



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ESTRUTURAL E CONSTRUÇÃO CIVIL
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

FILIPE PEREIRA DE ARAÚJO

**UTILIZAÇÃO DE CINZA MOÍDA DA USINA TERMELÉTRICA DO PECÉM COMO
POZOLANA NA PRODUÇÃO DO CONCRETO CONVENCIONAL.**

FORTALEZA

2017

FILIPE PEREIRA DE ARAÚJO

UTILIZAÇÃO DE CINZA MOÍDA DA USINA TERMELÉTRICA DO PECÉM COMO
POZOLANA NA PRODUÇÃO DO CONCRETO CONVENCIONAL.

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Civil do Departamento de Engenharia de Estruturas e Construção Civil da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil. Área de concentração: Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Antonio 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)

A689u Araújo, Filipe Pereira de.

Utilização de cinza da usina termelétrica do Pecém como pozolana na produção do concreto convencional / Filipe Pereira de Araújo. – 2017.

74 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Civil, Fortaleza, 2017.

Orientação: Prof. Dr. Antonio Eduardo Bezerra Cabral.

1. Cinza volante. 2. Concreto. 3. Termelétrica. 4. Resíduos. I. Título.

CDD 620

FILIPE PEREIRA DE ARAÚJO

UTILIZAÇÃO DE CINZA MOÍDA DA USINA TERMELÉTRICA DO PECÉM COMO
POZOLANA NA PRODUÇÃO DO CONCRETO CONVENCIONAL.

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Civil do Departamento de Engenharia de Estruturas e Construção Civil da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil. Área de concentração: Materiais.

Aprovada em: ____/____/____.

BANCA EXAMINADORA

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

MSc. Helano Wilson Pimentel
Universidade Federal do Ceará (UFC)

MSc. Químico Mário Sergio Guilge
Empresa Apodi

A Deus.
À minha família.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por estar sempre me dando forças para continuar seguindo em frente.

Ao meu orientador, Professor Eduardo Cabral, pela oportunidade e também pela ajuda na realização deste trabalho.

À minha família, por estar me ajudando em todos os momentos da minha vida.

À minha namorada Bruna, por ter sido paciente e compreensiva.

Ao meu grande amigo Clereston, por ter me ajudado e estado comigo em praticamente todos os trabalhos e cadeiras durante o período de UFC.

À ASTEF, pela ajuda financeira, sem a qual, este trabalho não seria realizado.

Ao suporte da empresa Apodi, fornecendo materiais ou realizando ensaios necessários para a realização deste trabalho.

Ao pessoal do Laboratório de Raios-X da UFC.

Ao pessoal do NUTEC, por fornecerem material e equipamentos.

Ao pessoal da Central Analítica da UFC, pelo auxílio na realização de ensaios.

Aos meus amigos que estiveram comigo ao longo dessa caminhada, Ian Lucas, Gizelle Heléne, Suyanne Costa, Matheus Cavalcante, Vitor Werton e todos os outros que tornaram essa jornada mais fácil.

Ao pessoal do laboratório (LMCC), que, sem eles, esse trabalho não teria acontecido, Helano, Maurício e Moisés.

Ao pessoal do Mestrado: Ada, Michel, Raphael e Lilian.

Obrigada a todos que de alguma forma contribuíram com este trabalho.

RESUMO

Em termelétricas, a queima do carvão mineral é realizada para fornecer calor, vaporizando a água, que mobiliza as turbinas, gerando, assim, o movimento necessário para a produção de energia elétrica. Um dos resíduos desse processo é a cinza volante, que, caso seja pozolânica, tem um grande potencial quando incorporada ao concreto, pois, além de evitar uma dispendiosa deposição, ainda pode aumentar a resistência à compressão do concreto. Visando um aumento da atividade pozolânica, a cinza passou por um processo de moagem, aumentando a sua área superficial específica. Para a caracterização da cinza, foram realizados ensaios químicos e físicos normalizados, com o objetivo de determinar se a cinza é um material pozolânico. Foram testados também concretos de 30 MPa, 35 MPa e 40 MPa, com adição de cinza e substituição, em volume, de cimento por cinza nos teores de 0%, 8% e 15%, o que resulta em um total de 45 traços. As análises químicas e físicas revelaram que a cinza volante moída é, de fato, um material pozolânico. As análises da resistências à compressão foram feitas por uma análise estatística de variância. Para a resistência à compressão aos sete dias, nos traços com incorporação de cinza, tanto em adição quanto em substituição, os valores foram significativamente menores do que a referência. Nos traços de 35 MPa e 40 MPa a resistência à compressão aos 28 dias mostrou-se inferior em pelo menos um percentual (8% ou 15%). Apenas no traço de 30 MPa houve a manutenção da resistência, tanto em adição quanto em substituição, em relação à referência. Conclui-se que a utilização da cinza moída, nos concretos estudados, não é vantajosa para o aumento da resistência à compressão, o que decorre, possivelmente, da quebra da estrutura dos grão, devida a moagem, e da finura das partículas ser bastante elevada.

ABSTRACT

On thermoelectric plants, the coal burning is performed to provide heat, vaporizing the water, which mobilizes the turbines, thus generating the necessary movement for the electric energy production. One of the residues of this process is the fly ash, which, if pozzolanic, has a great potential when incorporated into the concrete, since, besides avoiding an expensive deposition, it can even improve the concrete compressive strength. In order to increase pozzolanic activity, the ash went through a grinding process, increasing its specific surface area. To characterize the ash, chemical and physical tests were performed to define if the ash is a pozzolanic material. 30 MPa, 35 MPa, and 40 MPa concretes were tested with addition of ash, and substitution of cement for ash at 0%, 8% and 15% in volume, resulting in a total of 45 concrete mixtures. Chemical and physical analyzes have shown that ground fly ash is in fact a pozzolanic material. The compressive strength analysis were performed by a statistical analysis of variance. For the seven days compressive strengths, in the fly ash incorporated concrete mixtures, both in addition and in substitution, the values were significantly lower than the reference values. The 35 MPa and 40 MPa compressive strength at 28 days was lower at least on one of the percentages (8% or 15%). Only on the 30 MPa mixtures the resistance was maintained, both in addition and in substitution, when compared to the reference. It is concluded that the use of ground fly ash in the studied concretes does not bring any advantage to the concrete compressive strength, which is possibly due to the grain structure breakage caused by the grinding process and the fineness of the particles being quite high.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estrutura Cristalina (esquerda) e Estrutura Amorfa (direita) do SiO ₂	21
Figura 2 - MEV 1000x, 2000x, 3000x e 5000x.....	33
Figura 3 - Estufas.....	34
Figura 4 - Balança.....	35
Figura 5 - Betoneira Utilizada	36
Figura 6 - Teste de abatimento do tronco de cone.....	36
Figura 7 - Moldagem dos Corpos de Prova.....	37
Figura 8 - Tanque de Cura Úmida.....	37
Figura 9 - Prensa Hidráulica.....	38

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Granulometria da areia.....	30
Gráfico 2 - Granulometria Brita 0	30
Gráfico 3 - Granulometria Brita 1	31
Gráfico 4 - Granulometria a laser da cinza moída.....	32
Gráfico 5 - Comportamento da resistência à compressão aos 7 dias do concreto de 30 MPa com cinza moída em adição quando se varia o tipo de cimento	42
Gráfico 6 - Comportamento da resistência à compressão aos 7 dias do concreto de 30 MPa com cinza moída em adição quando se varia o teor de cinza	42
Gráfico 7- Comportamento da resistência à compressão aos 28 dias do concreto de 30 MPa com cinza moída em adição quando se varia o tipo de cimento.	44
Gráfico 8- Comportamento da resistência à compressão aos 7 dias do concreto de 35 MPa com cinza moída em adição ao cimento, quando se varia o teor de cinza	45
Gráfico 9- Comportamento da resistência à compressão aos 28 dias do concreto de 35MPa com cinza moída em adição, quando se varia o tipo de cimento	46
Gráfico 10 - Comportamento da resistência à compressão aos 28 dias do concreto de 35MPa com cinza moída em adição, quando se varia o teor de cinza	47
Gráfico 11 - Comportamento da resistência à compressão aos 7 dias do concreto de 40 MPa com adição de cinza moída quando se varia o teor de cinza	48
Gráfico 12 - Comportamento da resistência à compressão aos 28 dias do concreto de 40 MPa com cinza moída em adição, quando se varia o tipo de cimento	50
Gráfico 13 - Comportamento da resistência à compressão aos 28 dias do concreto de 40 MPa com adição de cinza moída quando se varia o teor de cinza	50
Gráfico 14 - Comportamento da resistência à compressão aos 7 dias do concreto de 30 MPa com cinza moída em substituição, quando se varia o tipo de cimento.....	52
Gráfico 15 - Comportamento da resistência à compressão aos 7 dias do concreto de 30 MPa com cinza moída em substituição, quando se varia o teor de cinza	52
Gráfico 16- Comportamento da resistência à compressão aos 28 dias do concreto de 30 MPa com cinza moída em substituição, quando se varia o teor de cinza	54
Gráfico 17 - Comportamento da resistência à compressão aos 7 dias do concreto de 35 MPa com cinza moída em substituição ao cimento, quando se varia o teor de cinza.....	55
Gráfico 18 - Comportamento da resistência à compressão aos 28 dias do concreto de 35MPa com cinza moída em substituição ao cimento, quando se varia o teor de cinza.....	56

Gráfico 19 - Comportamento da resistência à compressão aos 7 dias do concreto de 40 MPa com substituição de cinza moída quando se varia o teor de cinza	57
Gráfico 20 - Comportamento da resistência à compressão aos 28 dias do concreto de 40 MPa com substituição de cimento cinza moída quando se varia o tipo de cimento	59
Gráfico 21 - Comportamento da resistência à compressão aos 28 dias do concreto de 40 MPa com substituição de cimento por cinza moída quando se varia o teor de cinza	59
Gráfico B. 1 - Resíduos padronizados dos dados de fc7 para 30MPa com cinza moída em adição.....	69
Gráfico B. 2 - Resíduos padronizados dos dados de fc28 para 30MPa com cinza moída em adição.....	69
Gráfico B. 3 - Resíduos padronizados dos dados de fc7 para 35MPa com cinza moída em adição ao cimento	70
Gráfico B. 4 - Resíduos padronizados dos dados de fc28 para 35MPa com cinza moída em adição ao cimento– 1 ^a rodada	70
Gráfico B. 5 - Resíduos padronizados dos dados de fc28 para 35MPa com cinza moída em adição ao cimento– 2 ^a rodada	71
Gráfico B. 6 - Resíduos padronizados dos dados de fc7 para 40MPa com adição de cinza moída	71
Gráfico B. 7 - Resíduos padronizados dos dados de fc28 para 40MPa com adição de cinza moída	72
Gráfico B. 8 - Resíduos padronizados dos dados de fc7 para 30MPa com cinza moída em substituição	72
Gráfico B. 9 - Resíduos padronizados dos dados de fc28 para 30MPa com cinza moída em substituição	73
Gráfico B. 10 - Resíduos padronizados dos dados de fc7 para 35MPa com cinza moída em substituição ao cimento	73
Gráfico B. 11 - Resíduos padronizados dos dados de fc28 para 35MPa com cinza moída em substituição ao cimento– 1 ^a rodada	74
Gráfico B. 12 - Resíduos padronizados dos dados de fc28 para 35MPa com cinza moída em substituição ao cimento– 2 ^a rodada	74
Gráfico B. 13 - Resíduos padronizados dos dados de fc28 para 35MPa com cinza moída em substituição ao cimento– 3 ^a rodada	75
Gráfico B. 14 - Resíduos padronizados dos dados de fc7 para 40MPa com substituição de cimento por cinza moída.....	75

Gráfico B. 15 - Resíduos padronizados dos dados de fc28 para 40MPa com substituição de cimento por cinza moída..... 76

