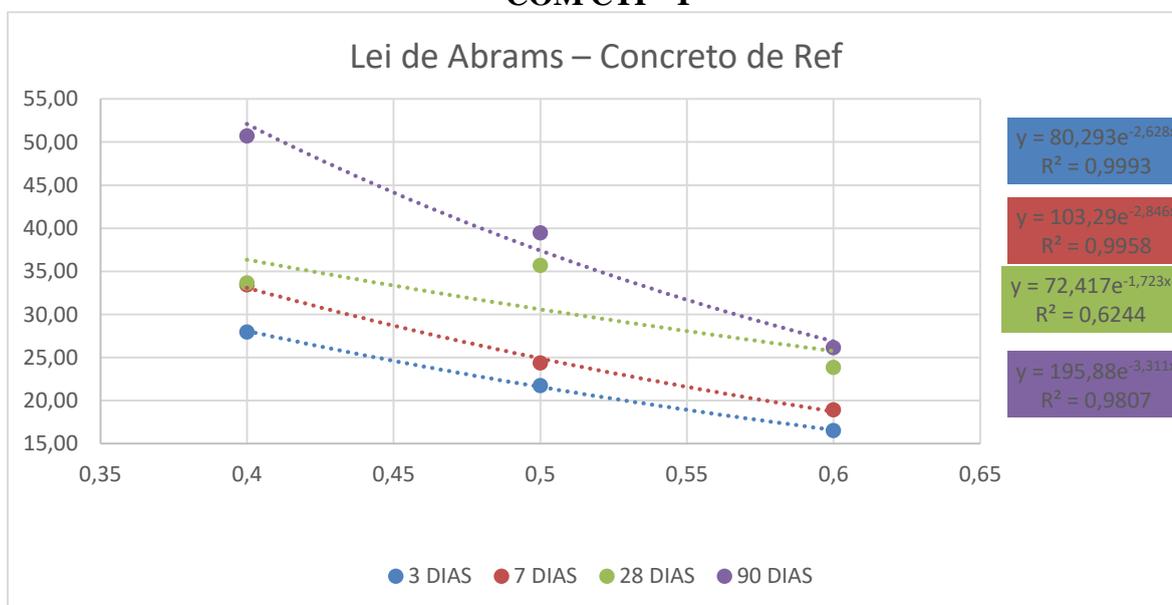
CTP - I	0,6	15	16,25	19,00
CTP - I	0,6	15	17,50	24,50
CTP - I	0,6	15	18,80	22,80
CTP - I	0,6	15	21,30	19,00
CTP - I	0,6	15	16,10	23,00
CTP - I	0,6	15	17,30	27,80
CTP - I	0,6	15	15,35	19,45
CTP - I	0,6	15	13,55	23,00
CTP - I	0,6	15	17,45	27,00
CTP - I	0,6	15	11,85	23,90
CTP - I	0,6	15	17,25	26,40
CTP - I	0,6	15	12,30	22,10
CTP - II	0,4	0	12,70	19,80
CTP - II	0,4	0	14,45	13,65
CTP - II	0,4	0	17,00	17,45
CTP - II	0,4	0	12,60	14,30
CTP - II	0,4	0	10,60	24,90
CTP - II	0,4	0	11,00	13,75
CTP - II	0,4	0	15,20	18,50
CTP - II	0,4	0	14,00	19,00
CTP - II	0,4	0	13,50	19,50
CTP - II	0,4	7,5	13,60	17,50
CTP - II	0,4	7,5	13,70	13,10
CTP - II	0,4	7,5	9,80	19,80
CTP - II	0,4	7,5	13,10	13,70
CTP - II	0,4	7,5	9,90	13,50
CTP - II	0,4	7,5	15,40	15,20
CTP - II	0,4	7,5	12,70	11,37
CTP - II	0,4	7,5	10,55	13,62
CTP - II	0,4	7,5	12,40	15,95
CTP - II	0,4	7,5	9,80	11,60
CTP - II	0,4	7,5	9,70	21,00
CTP - II	0,4	7,5	10,85	22,40
CTP - II	0,4	15	11,50	14,00
CTP - II	0,4	15	10,75	8,00
CTP - II	0,4	15	12,40	16,55
CTP - II	0,4	15	9,80	14,45
CTP - II	0,4	15	12,10	16,80
CTP - II	0,4	15	11,50	17,25
CTP - II	0,4	15	11,54	14,00
CTP - II	0,4	15	11,40	16,50
CTP - II	0,4	15	11,47	11,00
CTP - II	0,4	15	10,20	13,05
CTP - II	0,4	15	13,50	15,00
CTP - II	0,4	15	12,00	14,90

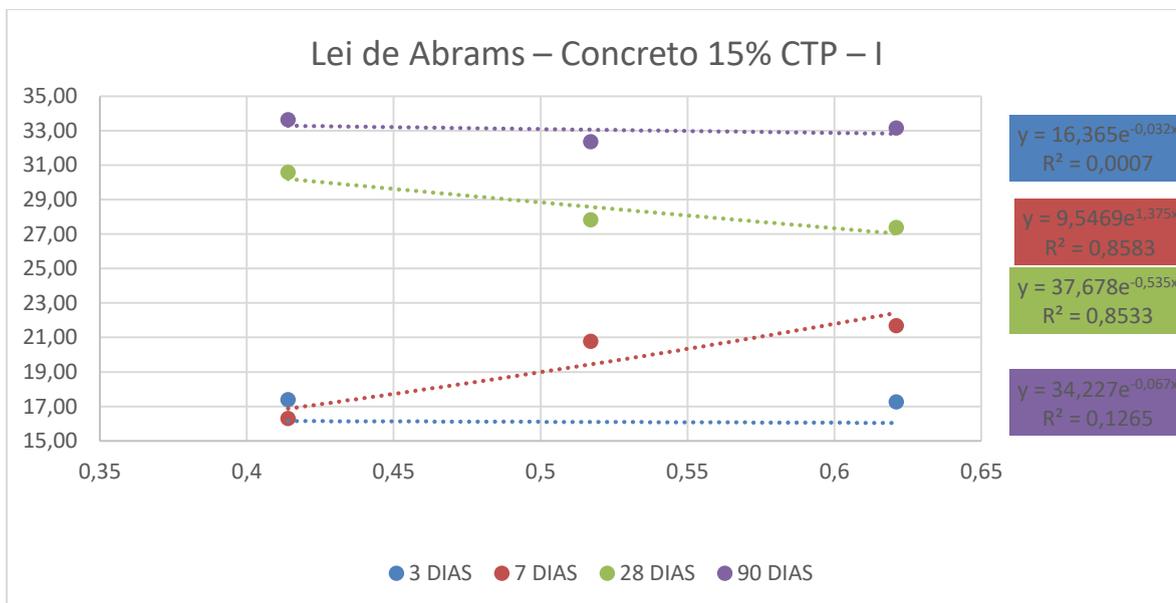
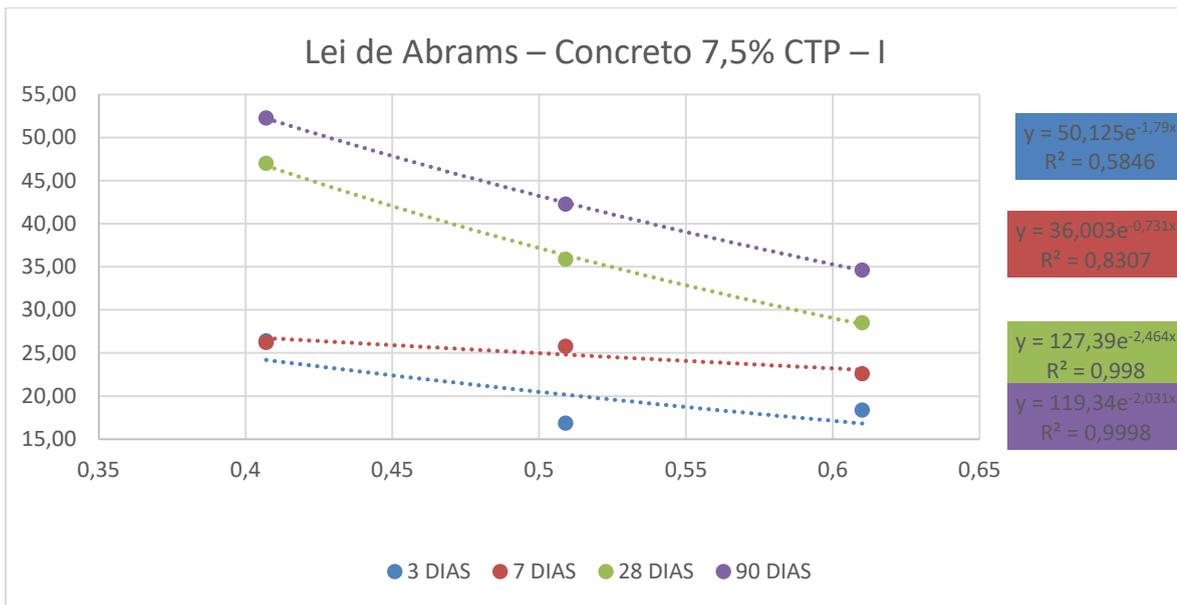
CTP - II	0,4	15	11,20	14,00
CTP - II	0,5	0	12,85	25,40
CTP - II	0,5	0	13,90	20,90
CTP - II	0,5	0	13,40	25,25
CTP - II	0,5	0	12,75	16,75
CTP - II	0,5	0	21,20	26,10
CTP - II	0,5	0	11,5	14,25
CTP - II	0,5	0	18,40	19,90
CTP - II	0,5	0	14,05	21,60
CTP - II	0,5	0	20,65	17,50
CTP - II	0,5	0	16,25	17,70
CTP - II	0,5	0	20,60	14,50
CTP - II	0,5	0	17,80	16,00
CTP - II	0,5	7,5	10,40	14,90
CTP - II	0,5	7,5	9,55	16,00
CTP - II	0,5	7,5	13,05	13,70
CTP - II	0,5	7,5	12,90	15,10
CTP - II	0,5	7,5	11,70	19,70
CTP - II	0,5	7,5	14,15	18,30
CTP - II	0,5	7,5	8,80	16,10
CTP - II	0,5	7,5	15,10	17,55
CTP - II	0,5	7,5	9,40	20,00
CTP - II	0,5	7,5	11,00	20,40
CTP - II	0,5	7,5	14,05	20,60
CTP - II	0,5	7,5	15,80	18,50
CTP - II	0,5	7,5	14,90	18,90
CTP - II	0,5	7,5	10,50	19,40
CTP - II	0,5	15	14,15	13,05
CTP - II	0,5	15	9,00	16,85
CTP - II	0,5	15	8,50	21,80
CTP - II	0,5	15	13,40	14,60
CTP - II	0,5	15	13,80	10,75
CTP - II	0,5	15	10,30	15,25
CTP - II	0,5	15	9,00	11,10
CTP - II	0,5	15	7,30	14,15
CTP - II	0,5	15	9,70	13,10
CTP - II	0,5	15	10,25	11,75
CTP - II	0,5	15	11,60	24,45
CTP - II	0,5	15	20,50	10,70
CTP - II	0,5	15	18,65	13,80
CTP - II	0,5	15	9,45	18,20
CTP - II	0,5	15	17,20	16,80
CTP - II	0,6	0	21,70	27,00
CTP - II	0,6	0	15,45	23,20