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação Materiais Pozolânicos	20
Tabela 2 - Classificação Segundo a Consistência.	22
Tabela 3 - Composição Cimento Portland.....	24
Tabela 4 - Propriedades da Cinza (AZEVEDO, 2002)	25
Tabela 5 - Cinza Tutikian e Molin (2011) D10, D50 e D90	26
Tabela 6 - Propriedades Químicas Yazici e Arel (2012).....	27
Tabela 7 - Propriedades Físicas Yazici e Arel (2012).....	27
Tabela 8 - Resumo da Caracterização	31
Tabela 9 - Cinza Moída D10, D50 e D90.....	32
Tabela 10 - Resumo da caracterização dos aglomerantes	32
Tabela 11 - Resumo de Traços	34
Tabela 12 - FRX da Cinza	40
Tabela 13 - Índice de Atividade Pozolânica.....	41
Tabela 14 - ANOVA dos dados de fc7 para 30MPa com cinza moída em adição.....	41
Tabela 15 - Duncan para os dados de fc7 para 30MPa com cinza moída em adição, considerando o tipo de cimento.	42
Tabela 16 - Duncan para os dados de fc7 para 30MPa com cinza moída em adição, considerando o teor de cinza.	43
Tabela 17 - ANOVA dos dados de fc28 para 30MPa com cinza moída em adição.....	43
Tabela 18 - Duncan para os dados de fc28 para 30MPa com cinza moída em adição, considerando o tipo de cimento.	44
Tabela 19 - ANOVA dos dados de fc7 para 35MPa com cinza moída em adição ao cimento	45
Tabela 20- Duncan para os dados de fc7 para 35MPa com cinza moída em adição ao cimento, considerando o teor de cinza	45
Tabela 21 - ANOVA dos dados de fc28 para 35MPa com cinza moída em adição.....	46
Tabela 22 - Duncan para os dados de fc28 para 35MPa com cinza moída em adição, considerando o tipo de cimento.	47
Tabela 23 - Duncan para os dados de fc28 para 35MPa com cinza moída em adição, considerando o teor de cinza.	47
Tabela 24 - ANOVA dos dados de fc7 para 40MPa com cinza moída em adição.....	48
Tabela 25 - Duncan para os dados de fc7 para 40MPa com cinza moída em adição, considerando o teor de cinza.	49
Tabela 26 - ANOVA dos dados de fc28 para 40MPa com cinza moída em adição.....	49

Tabela 27 - Duncan para os dados de fc28 para 40MPa com cinza moída em adição, considerando o tipo de cimento.....	50
Tabela 28 - Duncan para os dados de fc28 para 40MPa com cinza moída em adição, considerando o teor de cinza	51
Tabela 29 - ANOVA dos dados de fc7 para 30MPa com cinza moída em substituição	51
Tabela 30 - Duncan para os dados de fc7 para 30MPa com cinza moída em substituição, considerando o tipo de cimento.....	52
Tabela 31 - Duncan para os dados de fc7 para 30MPa com cinza moída em substituição, considerando o teor de cinza	53
Tabela 32 - ANOVA dos dados de fc28 para 30MPa com cinza moída em substituição	53
Tabela 33 - ANOVA dos dados de fc7 para 35MPa com cinza moída em substituição ao cimento	54
Tabela 34 - Duncan para os dados de f7 para 35MPa com cinza moída em substituição ao cimento, considerando o teor de cinza.....	55
Tabela 35 - ANOVA dos dados de fc28 para 35MPa com cinza moída em substituição ao cimento	56
Tabela 36 -Duncan para os dados de fc28 para 35MPa com cinza moída em substituição ao cimento, considerando o teor de cinza.....	56
Tabela 37 - ANOVA dos dados de fc7 para 40MPa com cinza moída em substituição	57
Tabela 38 - Duncan para os dados de fc7 para 40MPa com cinza moída em substituição, considerando o teor de cinza	58
Tabela 39 - ANOVA dos dados de fc28 para 40MPa com cinza moída em substituição	58
Tabela 40 - Duncan para os dados de fc28 para 40MPa com substituição de cimento por cinza moída, considerando o tipo de cimento.....	59
Tabela 41 - Duncan para os dados de fc28 para 40MPa com cinza moída em substituição, considerando o teor de cinza	60
Tabela 42 - Resumo dos Resultados.....	60

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	17
1.1	Justificativa.....	17
1.2	Objetivos	18
1.2.1	<i>Objetivo Geral</i>	18
1.2.2	<i>Objetivos Específicos</i>	18
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1	Cinzas leves de Termelétrica.....	19
2.2	Concreto Convencional de Cimento Portland.....	22
2.3	Cinzas Volantes no Concreto	25
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	29
3.1	Caracterização dos Agregados	29
3.2	Caracterização dos Aglomerantes	31
3.3	Execução dos Traços.....	33
3.4	Análise dos Dados	38
4	APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS E DISCUSSÕES	40
4.1	Atividade Pozolânica	40
4.2	Resistência à Compressão dos Concretos com Adição	41
4.2.1	<i>Com a adição de cinza moída em concretos de 30 MPa.....</i>	41
4.2.1.1	Idade de 7 dias.....	41
4.2.1.2	Idade de 28 dias.....	43
4.2.2	<i>Com a adição de cinza moída em concretos de 35MPa.....</i>	44
4.2.2.1	Idade de 7 dias.....	44
4.2.2.2	Idade de 28 dias.....	46
4.2.3	<i>Com a adição de cinza moída em concretos de 40MPa.....</i>	48
4.2.3.1	Idade de 7 dias.....	48
4.2.3.2	Idade de 28 dias.....	49
4.3	Resistências à Compressão dos Concretos com Substituição	51
4.3.1	<i>Com cinza moída como substituição ao cimento em concretos de 30MPa.....</i>	51
4.3.1.1	Idade de 7 dias.....	51
4.3.1.2	Idade de 28 dias.....	53
4.3.2	<i>Com cinza moída como substituição ao cimento em concretos de 35MPa.....</i>	54
4.3.2.1	Idade de 7 dias.....	54
4.3.2.2	Idade de 28 dias.....	55

4.3.3	<i>Com cinza moída como substituição ao cimento em concretos de 40MPa.....</i>	57
4.3.3.1	Idade de 7 dias.....	57
4.3.3.2	Idade de 28 dias.....	58
5	CONCLUSÕES.....	61
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	63
7	APÊNDICES	67

1 INTRODUÇÃO

O ser humano está sempre tentando tornar as suas atividades mais fáceis de serem realizadas. Por exemplo, por muito tempo, utilizou-se a tração animal como meio facilitador, passando, posteriormente, a se utilizar máquinas a vapor, e, atualmente, o ser humano depende grandemente da energia elétrica para realizar suas atividades, mesmo as mais simples.

O processo de produção da energia elétrica se dá a partir da transformação de diversos tipos de energia. No caso das Usinas Termelétricas, utiliza-se a energia potencial química do carvão mineral como fonte de energia. Nesse processo, o principal produto é a energia elétrica, porém há outros produtos indesejados que precisam de um fim apropriado para minimizar os impactos ambientais, sendo um desses a cinza.

A cinza, em alguns casos, pode ser pozolânica, ou seja ela irá reagir com o hidróxido de cálcio e gerar material aglomerante. Um subproduto da reação da água com o cimento é o hidróxido de cálcio, que é justamente o que um material pozolânico precisa para reagir e gerar material aglomerante, podendo aumentar a resistência à compressão do concreto.

1.1 Justificativa

Em julho de 2011, instalou-se, em São Gonçalo do Amarante do estado do Ceará, a UTE - Pecém I com capacidade total de 720 MW (EDP, [2011]). Já em outubro de 2013, instalou-se na mesma localidade a UTE - Pecém II, com capacidade total de 365 MW (ENEVA, [2013]). Juntas, a produção de cinza pode chegar a quase 1.000 toneladas por dia, o que demanda novos espaços de estocagem e gera despesas para sua deposição (CASIMIRO, 2017).

A quantidade de concreto, que saí das centrais dosadoras no Brasil, gira em torno de 30 milhões de metros cúbicos por ano (PEDROSO, 2009). Ainda segundo Pedroso (2009), o consumo de concreto dos países ibero-americanos é de 1,9 toneladas de concreto por habitante ano, que é um valor de consumo menor apenas que o da água.

Analizando os valores mostrados acima, percebe-se que, tanto a produção de cinza, quanto o consumo de concreto são bastante altos. Se, quando incorporada a cinza ao concreto, este mantiver ou até aumentar a resistência à compressão, tem-se uma alternativa muito vantajosa, dando um fim a parte da cinza grandemente produzida, ao mesmo tempo que melhorando as propriedades do concreto.

1.2 Objetivos

1.2.1 *Objetivo Geral*

O objetivo geral desse estudo é analisar a possível utilização da cinza moída, da UTE Pecém II, como pozolana em concretos, observando possíveis alterações nas suas resistências à compressão, em relação à referência, por meio de uma análise estatística de variância.

1.2.2 *Objetivos Específicos*

- a) Observar se a cinza, em seu estado moído, é considerada pozolânica.
- b) Comparar, a partir de concretos de referência, se as resistências dos concretos com adição de cinza moída sofrem alterações significativas.
- c) Comparar, a partir de concretos de referência, se as resistências dos concretos com substituição de cimento por cinza moída sofrem alterações significativas.
- d) Avaliar se existe algum cimento com desempenho superior, variando a marca e o tipo de cimento.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A utilização de materiais não convencionais no concreto tem se tornado uma tendência mundial. Isto é feito, geralmente, para que se possa dar um fim a um resíduo de outra industria, muitas vezes, inclusive, melhorando as propriedades do concreto, processo definido por um termo em inglês chamado *upcycling*. Dentre os materiais que, ao serem incorporados no concreto, podem aumentar, por exemplo, a sua resistência à compressão, está a cinza volante de termelétrica.

Faz necessário então entender as principais propriedades relacionados às cinzas leves de termelétrica, aos concretos convencionais e à junção entre cinza volante e o concreto convencional para que a incorporação de cinza volante no concreto seja testada, aspectos que serão tratados nos itens 2.1, 2.2 e 2.3.

2.1 Cinzas leves de Termelétrica

O carvão mineral é um hidrocarboneto gerado a partir da decomposição da matéria orgânica sob certas condições de temperatura e pressão por um longo período de tempo. Como se trata de um processo natural, o carvão mineral gerado é heterogêneo, dependendo das condições as quais este foi submetido. Segundo Branco (2014) o carvão mineral pode ser divido nas seguintes classes: turfa, linhita, hulha e antracite (em ordem crescente de riqueza em carbono).

O poder calorífico da queima do carvão mineral depende da sua riqueza de carbono, assim, a turfa gera uma baixa quantidade de energia se comparada com a antracite. Segundo K. Wesche (1991), a temperatura de queima nos fornos das termelétricas define qual o tipo de resíduo é gerado. Fornos com altas temperaturas de queima (1500 - 1700 °C) geram cinzas que se fundem e caem na água, onde são coletadas na forma sólida, majoritariamente na forma amorfa devido ao rápido resfriamento. Fornos com temperaturas entre 1100 e 1400 °C geram 90% das cinzas de partículas ultra-finas, que são retidas pelos filtros eletrostáticos, devido ao resfriamento lento dessas cinzas, a porcentagem de partículas no estado amorfo é baixa. Em fornos com temperatura menores que 900 °C, as cinzas possuem forma irregular e alta porcentagem de material cristalino, gerando pouco interesse na sua aplicação como material de construção.

Segundo a NBR 12653 (ABNT, 2014), os resíduos finamente divididos resultantes da combustão de carvão mineral pulverizado ou granulado com atividade

pozolânica são chamados de cinza volante. A NBR 12653 (ABNT, 2014) define materiais pozolânicos da seguinte forma:

Materiais silicosos ou silicoaluminosos que, por si sós, possuem pouca ou nenhuma atividade aglomerante, mas que, quando finamente divididos e na presença da água, reagem com o hidróxido de cálcio a temperatura ambiente para formar compostos com propriedades aglomerantes.

Portanto, nem toda cinza de termelétrica caracteriza-se como cinza volante, apenas aquelas que se enquadrem na definição acima.

Ainda segundo a NBR 12653 (ABNT, 2014) os materiais pozolânicos podem ser divididos em três classes, sendo a classe N a de pozolanas naturais, a classe C a das cinzas volantes (as cinzas que obedecem as exigências da Tabela 1) e a classe E a de materiais pozolânicos que não se enquadrem nas classes N e C.

Tabela 1 - Classificação Materiais Pozolânicos

Classe	N	C	E
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$, % mín.	70	70	50
SO_3 , % máx.	4	5	5
Perda ao fogo, % máx.	10	6	6
Álcalis disponíveis em Na_2O , % máx.	1,5	1,5	1,5
Teor de umidade, % máx.	3	3	3
Material retido na peneira 45 μm , % máx.	34	34	34
Índice de atividade pozolânica: com cimento aos 28 dias, em relação ao controle, % mín.	90	90	90

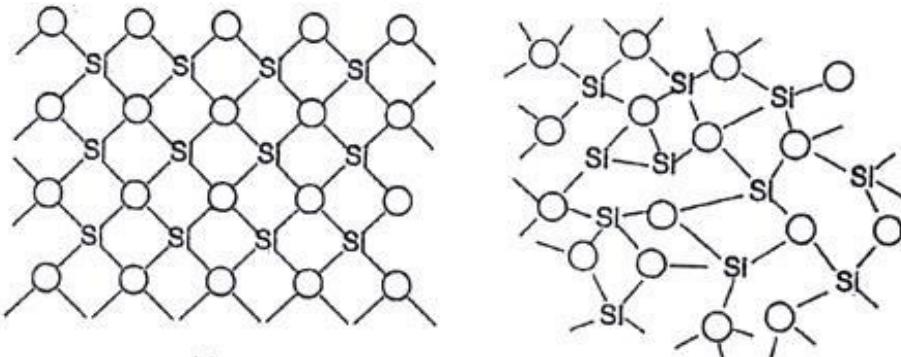
Fonte: NBR 12653 (ABNT, 2014)

A análise química, a qual é feita pela técnica da Fluorescência de Raio-X (FRX), fornece as quantidades de cada composto presente na cinza, como as quantidades de SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , SO_3 e Na_2O , informações essenciais para determinação da cinza como material pozolânico.