CTP - II	0,6	0	20,05	27,10
CTP - II	0,6	0	22,70	24,25
CTP - II	0,6	0	18,60	31,50
CTP - II	0,6	0	20,00	27,10
CTP - II	0,6	0	18,50	23,00
CTP - II	0,6	0	21,50	25,00
CTP - II	0,6	0	19,60	20,65
CTP - II	0,6	0	10,55	17,20
CTP - II	0,6	0	17,75	31,90
CTP - II	0,6	0	21,10	29,05
CTP - II	0,6	0	17,80	32,20
CTP - II	0,6	0	20,50	28,50
CTP - II	0,6	0	17,85	32,30
CTP - II	0,6	0	21,85	28,80
CTP - II	0,6	0	16,50	11,95
CTP - II	0,6	0	13,30	25,25
CTP - II	0,6	0	18,00	21,60
CTP - II	0,6	0	16,60	24,45
CTP - II	0,6	7,5	23,45	23,20
CTP - II	0,6	7,5	21,40	26,10
CTP - II	0,6	7,5	16,25	24,00
CTP - II	0,6	7,5	20,50	26,40
CTP - II	0,6	7,5	11,20	20,75
CTP - II	0,6	7,5	22,20	26,60
CTP - II	0,6	7,5	10,80	20,25
CTP - II	0,6	7,5	14,60	24,00
CTP - II	0,6	7,5	14,45	24,00
CTP - II	0,6	7,5	18,45	22,50
CTP - II	0,6	7,5	19,40	20,30
CTP - II	0,6	7,5	12,20	22,20
CTP - II	0,6	7,5	15,30	21,00
CTP - II	0,6	7,5	11,25	23,50
CTP - II	0,6	7,5	11,55	23,80
CTP - II	0,6	7,5	14,65	21,35
CTP - II	0,6	7,5	7,40	22,70
CTP - II	0,6	7,5	16,60	26,00
CTP - II	0,6	7,5	14,20	32,00
CTP - II	0,6	7,5	13,50	32,70
CTP - II	0,6	15	11,2	27,80
CTP - II	0,6	15	14,65	21,35
CTP - II	0,6	15	11,1	25,80
CTP - II	0,6	15	16,85	27,60
CTP - II	0,6	15	7,4	22,70
CTP - II	0,6	15	15	20,00
CTP - II	0,6	15	10,6	18,25

CTP - II	0,6	15	16,6	21,85
CTP - II	0,6	15	10,5	17,30
CTP - II	0,6	15	14,4	22,20
CTP - II	0,6	15	14,20	27,00
CTP - II	0,6	15	13,00	20,40
CTP - II	0,6	15	13,55	22,00
CTP - II	0,6	15	13,50	29,00
CTP - II	0,6	15	18,20	30,80
CTP - II	0,6	15	14,40	27,20
CTP - II	0,6	15	15,50	24,50
CTP - II	0,6	15	11,80	25,00
CTP - II	0,6	15	19,45	22,40
CTP - II	0,6	15	10,55	26,30

### APÊNDICE E - CURVA DE ABRAMS PARA A RESISTÊNCIA DOS CONCRETOS COM CTP - I





## APÊNDICE F - CURVA DE ABRAMS PARA A RESISTÊNCIA DOS CONCRETOS COM CTP - II