Apesar de a quantidade de SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 ser um forte indicativo de que a cinza possui atividade pozolânica, já que estes compostos, principalmente o SiO_2 , reagirão com o hidróxido de cálcio em meio aquoso, em temperatura ambiente, para formar compostos com propriedades aglomerantes, essa informação não define a cinza como reativa, uma vez que estes óxidos podem estar estruturados de forma amorfa ou cristalina, sendo necessária uma análise de Difração de Raio-X (DRX). As fases cristalinas do Óxido de Silício como o Quartzo e a Mulita são muito estáveis, logo elas não irão reagir com o hidróxido de cálcio, já as fases amorfas irão reagir com facilidade devido a sua forma extremamente instável, assim,

formando compostos aglomerantes com maior facilidade (ISAIA et al., 2010). A Figura 1, mostrada abaixo, ilustra as estruturas cristalina e amorfã do SiO₂.

Figura 1 - Estrutura Cristalina (esquerda) e Estrutura Amorfã (direita) do SiO₂.



Fonte: (SILVA, 1998)

A norma não obriga a realização do DRX para indicar se a cinza é reativa ou não, já que isto é mensurado a partir do índice de atividade pozolânica (IAP) limitado em, no mínimo, 90%, ou seja a norma assume que a cinza é pozolânica se a resistência à compressão de uma argamassa padrão de cimento mais cinza, dividida pela resistência de uma argamassa padrão de cimento for maior do que 0,90.

ISAIA et al. (2010) diz:

As Pozolanas , isoladamente, não possuem capacidade aglomerante e necessitam de uma fonte de cálcio. Há, porém, algumas pozolanas que possuem mais de 25% de cálcio em sua composição química.

Assim, caso essa cinza com alto teor de cálcio entre em contato com a água, esta irá gerar compostos aglomerantes. Para tanto a norma limita a umidade do material pozolânico em 3%.

A perda ao fogo, segundo K. Wesche (1991), consiste na queima de um material de massa conhecida com o aumento da temperatura até aproximadamente 1000 °C, sofrendo assim uma diminuição no peso devido a presença de carbonatos, água residual combinada em minerais de argila e a combustão de carbono livre. Pode ocorrer, ainda, o aumento de massa devido à oxidação de componentes de Ferro e Enxofre, o que deve ser contado na soma total. Os efeitos combinados de ganho e perda de material é chamado de perda ao fogo. Ainda segundo K. Wesche (1991), já foi confirmado que o componente mais significante da perda ao fogo é a combustão do carbono. A quantidade de Carbono presente na cinza é decisiva para a determinação da necessidade de água para aplicações em concretos e argamassas. Daí, parte a necessidade de limitar a perda ao fogo, como uma forma indireta de limitar a quantidade de Carbono presente na cinza.

A norma limita também a quantidade de SO₃. Segundo Neville (2011), o teor de anidro sulfúrico deve ser limitado para evitar a expansão pela formação de etringita já nas primeiras horas de hidratação.

Segundo K. Wesche (1991), a limitação de Na₂O se dá pela expansão por reação álcali agregado (RAA), que geralmente ocorre tanto com o hidróxido de sódio, como com o hidróxido de potássio, sendo o primeiro mais expansivo, sendo, portanto, mais importante a sua limitação.

A finura do grão pode ser determinada a partir do método proposto pela NBR 9202 (ABNT, 1985), que, em resumo, apenas compara o material retido na peneira 0,045mm com uma massa inicial. Atualmente, pode ser utilizado a granulometria a laser, que é um método mais robusto, para determinar os parâmetros de finura da cinza.

2.2 Concreto Convencional de Cimento Portland

O Concreto de Cimento Portland é definido pela norma NBR 12655 (ABNT, 2015) da seguinte maneira:

Material formado pela mistura homogênea de cimento, agregados miúdo e graúdo e água, com ou sem a incorporação de componentes minoritários (aditivos químicos, pigmentos, metacaulim, sílica ativa e outros materiais pozolânicos), que desenvolve suas propriedades pelo endurecimento da pasta de cimento (cimento e água).

Sendo o agregado definido, nessa norma, como material granular inerte na maior parte, com propriedades e tamanho que permitam a preparação de argamassas e concretos. Usualmente, utilizam-se a areia de rio lavada e pedra britada como agregados.

O termo concreto convencional é bastante geral, não deixando claro quais as propriedades que este possui. Daí, a NBR 8953 (ABNT, 2015) classifica o concreto estrutural segundo a sua massa específica, grupo de resistência e consistência. Concretos com massa específica abaixo de 2000 kg/m³ são considerados leves (CL), já entre 2000 e 2800 kg/m³ são considerados concretos normais (C), acima de 2800 kg/m³ já são denominados concretos densos (CD). A classificação segundo a resistência é dividida em grupo I e grupo II (concretos de alta resistência), sendo o grupo I de concretos de resistências características (fck) de 20 MPa a 50 MPa e o grupo II de 55 MPa a 100MPa. A classificação para a consistência é medida pelo ensaio de abatimento do tronco de cone, segundo a NBR NM 67 (ABNT, 1998) e pode ser resumida na Tabela 2.

Tabela 2 - Classificação Segundo a Consistência.

Classe	Abatimento (mm)	Aplicações Tipicas
S10	$10 \leq A < 50$	Concreto extrusado, vibroprensado ou centrifugado

S50	$50 \leq A < 100$	Alguns tipos de pavimentos e de elementos de fundações
S100	$100 \leq A < 160$	Elementos estruturais, com lançamento convencional do concreto
S160	$160 \leq A < 220$	Elementos estruturais, com lançamento bombeado do concreto
S220	≥ 220	Elementos estruturais esbeltos ou com alta densidade de armaduras

Fonte: NBR 8953 (ABNT, 2015)

A partir das características acima, pode-se nomear os concretos, primeiro de acordo com a massa específica, seguida da resistência e, por último, pela consistência, resultando no seguinte formato: C30 S100, C35 S160, C40 S50.

Apesar de o termo convencional não ser definido de forma exata pela norma, percebe-se que, quando se fala em concreto convencional, entende-se por concretos de densidades normais, resistências enquadradas no grupo I e consistência desde a classe S50 até a classe S160.

O principal componente no concreto convencional é o cimento, já que ele é o responsável por aglomerar as outras partículas que compõem o concreto, possibilitando a formação de estruturas monolíticas após a cura.

ISAIA et al.(2010) define cimento Portland da seguinte maneira:

O cimento Portland é um ligante hidráulico obtido pela moagem do clíquer Portland, em conjunto com uma ou mais formas de sulfato de cálcio, em proporções que variam aproximadamente de 3% a 5% em massa, e eventuais adições ativas facultativas, conforme o tipo de cimento, durante o processo de fabricação.

Ainda segundo ISAIA et al. (2010) o clíquer é um material resultante da calcinação a cerca de 1450 °C de uma mistura de calcário, argila e componentes corretivos. A alta temperatura de calcinação causa o processo de sinterização, que é o processo em que partículas solidas se aglutanam por aquecimento a temperatura abaixo do ponto de fusão, porém alta o suficiente para modificar a estrutura cristalina inicial, resultando em uma estrutura amorfa quando há o rápido resfriamento.

O Clíquer é composto principalmente de $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$, $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$, $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ e $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$, chamados mais comumente de C_3S , C_2S , C_3A e C_4AF , respectivamente, podendo possuir também, em sua composição, quantidades menores de SO_3 , Na_2O e K_2O .

Segundo Bauer (1994), cada um desses componentes do clíquer, consequentemente também do cimento Portland, apresenta uma correlação quanto ao ganho de resistência apresentados nos concretos e nas argamassas. O C_3S é grandemente responsável pelas resistências em todas as idades, especialmente até o fim do primeiro mês de cura. O C_2S é menos reativo, logo ele influencia na resistência em idades mais avançadas (um ano ou

mais). O C₃A contribui para o ganho de resistência especialmente ao primeiro dia, já o C₄AF não contribui para o ganho de resistência (BAUER, 1994).

Para que o Clíquer se transforme em cimento Portland, é necessário que passe por um processo de moagem, já que aquele saí da calcinação no estado de pelotas, e adição, que pode ser feita com filer (F), escória (E) ou pozolana (Z), com o objetivo de diminuir o custo de produção do cimento, além de melhorar algumas propriedades do concreto. O gesso (sulfato de cálcio) é também adicionado ao clínquer a fim de aumentar o tempo de início do endurecimento quando em contato com a água. A Tabela 3 da Associação Brasileira de Cimento Portland (2002) abaixo mostra a composição e as normas dos cimentos Portland fabricados no Brasil.

Tabela 3 - Composição Cimento Portland.

Tipo de Cimento Portland	Sigla	Composição (% em massa)				Norma Brasileira
		Clíquer + Gesso	Escória de alto-forno (E)	Material Pozolânico (Z)	Material Carbonático (F)	
Comum	CP I	100	-	-	-	NBR 5732
	CP I - S	99-95	-	1-5	-	
Composto	CP II - E	94-56	6-34	-	0-10	
	CP II - Z	94-76	-	6-14	0-10	NBR 11578
	CP II - F	94-90	-	-	6-10	
Alto-Forno	CP III	65-25	35-70	-	0-5	NBR 5735
Pozolânico	CP IV	85-45	-	15-50	0-5	NBR 5736
Alta Resistência Inicial	CP V	100-95	-	-	0-5	NBR 5733

Fonte: (Associação Brasileira de Cimento Portland, 2002)

O processo de hidratação do cimento, ou seja, a hidratação, principalmente do C₃S e do C₂S, produz o silicato de cálcio hidratado (C-S-H), que, apesar de não ser totalmente homogêneo, devido à relação de Cálcio e Silício ser variável, apresenta características físicas semelhantes mesmo proveniente de compostos diferentes (MEHTA e MONTEIRO, 2006).

O C-S-H representa, na pasta de cimento totalmente hidratada, cerca de 50% a 60% do volume total de sólidos, ou seja, as propriedades da pasta, como a resistência à compressão, são grandemente ditadas por esse composto. Cálculos estequiométricos mostram que a hidratação do C₃S produz 61% de C-S-H e 39% de Ca(OH)₂, já o C₂S produz 82% C-S-H e 18% Ca(OH)₂. A hidratação do C₂S, por produzir mais C-S-H, confere maior resistência a

compressão da pasta, já o C₃S, além de produzir menos C-S-H, produz uma grande quantidade de Ca(OH)₂, que diminui a durabilidade da pasta pelo ataque de ácidos e sulfatos, o que pode ser mitigado com a utilização de pozolanas, já que estas irão reagir com o Ca(OH)₂ para gerar mais C-S-H, sendo duplamente benéfico. (MEHTA E MONTEIRO, 2006).

Em concretos do grupo I, de 20 MPa a 50 MPa, a resistência a compressão é ditada, principalmente, pela resistência à compressão da pasta de cimento, uma vez que os agregados são, em geral, muito mais resistentes. (BAUER, 1994).

Segundo MEHTA e MONTEIRO (2006) é necessário conhecer bem o agregado para dosar uma mistura de concreto, pois a massa específica, a curva granulométrica, o formato, a textura da superfície do agregado, a composição mineralógica dos agregados influenciam na trabalhabilidade, resistência à compressão, dureza e módulo de elasticidade do concreto.

A composição mineralógica do agregado juntamente com o processo de britagem, no caso das britas, ou intemperismo, no caso das areias e cascalhos, determina todas as características do agregado citadas acima (Massa específica, curva granulométrica, formato e textura) (ISAIA *et al.*, 2010).

2.3 Cinzas Volantes no Concreto

Azevedo (2002) testou concretos com substituição de cimento por cinza volante nas porcentagens de 0, 20, 40 e 60, para concretos de referência produzidos com 400 kg/m³, 500 kg/m³ e 600 kg/m³ de cimento. Os concretos com até 40% de cinza atingiram resistências semelhantes aos de referência a partir dos 56 dias de idade. Para o teor de 60%, foram obtidos resultados significativamente inferiores. As propriedades das cinzas utilizadas nos testes feitos são variáveis, sendo dispostas em faixas, como pode ser visto na Tabela 4.

Tabela 4 - Propriedades da Cinza (AZEVEDO, 2002)

SiO ₂ (%)	42,16 - 58,46
Al ₂ O ₃ (%)	21,04 - 32,65
Fe ₂ O ₃ (%)	3,51 - 9,13
CaO (%)	1,67 - 9,18
SO ₃ (%)	0,22 - 1,04
Na ₂ O (%)	0,18 - 0,91
Superfície específica Blaine (cm ² /g)	3879

Granulometria > 45 µm (%)	14.10 – 31.55
Granulometria > 75 µm (%)	5.60 – 18.85

Fonte: (AZEVEDO, 2002)

Tutikian e Molin (2011) testaram a utilização de cinza volante, comparando com a areia fina, em concretos auto-adensáveis. Este tipo de concreto necessita de uma determinada quantidade de finos, no seu estado fresco, para garantir a estabilidade da mistura, papel geralmente desempenhado pela areia fina, que é um material inerte, ao contrário da cinza volante, que é pozolânica. Os concretos foram dosados para que fossem equivalentes. A cinza utilizada possui, de acordo com o ensaio de Fluorescência de Raio-X, 3,02% de CaO, 65,92% de SiO₂, 7,54% de Fe₂O₃, 18,71% de Al₂O₃ e 0,25% de SO₃. Já a granulometria a laser revelou os resultados da Tabela 5.

Tabela 5 - Cinza Tutikian e Molin (2011) D10, D50 e D90

D10 (µm)	D50 (µm)	D90 (µm)
5,22	39,91	128,15

Fonte: (TUTIKIAN; MOLIN, 2011)

Tutikian e Molin (2011) observaram que a utilização da cinza volante aumentou a resistência à compressão, principalmente nas idades mais avançadas, quando comparada com o concreto que utilizou areia fina.

É notável que, nos dois estudos feitos utilizando a cinza volante, as resistências à compressão tendem a ser baixas inicialmente se igualando às referências em idades mais avançadas. Isto pode ser explicado observando as dimensões das partículas utilizadas. Partículas de cinza volante menores que 10µm tendem a aumentar a resistência até os 28 dias de idade. Quando o tamanho está entre 10µm e 45 µm, a resistência tende a aumentar após os 28 dias, já as partículas maiores que 45µm não contribuem para o aumento da resistência em nenhuma idade (ISAIA et al., 2010).

As cinzas utilizadas por Azevedo (2002) podem ter até 31,55% das partículas maiores que 45 µm, ou seja, trata-se de uma cinza com partículas grandes no geral, assim como a cinza utilizada por Tutikian e Molin (2011), que, aproximadamente 50% dela, é maior que 45 µm. É possível afirmar que o aumento da resistência, em ambos os estudos, apenas em idades mais avançadas é dado principalmente pela finura dos grãos.

O aumento da finura diminui o tempo necessário para a pozolana reagir com o cálcio e formar compostos aglomerantes uma vez que a superfície específica da cinza se torna maior. A melhoria da resistência do concreto, pela incorporação da cinza, não se dá apenas pela atividade pozolânica, que tende a aumentar a quantidade de aglomerante, mas também devido ao "efeito de enchimento", que ocorre quando partículas finas (fíler) se posicionam

nos volumes vazios do concreto aumentando a compacidade e consequentemente a sua resistência (NEVILLE, 2011).

A moagem da cinza aumenta a finura e reduz a sua porosidade também, o que é positivo para a resistência do concreto, no entanto, como a superfície específica do material aumenta, pode se tornar necessária mais água ou mais aditivo para atingir uma mesma consistência. Além da superfície específica, pode ocorrer de, com a moagem, haver a destruição da forma esférica das partículas da cinza, que contribuía para uma melhor trabalhabilidade (K. WESCHE, 1991).

Yazici e Arel (2012) moeram, em um moinho de bolas, uma cinza volante de finura Blaine inicial de 2351cm²/g, obtendo duas outras cinzas de Blaine 3849 cm²/g e 5239 cm²/g. Foi então substituído, em um concreto de 350kg/m³ de cimento e fator água cimento de 0,5, cimento por cinza nos teores de 0%, 5%, 10% e 15%, sendo um total de 10 traços (Um de referência e mais três traços para cada teor). As propriedades das cinza utilizadas estão dispostas na Tabela 6 e na Tabela 7.

Tabela 6 - Propriedades Químicas Yazici e Arel (2012)

Compostos	Quantidades (%)
SiO ₂	45,98
Al ₂ O ₃	23,55
Fe ₂ O ₃	4,91
CaO	18,67
SO ₃	1,47
Na ₂ O	0,24

Fonte: (YAZICI; AREL, 2012)

Tabela 7 - Propriedades Físicas Yazici e Arel (2012)

Propriedade	Cinza Volante A	Cinza Volante B	Cinza Volante C
Massa Específica (g/ cm ³)	2,21	2,45	2,52
Finura Blaine (cm ² /g)	2351	3849	5239
Granulometria > 45 µm (%)	33	18,8	12,2
Granulometria > 90 µm (%)	14,3	2,3	1,6

Fonte: (YAZICI; AREL, 2012)

Yazici e Arel (2012) encontraram que a resistência a compressão aumenta com o aumento da finura da cinza volante, comparando valores de uma mesma taxa de substituição. Concluiu-se que, para que a cinza volante tivesse efeito positivo nas propriedades mecânicas do concreto, a finura Blaine deveria ter valor superior a 3849 cm²/g.

O processo de moagem visa aumentar a superfície específica do material, podendo melhorar a sua capacidade reativa, porém alguns fatores também estão ligados a moagem. Pode acontecer que, com a quebra da estrutura do grão, a cinza perca sua capacidade reativa ou até mesmo atue como agente deletério no concreto, reduzindo a sua resistência a compressão.

Percebe-se que as cinzas utilizadas nos estudos citados acima possuem características químicas diferentes umas das outras, mostrando que, tais propriedades dependem de diversos fatores, como a origem do carvão e o processo produtivo na termoelétrica. Por conta disso, não é possível concluir que o comportamento da cinza no concreto será sempre semelhante aos encontrados em outros estudos.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

No momento de realizar a dosagem de um concreto, é essencial conhecer as características dos agregados e do aglomerante utilizados, para isso, uma série de ensaios deve ser realizada a fim de obter um traço de forma mais assertiva possível.

Os traços de referência utilizados no presente trabalho foram fornecidos por uma usina de concreto e reproduzidos em laboratório. Foram feitas modificações neste traço original, como a adição de cinza, ou seja, um teor especificado (8% e 15%), em relação a massa de cimento, foi simplesmente adicionado sem realizar qualquer outra alteração no traço, e a substituição de cimento por cinza, que é a retirada de um teor de massa de cimento e a colocação de massa de cinza que ocupe o mesmo volume retirado de cimento.

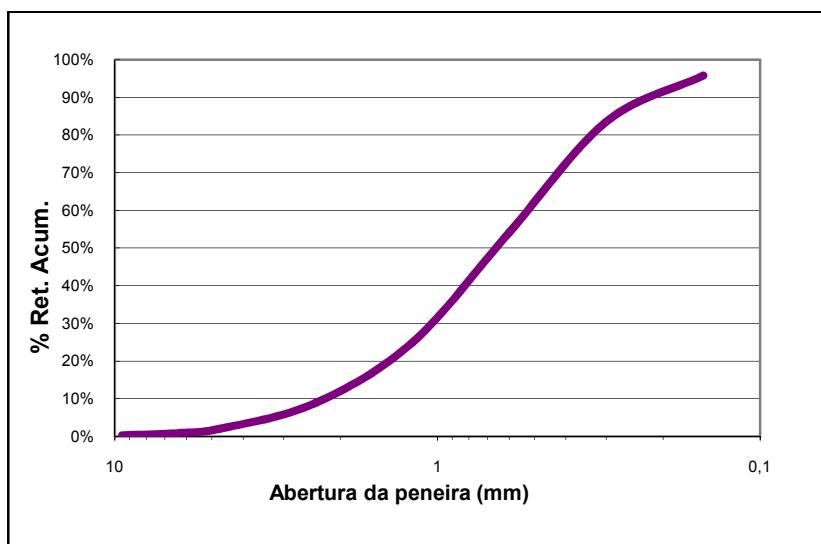
Os agregados, um dos cimentos (CP-V ARI A) e o aditivo plastificante polifuncional redutor de água aplicados nesse trabalho são os mesmos presentes na usina de concreto. Como um dos objetivos específicos é a avaliação da existência de algum cimento com desempenho superior, do traço original, foi substituído o CP-V ARI A por CP-V ARI RS M e CP II-F-40 P, que possuem massas específicas parecidas e podem ser considerados equivalentes, não sendo feita uma nova dosagem para a utilização desses outros cimentos.

A seguir será mostrado como foi feita a caracterização dos agregados utilizados, a caracterização da cinza moída e dos cimentos, a forma de execução dos concretos e o modo de análise dos resultados.

3.1 Caracterização dos Agregados

Vários ensaios são necessários para caracterizar completamente o agregado miúdo, no caso a areia natural lavada, porém, para o que está proposto neste estudo, apenas os ensaios de análise granulométrica e de massa específica foram realizados. A análise granulométrica foi feita segundo a NBR NM 248 (ABNT, 2003), já a massa específica foi realizada seguindo a NBR NM 52 (ABNT, 2003). No Gráfico 1, é possível observar a distribuição granulométrica da areia natural utilizada.

Gráfico 1 - Granulometria da areia

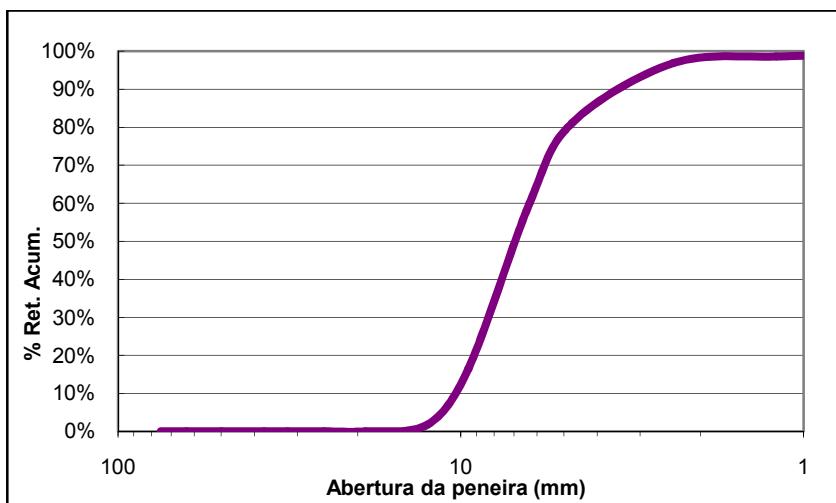


Fonte: Autor

A pedra britada exerce a função de agregado graúdo nos concretos desse estudo. Foram utilizadas a brita 0 e a brita 1, em diferentes proporções, a fim de obter uma maior compacidade no concreto.

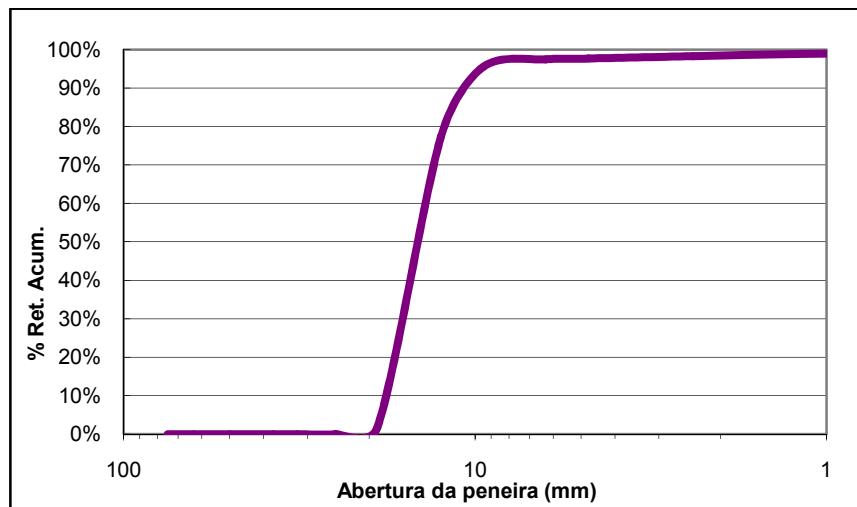
Os ensaios necessários para caracterizar as britas foram a granulometria, segundo a NBR NM 248 (ABNT, 2003) e a massa específica, de acordo com a NBR NM 53 (ABNT, 2002). No Gráfico 2 e no Gráfico 3, estão as distribuições granulométricas da brita 0 e da brita 1 respectivamente.

Gráfico 2 - Granulometria Brita 0



Fonte: Autor.

Gráfico 3 - Granulometria Brita 1



Fonte: Autor.

Na Tabela 8, estão os dados obtidos da caracterização dos agregados de forma resumida.

Tabela 8 - Resumo da Caracterização

Agregado	DMC (mm)	MF	Massa específica (g/cm ³)	Absorção (%)
Areia	4,75	2,69	2,56	0,9
Brita 0	12,5	5,9	2,542	2,15
Brita 1	19,0	6,90	2,481	1,37

Fonte: Autor

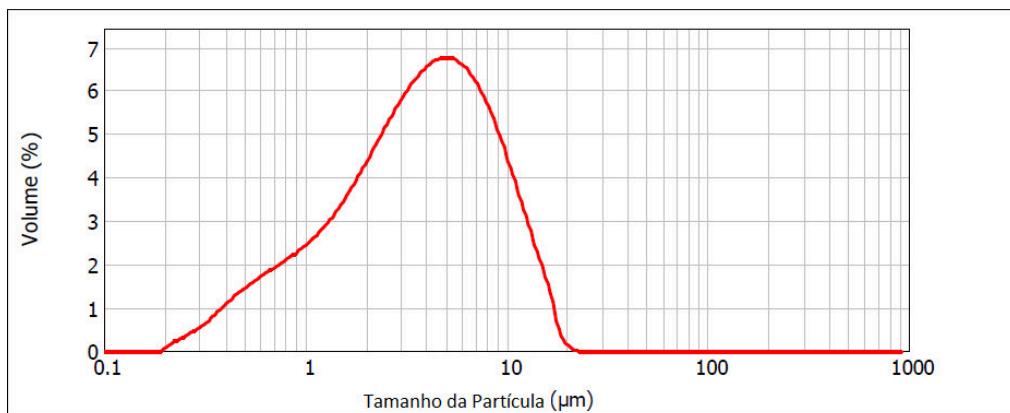
3.2 Caracterização dos Aglomerantes

A caracterização dos cimentos é feita pela própria fábrica e emitida em um boletim técnico, em que constam informações químicas, físicas e mecânicas do cimento. Foi realizado no Laboratório de Materiais de Construção Civil, na UFC, o ensaio de massa específica do cimento, seguindo a NBR NM 23 (ABNT, 2001). Este é extremamente importante, pois, para a realização da substituição de cimento por cinza moída, faz-se necessário conhecer a massa específica de ambos, já que a substituição foi feita em volume, não em massa.

As análises e os ensaios que foram realizados na cinza moída, para sua caracterização, foram Granulometria a Laser (Gráfico 4), Blaine (Tabela 10), Massa Específica (Tabela 10) e Microscopia Eletrônica por Varredura(MEV). Outras análises, como Fluorescência de Raio-X (FRX), Difração de Raio-X (DRX), Perda ao Fogo e Índice de

Atividade Pozolânica foram também realizadas, sendo apresentadas na seção Apresentação dos resultados e discussões.

Gráfico 4 - Granulometria a laser da cinza moída



Fonte: Apodi

Os valores de peneira que representam o percentual passante de 10%, 50% e 90% estão expostos na Tabela 9. Nota-se que 90% da cinza passa na peneira 10,163 μm, mostrando quão fina a cinza moída é. Quando comparada a cinza moída do presente trabalho com as cinzas utilizadas nos trabalhos citados na seção 2.3, percebe-se que a finura é bastante diferente. Mesmo a cinza utilizada por Yazici e Arel (2012), que é a de maior finura dentre as citadas, não tem o valor próximo do Blaine da Cinza Moída mostrado na Tabela 10. Devido a finura da cinza moída ser bem maior, não há como inferir os possíveis resultados da incorporação desta no concreto, sendo este um objetivo deste trabalho.

Tabela 9 - Cinza Moída D10, D50 e D90

D10 (μm)	D50 (μm)	D90 (μm)
0,826	3,768	10,163

Fonte: Autor/Apodi

Na Tabela 10, encontram-se os dados obtidos para a massa específica e Blaine dos cimentos e da cinza moída.

Tabela 10 - Resumo da caracterização dos aglomerantes

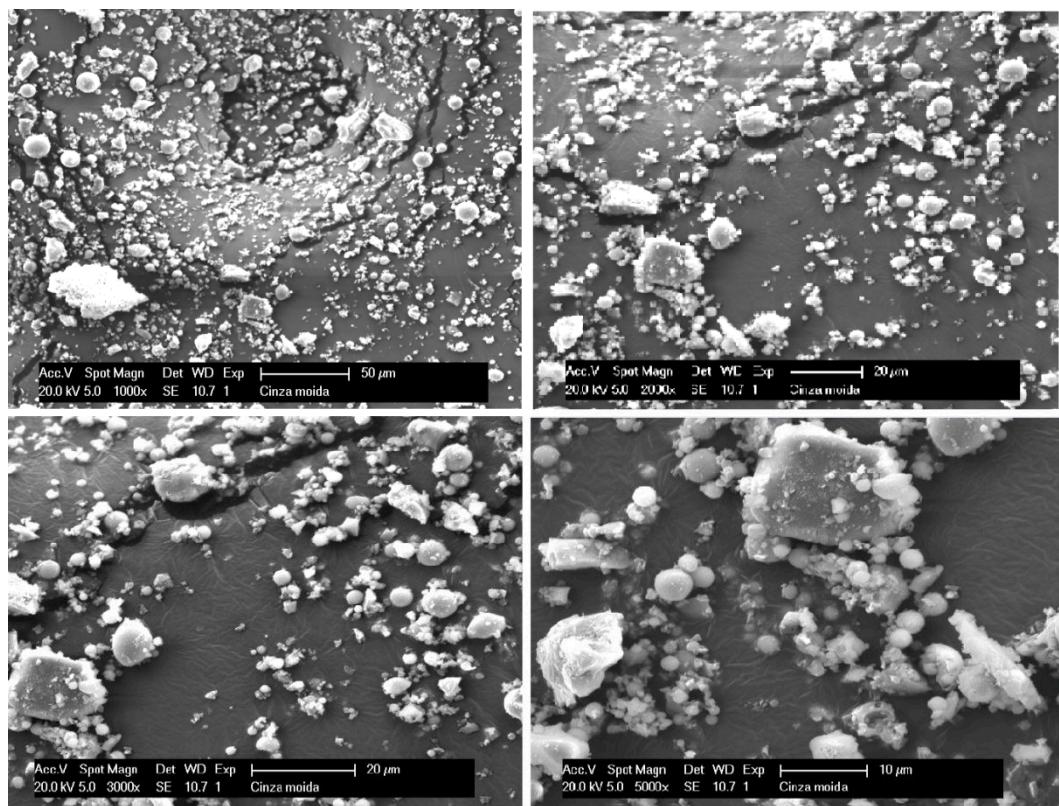
Aglomerante	Massa específica (g/cm³)	Blaine (cm²/g)
Cimento CP-V ARI A	3,05	4198
Cimento CP II-F-40 P	3,09	4749
Cimento CP-V ARI RS M	3,10	4786

Cinza Moída	2,67	6787
-------------	------	------

Fonte: Autor/Boletim Técnico/Apodi

Na Figura 2, podem ser visualizados MEVs da cinza moída com os aumentos de 1000, 2000, 3000 e 5000 vezes. Observa-se que há partículas com o formato esférico, apesar de a maioria possuir formato irregular, o que indica que, antes da moagem, as partículas apresentavam formato esférico que foi destruído, o que pode causar decréscimo na resistência à compressão dos concretos de referência quando incorporada a cinza moída, já que toda a estrutura da cinza foi destruída.

Figura 2 - MEV 1000x, 2000x, 3000x e 5000x



Fonte: Autor/Central Analítica UFC

3.3 Execução dos Traços

Os traços fornecidos pela usina de concreto possuem resistências características (f_{ck}), em Megapascal (MPa), de 30, 35 e 40 e foram testados com 0%, 8% e 15% de adição e substituição de cinza moída. A adição foi feita simplesmente adicionando a cinza moída no traço original sem fazer qualquer modificação, já a substituição foi feita retirando uma quantidade de cimento e substituindo pelo equivalente em volume de cinza moída. Além disso, foram utilizados três cimentos diferentes, sendo estes o CP-V ARI A, o CP II-F-40 P e o CP-V ARI RS M, resultando em uma quantidade de 45 traços produzidos, moldados e

testados quanto a sua resistência à compressão aos 7 e 28 dias. Na Tabela 11 há um resumo dos traços executados.

Tabela 11 - Resumo de Traços

fck(MPa)	Teores	Modos	Cimentos	Idades(dias)
30	8%	Adição	CP-V ARI A	7
35	15%	Substituição	CP II-F-40 P	28
40			CP-V ARI RS M	

Fonte: Autor.

O processo de produção desses traços se iniciou com a secagem do material, previamente coletado na usina de concreto, e com a estocagem do mesmo de forma a evitar contato com umidade. A secagem foi feita nas estufas mostradas na Figura 3.

Figura 3 - Estufas



Fonte: Autor

Estando os agregados já secos, começou o processo de pesagem dos traços. Cada um destes (30 MPa, 40 MPa e 50 MPa) possui uma quantidade diferente de agregados. Estes foram pesados e guardados em sacos plásticos em local seco. A pesagem foi realizada em uma balança devidamente tarada e nivelada com carga máxima de cinquenta quilogramas (Figura 4). O cimento foi pesado junto com os agregados e estocados no mesmo local.

Figura 4 - Balança



Fonte: Autor

No momento da produção o traço, foram pesados a água, o aditivo plastificante polifuncional redutor de água, e a cinza moída, que, juntamente com os agregados e o cimento, foram colocados na betoneira (Figura 5) seguindo o processo abaixo:

- Foram colocadas, na betoneira, a Brita 0 e a Brita 1 juntamente com metade da água pesada e misturou-se por um minuto.
- O cimento e a cinza moída foram adicionados e a betoneira foi ligada por mais um minuto.
- Foram adicionados a areia e quase todo o restante da água pesada e acionada novamente a betoneira por mais um minuto.
- O material preso as paredes da betoneira foi retirado e adicionado o aditivo plastificante, deixando misturar na betoneira por mais dois minutos.

Figura 5 - Betoneira Utilizada



Fonte: Autor

Após o término do processo citado acima, foi verificado se o concreto possui a consistência especificada pela dosagem, que é de 100mm de abatimento com tolerância de mais ou menos 20mm pelo teste de abatimento do tronco de cone, no qual o concreto foi colocado em um tronco de cone em três camadas de alturas iguais golpeadas, cada uma, 25 vezes com uma haste metálica, depois, o concreto foi rasado e o tronco de cone retirado em um intervalo entre 5s e 10s, e o resultado foi a diferença medida, em milímetros, da altura do tronco de cone e o meio da massa de concreto abatida (Figura 6), segundo a NBR NM 67(ABNT, 1998). A quantidade de aditivo plastificante, a fim de obter o abatimento desejado, foi dividida em no máximo três doses.

Figura 6 - Teste de abatimento do tronco de cone.



Fonte: Autor

A moldagem foi feita utilizando uma forma cilíndrica de diâmetro 10cm e altura 20cm, untada com óleo mineral e preenchida com concreto em uma única camada adensada mecanicamente segundo a NBR5738 (ABNT, 2015). Os Corpos de prova(CPs), um total de onze por traço (Figura 7), permaneceram em local coberto por 24h após a moldagem, para adquirir uma resistência inicial, quando foram desmoldados e colocados no tanque de cura (Figura 8) até a data do rompimento.

Figura 7 - Moldagem dos Corpos de Prova



Fonte: Autor

Figura 8 - Tanque de Cura Úmida



Fonte: Autor

As medidas de resistências dos concretos com e sem cinza moída foram obtidas a partir do rompimento por compressão axial dos CPs em uma prensa hidráulica

computadorizada (Figura 9). Estes foram retificados para a melhor distribuição de carga advindas da prensa. Foram rompidos no mínimo dois CPs por idade (7 e 28 dias), sendo, para casos em os valores de resistência à compressão encontrados para um mesmo traço foram muito divergentes, rompido CP extra. A norma que regeu o método dos rompimentos foi a NBR 5739 (ABNT, 1994).

Figura 9 - Prensa Hidráulica



Fonte: Autor

3.4 Análise dos Dados

A análise dos dados brutos, (Tabela A. 1 do Apêndice) foi feita utilizando o software *Statistica 7.0*, de forma a determinar quais variáveis independentes (tipo de cimento, tipo e teor de cinza) exercem influência significativa sobre a variável dependente (resistência à compressão).

Para todos os resultados obtidos, fez-se uma verificação dos dados atípicos, ou seja, aqueles que podem estar muito influenciados por fatores externos ao estudo, tais como erros de moldagem, erros no manuseio dos corpos de prova, erro de ensaio, etc. Esses dados atípicos foram calculados dividindo-se o resíduo da amostra pelo desvio-padrão do conjunto de dados, chamando-o de desvio padronizado (Z). O valor máximo do desvio padronizado, quando se considera um intervalo de confiança de 95%, é de $\pm 1,96$ (MONTGOMERY, 2010).

Os valores espúrios, ou seja, os que possuem resíduo padronizado superior a 1,96, foram retirados e foi refeito o processamento dos dados até que todos os valores espúrios tivessem sido retirados. Depois da exclusão desses dados, foi feito a análise variacional (ANOVA) de múltiplos fatores, para apontar quais variáveis (Cimento e Cinza Moída) são significativas na resistência à compressão do concreto.

A análise ANOVA feita nesse trabalho considera apenas os efeitos principais, ou seja a interação entre as variáveis não é considerada, por exemplo, com a análise realizada não há como saber se algum dos cimentos utilizados teve desempenho superior aos demais quando incorporado um dos teores de cinza, devido a uma interação entre estes dois materiais. A análise feita é mais geral, avaliando somente qual cimento apresenta desempenho superior, unindo os dados de todos os teores de cinza.

A ANOVA apenas indica que, pelo menos uma das médias, dos diferentes tratamentos (0%, 8% e 15% por exemplo), é significativamente diferente das demais, não indicando qual dos tratamentos está resultando nessa média diferente. Para isto, utilizou-se o teste de Duncan que, juntamente com os gráficos de comportamento, mostram qual dos tratamentos é significativamente diferente em relação aos outros.

4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Atividade Pozolânica

Como visto na seção 2.1, Cinzas leves de Termelétrica, existem várias exigências para que um material seja considerado pozolânico, a maioria dos dados pode ser obtida pelo ensaio de FRX que está exposto na Tabela 12.

Tabela 12 - FRX da Cinza

Óxidos	Quantidade (%)
Na ₂ O	0,00
MgO	0,77
Al ₂ O ₃	12,23
SiO ₂	40,99
SO ₃	1,24
Cl	0,06
K ₂ O	3,16
CaO	7,56
TiO ₂	3,35
MnO	0,25
Fe ₂ O ₃	29,38
NiO	0,12
ZnO	0,14
As ₂ O ₃	0,11
SrO	0,65

Fonte: Autor/Departamento de Física - UFC

Observa-se que a soma das porcentagens de óxidos de Ferro, Silício e Alumínio resulta em um valor de 82,60%, que a quantidade de SO₃ é de 1,24%, e que a quantidade de Na₂O é de 0,00%, não chegando a ser detectado. Esses parâmetros químicos mostram que a cinza se enquadra na classe C.

A NBR 12653 (ABNT, 2014) limita também o material retido na peneira 45 µm, que não pode ser superior a 34%. A cinza moída, conforme mostrado na Tabela 9, possui 90% do seu material menor que 10,163 µm, ou seja, apenas 10% da cinza moída é maior que 10,163 µm, satisfazendo a condição da norma com bastante folga.

A NBR 12653 (ABNT, 2014) também estabelece que a perda ao fogo deve ser inferior a 6% para a classe C. Este ensaio foi realizado no Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental da UFC. Os resultados demonstraram que a cinza moída não perdeu massa ao fogo, o que satisfaz mais um requisito para que a cinza moída seja considerada pozolânica.

O ensaio do índice de atividade pozolânica realizado, seguindo a NBR 5752 (ABNT, 2014), obteve o resultado mostrado na Tabela 13. Nota-se que a resistência média da argamassa com cinza moída foi maior que a da referência, superando a relação de 0,9.

Tabela 13 - Índice de Atividade Pozolânica

Agamassa	Espalhamento Médio (mm)	Resistência Média (MPa)
Referência	143	29,04
Cinza Moída	146	33,91

Fonte: Autor

A cinza moída é então um material pozolânico de acordo com os requisitos da NBR 12653 (ABNT, 2014).

4.2 Resistência à Compressão dos Concretos com Adição

4.2.1 Com a adição de cinza moída em concretos de 30 MPa

4.2.1.1 Idade de 7 dias

No Gráfico B. 1 tem-se os resíduos padronizados dos dados da resistência à compressão aos 7 dias para o concreto de 30 MPa com cinza moída em adição. Pode-se perceber que não há valores espúrios.

Na Tabela 14 tem-se a ANOVA dos resultados da resistência à compressão aos 7 dias dos concretos com cinza moída em adição. Pode-se verificar que, tanto o tipo de cimento quanto o teor de cinza, possuem efeito significativo sobre a resistência à compressão.

Tabela 14 - ANOVA dos dados de f_{c7} para 30MPa com cinza moída em adição

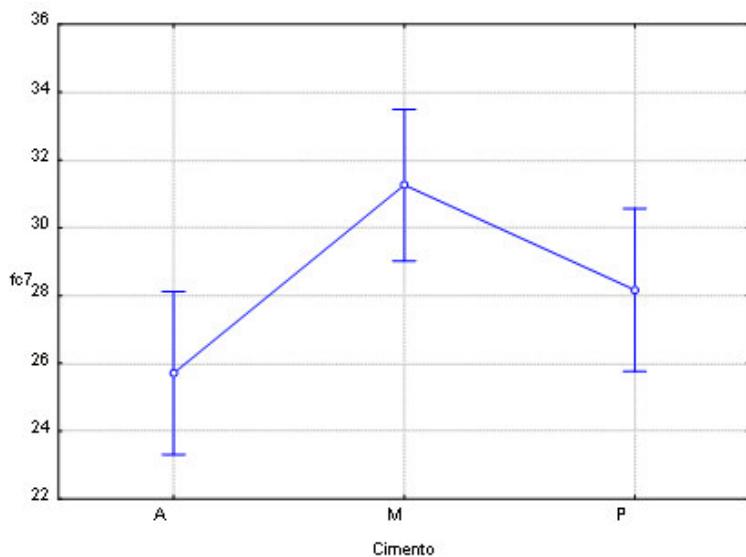
Efeito	Soma Quadrática	Graus de Liberdade	Média Quadrática	Valor F	Valor P
Interceção	15152,6	1	15152,6	2015,254	0,000000
Cimento	99,77	2	49,88	6,634	0,009403
Teor de Cinza	202,85	2	101,42	13,489	0,000543
Erro	105,27	14	7,52		

Fonte: Autor.

O Gráfico 5 e Gráfico 6 apresentam o comportamento da resistência à compressão em função do tipo de cimento e do teor de cinza, respectivamente, enquanto que a Tabela 15 e

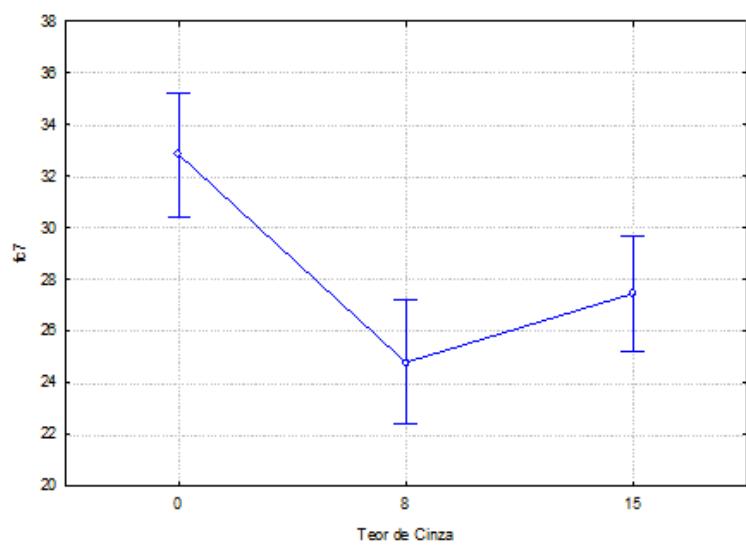
a Tabela 16 apresentam o resultado do teste de Duncan para esses resultados, respectivamente.

Gráfico 5 - Comportamento da resistência à compressão aos 7 dias do concreto de 30 MPa com cinza moída em adição quando se varia o tipo de cimento



Fonte: Autor.

Gráfico 6 - Comportamento da resistência à compressão aos 7 dias do concreto de 30 MPa com cinza moída em adição quando se varia o teor de cinza



Fonte: Autor.

Tabela 15 - Duncan para os dados de fc₇ para 30MPa com cinza moída em adição, considerando o tipo de cimento.

Cimento	Cimento CP-V ARI A (25,710MPa)	Cimento CP-V ARI RS M (31,126MPa)	Cimento CP II-F-40 P (28,163MPa)
Cimento CP-V ARI A	0,004656	0,134772	

Cimento CP-V ARI RS M	0,004656	0,075951
Cimento CP II-F-40 P	0,134772	0,075951

Fonte: Autor.

Tabela 16 - Duncan para os dados de f_{c7} para 30MPa com cinza moída em adição, considerando o teor de cinza.

Teor de cinza	0% (32,858MPa)	8% (24,802MPa)	15% (27,880MPa)
0		0,000254	0,006288
8	0,000254		0,066322
15	0,006288	0,066322	

Fonte: Autor

Conforme os resultados da Tabela 15 e da Tabela 16, pode-se verificar que o cimento Cimento CP-V ARI RS M apresenta uma maior resistência que os demais cimentos para este tipo de concreto, bem como a adição da cinza moída diminui a resistência do concreto de forma significativa. Diante disso infere-se que não é recomendável adicionar cinza moída nos teores de 8% e 15% no concreto de $f_{ck}=30$ MPa, uma vez que esses teores interferem na resistência do concreto aos 7 dias.

4.2.1.2 Idade de 28 dias

No Gráfico B. 2 tem-se os resíduos padronizados dos dados da resistência à compressão aos 28 dias para o concreto de 30 MPa com cinza moída em adição. Pode-se perceber que não há valores espúrios.

Na Tabela 17 tem-se a ANOVA dos resultados da resistência à compressão aos 28 dias dos concretos com cinza moída em adição. Pode-se verificar que apenas o tipo de cimento possui efeito significativo sobre a resistência à compressão nesta idade.

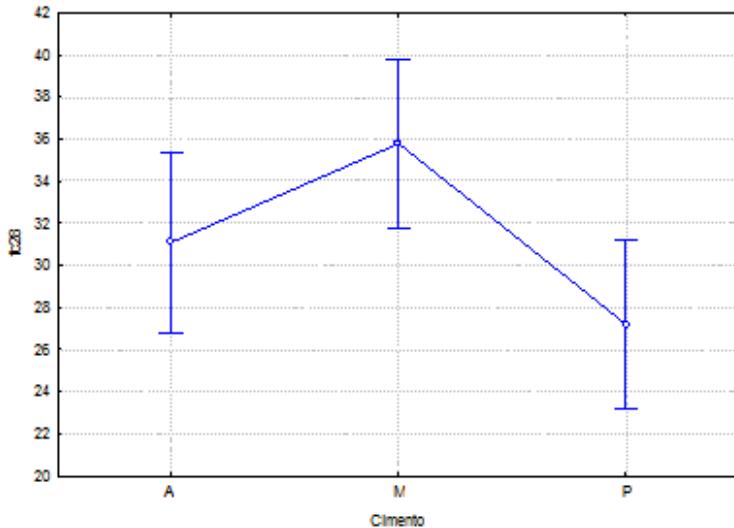
Tabela 17 - ANOVA dos dados de f_{c28} para 30MPa com cinza moída em adição

Efeito	Soma Quadrática	Graus de Liberdade	Média Quadrática	Valor F	Valor P
Interceção	19471,27	1	19471,27	802,9392	0,000000
Cimento	253,82	2	126,91	5,2334	0,018874
Teor de Cinza	44,2	2	22,1	0,9114	0,423102
Erro	363,75	15	24,25		

Fonte: Autor.

O Gráfico 7 apresenta o comportamento da resistência à compressão em função do tipo de cimento, enquanto que a Tabela 18 apresenta o resultado do teste de Duncan para esse resultado.

Gráfico 7- Comportamento da resistência à compressão aos 28 dias do concreto de 30 MPa com cinza moída em adição quando se varia o tipo de cimento.



Fonte: Autor.

Tabela 18 - Duncan para os dados de f_{c28} para 30MPa com cinza moída em adição, considerando o tipo de cimento.

Cimento	Cimento CP-V ARI A (31,092MPa)	Cimento CP-V ARI RS M(35,571MPa)	Cimento CP II-F-40 P (27,480MPa)
Cimento CP-V ARI A		0,118539	0,201753
Cimento CP-V ARI RS M	0,118539		0,011796
Cimento CP II-F-40 P	0,201753	0,011796	

Fonte: Autor.

Conforme os resultados da Tabela 18, pode-se verificar que o cimento Cimento CP II-F-40 P apresenta uma menor resistência que os demais cimentos para este tipo de concreto. Os dados da Tabela 17 indicam que o teor de cinza não se mostrou significativo. Diante disso infere-se que é possível adicionar cinza moída nos teores de 8% e 15% no concreto de $f_{ck}=30$ MPa, sem prejuízo à resistência à compressão para esta idade.

4.2.2 Com a adição de cinza moída em concretos de 35MPa

4.2.2.1 Idade de 7 dias

No Gráfico B. 3, tem-se os resíduos padronizados dos dados da resistência à compressão aos 7 dias para o concreto de 35 MPa com cinza moída em adição ao cimento. Pode-se perceber que não há valores espúrios.

Na Tabela 19, tem-se a ANOVA dos resultados da resistência à compressão aos 7 dias dos concretos com cinza moída em adição. Pode-se verificar que o teor de cinza possui efeito significativo sobre a resistência à compressão nesta idade.

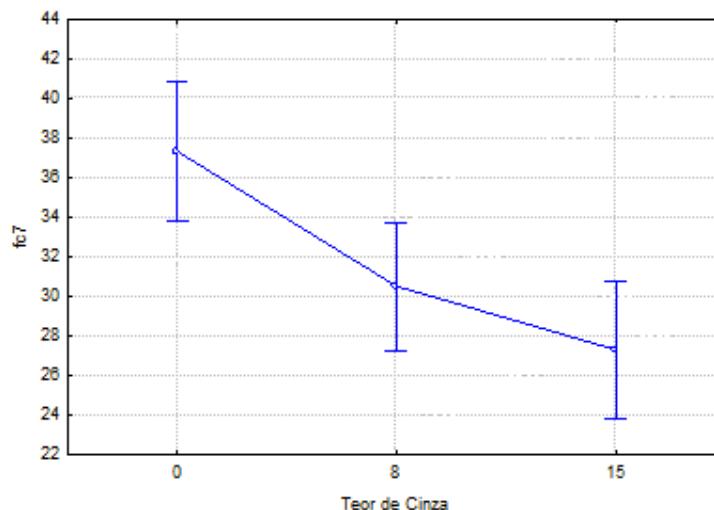
Tabela 19 - ANOVA dos dados de f_{c7} para 35MPa com cinza moída em adição ao cimento

Efeito	Soma Quadrática	Graus de Liberdade	Média Quadrática	Valor F	Valor P
Interceção	18920,23	1	18920,23	1198,478	0,000000
Cimento	57,14	2	28,57	1,810	0,199951
Teor de Cinza	315,93	2	157,97	10,006	0,002002
Erro	221,02	14	15,79		

Fonte: Autor

O Gráfico 8 apresenta o comportamento da resistência à compressão em função do teor de cinza enquanto que a Tabela 20 apresenta o resultado do teste de Duncan para esse resultado.

Gráfico 8- Comportamento da resistência à compressão aos 7 dias do concreto de 35 MPa com cinza moída em adição ao cimento, quando se varia o teor de cinza



Fonte: Autor

Tabela 20- Duncan para os dados de f_{c7} para 35MPa com cinza moída em adição ao cimento, considerando o teor de cinza

Teor de cinza	0%	8%	15%
0	(37,323MPa)		
8		0,011970	0,000767
15	0,000767	0,135050	

Fonte: Autor

Conforme os resultados da Tabela 20, pode-se verificar que a utilização dos teores de 8% e 15% de cinza não é viável, pois estes contribuem significativamente para a redução

da resistência à compressão do concreto com $f_{ck}=35$ MPa na idade de 7 dias. Já o tipo de cimento não tem influencia significativa nesta resistência.

4.2.2.2 Idade de 28 dias

No Gráfico B. 4 e no Gráfico B. 5, tem-se os resíduos padronizados dos dados da resistência à compressão aos 28 dias para o concreto de 35 MPa com cinza moída em adição ao cimento. Pode-se perceber que há valores espúrios, tendo sido estes excluídos.

Na Tabela 21, tem-se a ANOVA dos resultados da resistência à compressão aos 28 dias dos concretos com cinza moída em adição ao cimento. Pode-se verificar que tanto o tipo de cimento quanto o teor de cinza possuem efeito significativo sobre a resistência à compressão nesta idade.

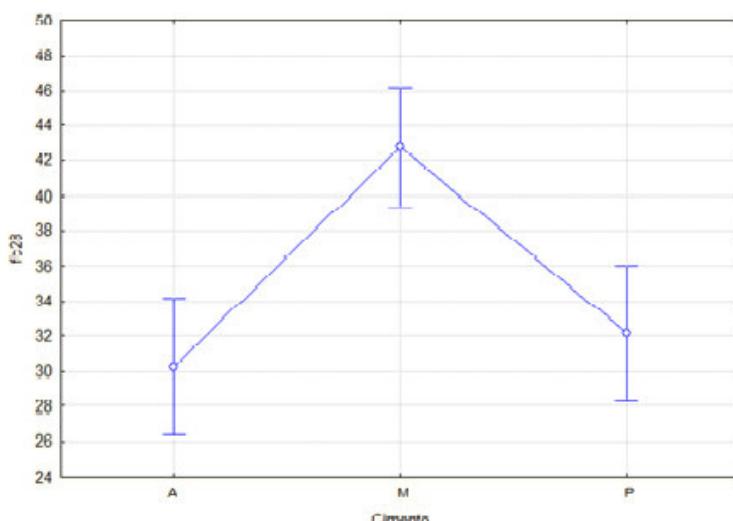
Tabela 21 - ANOVA dos dados de fc_{28} para 35MPa com cinza moída em adição

Efeito	Soma Quadrática	Graus de Liberdade	Média Quadrática	Valor F	Valor P
Interceção	24030,07	1	24030,07	1191,254	0,000000
Cimento	647,05	2	323,53	16,038	0,000188
Teor de Cinza	180,49	2	90,25	4,474	0,029937
Erro	302,58	15	20,17		

Fonte: Autor

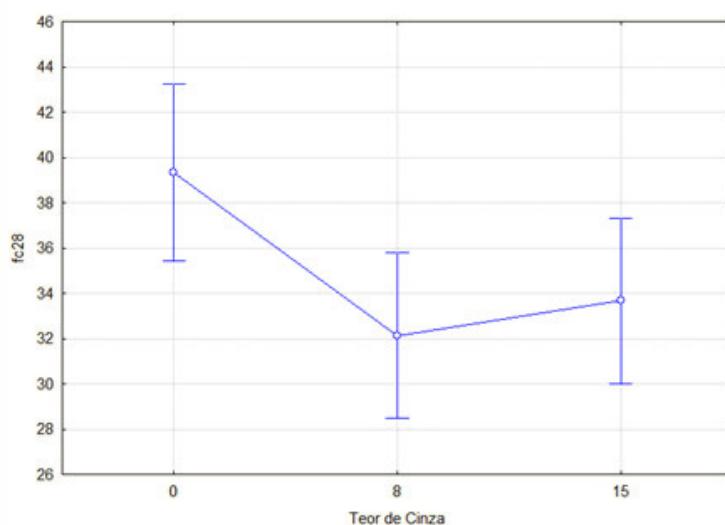
O Gráfico 9 e o Gráfico 10 apresentam o comportamento da resistência à compressão em função do tipo de cimento e do teor de cinza, respectivamente, enquanto que a Tabela 22 e a Tabela 23 apresentam o resultado do teste de Duncan para esses resultados, respectivamente.

Gráfico 9- Comportamento da resistência à compressão aos 28 dias do concreto de 35MPa com cinza moída em adição, quando se varia o tipo de cimento



Fonte: Autor

Gráfico 10 - Comportamento da resistência à compressão aos 28 dias do concreto de 35MPa com cinza moída em adição, quando se varia o teor de cinza



Fonte: Autor

Tabela 22 - Duncan para os dados de fc28 para 35MPa com cinza moída em adição, considerando o tipo de cimento.

Cimento	Cimento CP-V ARI A (30,247MPa)	Cimento CP-V ARI RS M (42,216MPa)	Cimento CP II-F-40 P (32,138MPa)
Cimento CP-V ARI A		0,000375	0,452092
Cimento CP-V ARI RS M	0,000375		0,001159
Cimento CP II-F-40 M	0,452092	0,001159	

Fonte: Autor

Tabela 23 - Duncan para os dados de fc28 para 35MPa com cinza moída em adição, considerando o teor de cinza.

Teor de cinza	0% (39,333MPa)	8% (33,240MPa)	15% (34,766MPa)
0		0,032297	0,083960
8	0,032297		0,545628
15	0,083960	0,545628	

Fonte: Autor

Conforme os resultados da Tabela 22 e da Tabela 23, pode-se verificar que o concreto com Cimento CP-V ARI RS M apresenta resistências superiores aos dos demais cimentos e que o concreto sem cinza moída apresenta resistências superiores às dos concretos com teor de cinza de 8%, porém o teor de 15% não apresenta diferença significativa em relação à referência. Diante disso, infere-se que não é recomendável substituir cimento por cinza moída no teor de 8% concreto de $f_{ck}=35$ MPa, uma vez que há influência negativa na resistência do concreto aos 28 dias.

4.2.3 Com a adição de cinza moída em concretos de 40MPa

4.2.3.1 Idade de 7 dias

No Gráfico B. 6, tem-se os resíduos padronizados dos dados da resistência à compressão aos 7 dias para o concreto de 40 MPa com cinza moída em adição. Pode-se perceber que não há valores espúrios.

Na Tabela 24, tem-se a ANOVA dos resultados da resistência à compressão aos 7 dias dos concretos com cinza moída em adição. Pode-se verificar que apenas o teor de cinza possui efeito significativo sobre a resistência à compressão.

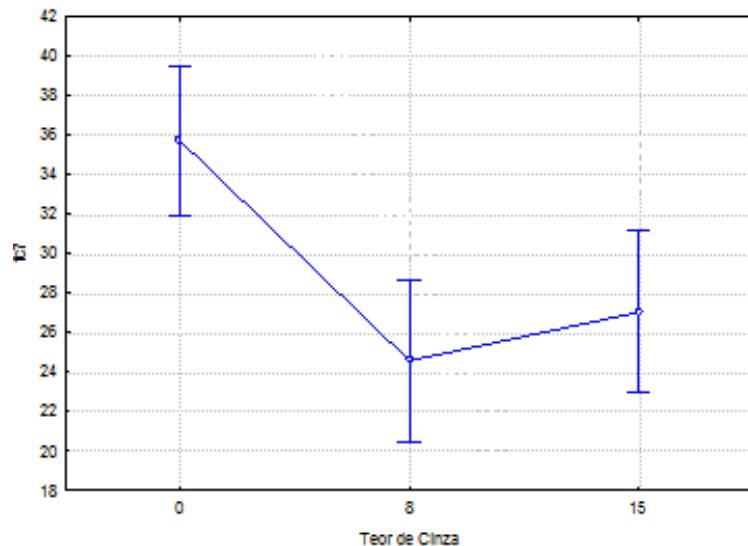
Tabela 24 - ANOVA dos dados de f_{c7} para 40MPa com cinza moída em adição

Efeito	Soma Quadrática	Graus de Liberdade	Média Quadrática	Valor F	Valor P
Interceção	15948,68	1	15948,68	732,3813	0,000000
Cimento	141,68	2	70,84	3,2531	0,069134
Teor de Cinza	447,69	2	223,85	10,2793	0,001791
Erro	304,87	14	21,78		

Fonte: Autor

O Gráfico 11 apresenta o comportamento da resistência à compressão em função do teor de cinza, enquanto que a Tabela 25 apresenta o resultado do teste de Duncan para esse resultado.

Gráfico 11 - Comportamento da resistência à compressão aos 7 dias do concreto de 40 MPa com adição de cinza moída quando se varia o teor de cinza



Fonte: Autor

Tabela 25 - Duncan para os dados de fc7 para 40MPa com cinza moída em adição, considerando o teor de cinza.

Teor de cinza	0% (36,114MPa)	8% (24,580MPa)	15% (27,043MPa)
0		0,000906	0,004062
8	0,000906		0,364903
15	0,004062	0,364903	

Fonte: Autor

Conforme os resultados da Tabela 25 pode-se verificar que os teores de cinza de 8% e 15% reduzem a resistência à compressão dos concretos nesta idade. Diante disso infere-se que não é recomendável adicionar cinza moída nos teores de 8% e 15% no concreto de $f_{ck}=40$ MPa, uma vez que esses teores interferem na resistência do concreto aos 7 dias

4.2.3.2 Idade de 28 dias

No Gráfico B. 7, tem-se os resíduos padronizados dos dados da resistência à compressão aos 28 dias para o concreto de 40 MPa com cinza moída em adição. Pode-se perceber que não há valores espúrios.

Na Tabela 26, tem-se a ANOVA dos resultados da resistência à compressão aos 28 dias dos concretos com cinza moída em adição. Pode-se verificar que tanto o tipo de cimento quanto o teor de cinza possuem efeito significativo sobre a resistência à compressão nesta idade.

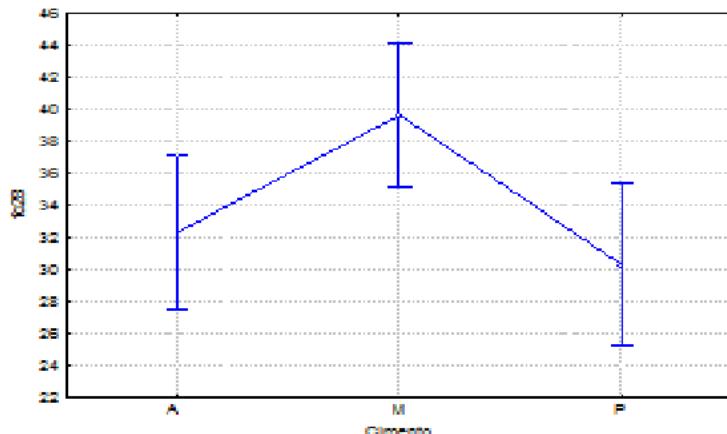
Tabela 26 - ANOVA dos dados de fc28 para 40MPa com cinza moída em adição

Efeito	Soma Quadrática	Graus de Liberdade	Média Quadrática	Valor F	Valor P
Interceção	30819,31	1	30819,31	662,035	0,000000
Cimento	440,62	2	220,31	4,733	0,019522
Teor de Cinza	424,83	2	212,42	4,563	0,021994
Erro	1024,15	22	46,55		

Fonte: Autor

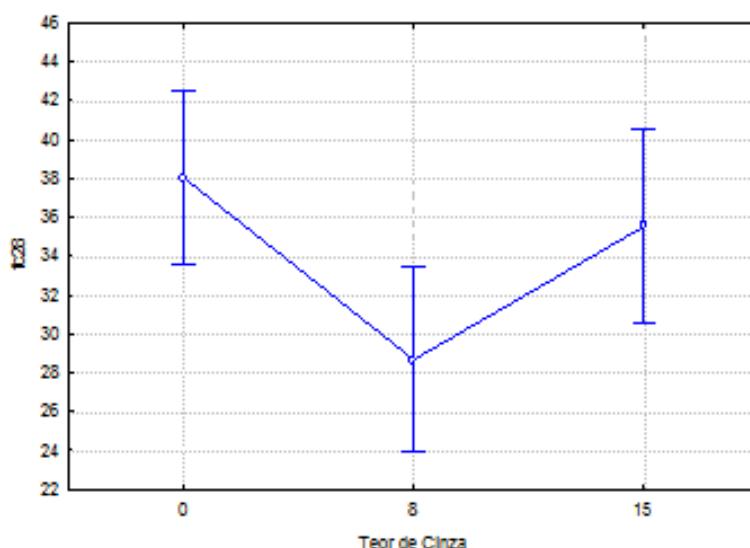
O Gráfico 12 e o Gráfico 13 apresentam o comportamento da resistência à compressão em função do tipo de cimento e do teor de cinza, respectivamente, enquanto que a Tabela 27 e a Tabela 28 apresentam o resultado do teste de Duncan para esses resultados, respectivamente.

Gráfico 12 - Comportamento da resistência à compressão aos 28 dias do concreto de 40 MPa com cinza moída em adição, quando se varia o tipo de cimento



Fonte: Autor

Gráfico 13 - Comportamento da resistência à compressão aos 28 dias do concreto de 40 MPa com adição de cinza moída quando se varia o teor de cinza



Fonte: Autor

Tabela 27 - Duncan para os dados de f_{c28} para 40MPa com cinza moída em adição, considerando o tipo de cimento.

Cimento	Cimento CP-V ARI A (33,79MPa)	Cimento CP-V ARI RS M (39,078MPa)	Cimento CP II-F-40 P (30,116MPa)
Cimento CP-V ARI A		0,091655	0,323522
Cimento CP-V ARI RS M	0,091655		0,014467
Cimento CP II-F-40 P	0,323522	0,014467	

Fonte: Autor

Tabela 28 - Duncan para os dados de fc28 para 40MPa com cinza moída em adição, considerando o teor de cinza.

Teor de cinza	0% (37,878MPa)	8% (29,481MPa)	15% (36,001MPa)
0		0,021087	0,567224
8	0,021087		0,056001
15	0,567224	0,056001	

Fonte: Autor

Conforme os resultados da Tabela 27 e da Tabela 28, pode-se verificar que o Cimento CP II-F-40 P apresenta uma menor resistência em relação ao Cimento CP-V ARI RS M, porém não apresenta diferença significativa em relação ao Cimento CP-V ARI A. Já a adição de cinza moída diminui a resistência do concreto de forma significativa no percentual de 8%, e, utilizando 15% de adição, não houve diferença significativa.

Diante disso infere-se que não é recomendável adicionar cinza moída no teor de 8%, porém é possível utilizar 15% de adição no concreto de $f_{ck}=40$ MPa, uma vez que esse teor não interfere na resistência do concreto aos 28 dias.

4.3 Resistências à Compressão dos Concretos com Substituição

4.3.1 Com cinza moída como substituição ao cimento em concretos de 30MPa

4.3.1.1 Idade de 7 dias

No Gráfico B. 8, tem-se os resíduos padronizados dos dados da resistência à compressão aos 7 dias para o concreto de 30 MPa com cinza moída em substituição. Pode-se perceber que não há nenhum resultado espúrio.

Na Tabela 29, tem-se a ANOVA dos resultados da resistência à compressão aos 7 dias dos concretos com cinza moída em substituição ao cimento. Pode-se verificar que tanto o tipo de cimento quanto o teor de cinza possuem efeito significativo sobre a resistência à compressão nesta idade.

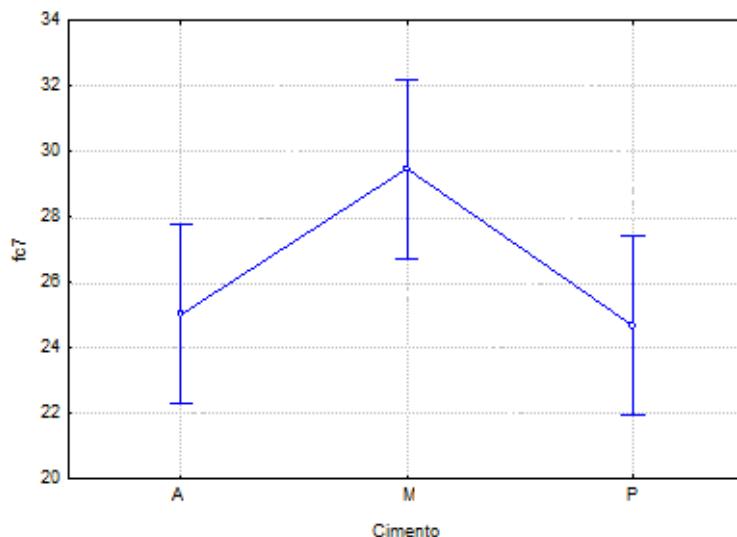
Tabela 29 - ANOVA dos dados de fc7 para 30MPa com cinza moída em substituição

Efeito	Soma Quadrática	Graus de Liberdade	Média Quadrática	Valor F	Valor P
Interceção	12542,64	1	12542,64	1304,663	0,000000
Cimento	85,89	2	42,94	4,467	0,033371
Teor de Cinza	375,91	2	187,95	19,551	0,000121
Erro	124,98	13	9,61		

Fonte: Autor

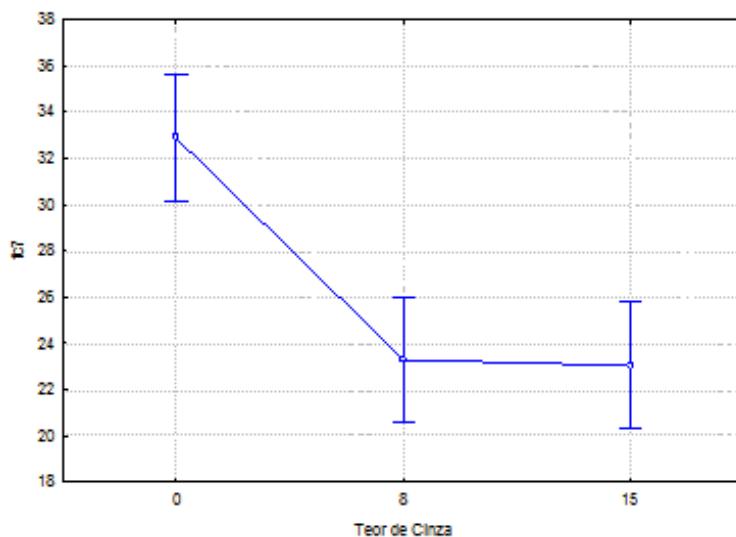
O Gráfico 14 e Gráfico 15 apresentam o comportamento da resistência à compressão em função do tipo de cimento e do teor de cinza, respectivamente, enquanto que a Tabela 30 e a Tabela 31 apresentam o resultado do teste de Duncan para esses resultados, respectivamente.

Gráfico 14 - Comportamento da resistência à compressão aos 7 dias do concreto de 30 MPa com cinza moída em substituição, quando se varia o tipo de cimento



Fonte: Autor

Gráfico 15 - Comportamento da resistência à compressão aos 7 dias do concreto de 30 MPa com cinza moída em substituição, quando se varia o teor de cinza



Fonte: Autor

Tabela 30 - Duncan para os dados de fc7 para 30MPa com cinza moída em substituição, considerando o tipo de cimento.

Cimento	Cimento CP-V ARI A (25,028MPa)	Cimento CP-V ARI RS M (29,480MPa)	Cimento CP II-F-40 P (24,683MPa)
Cimento CP-V ARI A		0,027408	0,850278
Cimento CP-V ARI RS M	0,027408		0,02363

Cimento CP II-F-40 P 0,850278 0,02363

Fonte: Autor

Tabela 31 - Duncan para os dados de f_{c7} para 30MPa com cinza moída em substituição, considerando o teor de cinza.

Teor de Cinza	0% (32,858MPa)	8% (23,293MPa)	15% (23,040MPa)
0		0,000303	0,000224
8	0,000303		0,889768
15	0,000224	0,889768	

Fonte: Autor

Conforme os resultados da Tabela 30 e da Tabela 31 pode-se verificar que o cimento Cimento CP-V ARI RS M apresenta resistências superiores que os demais cimentos e que o concreto sem cinza moída apresenta resistências superiores que os concretos com cinzas. Diante disso infere-se que não é recomendável substituir cimento por cinza moída no concreto de $f_{ck}=30$ MPa, uma vez que para 8% e 15% há influência negativa na resistência do concreto aos 7 dias.

4.3.1.2 Idade de 28 dias

No Gráfico B. 9, tem-se os resíduos padronizados dos dados da resistência à compressão aos 28 dias para o concreto de 30 MPa com cinza moída em substituição. Pode-se perceber que não há nenhum resultado espúrio.

Na Tabela 32, tem-se a ANOVA dos resultados da resistência à compressão aos 28 dias dos concretos com cinza moída em substituição ao cimento.

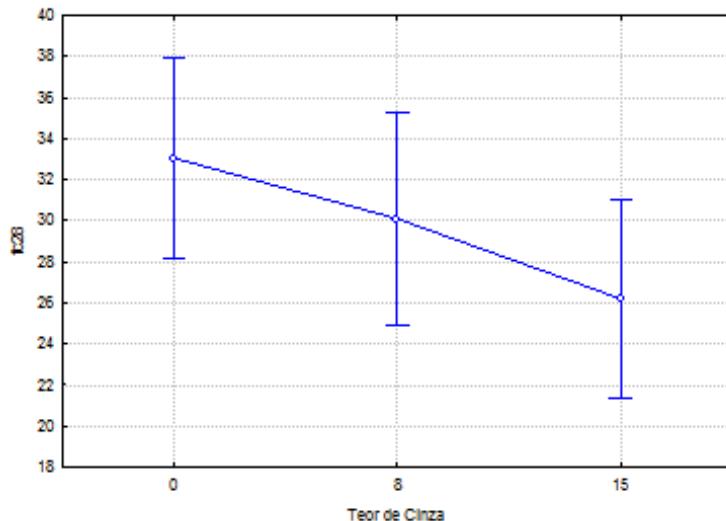
Tabela 32 - ANOVA dos dados de f_{c28} para 30MPa com cinza moída em substituição

Efeito	Soma Quadrática	Graus de Liberdade	Média Quadrática	Valor F	Valor P
Interceção	17555,40	1	17555,40	488,7843	0,000000
Cimento	55,78	2	27,89	0,7765	0,477656
Teor de Cinza	161,90	2	80,95	2,2539	0,139358
Erro	538,75	15	35,92		

Fonte: Autor

Pode-se verificar que nenhuma das variáveis independentes (tipo de cimento e teor de cinza) possui efeito significativo sobre a resistência à compressão nesta idade. Diante disso infere-se que é possível substituir cimento por cinza moída no teor de até 15% no concreto de $f_{ck}=30$ MPa. Contudo deve-se destacar que numericamente os valores obtidos para os concretos com teores de cinza de 8% e 15% foram inferiores (Gráfico 16), bem como a tendência de queda no valor da resistência na medida em que se substitui o cimento pela cinza moída.

Gráfico 16- Comportamento da resistência à compressão aos 28 dias do concreto de 30 MPa com cinza moída em substituição, quando se varia o teor de cinza



Fonte: Autor

4.3.2 Com cinza moída como substituição ao cimento em concretos de 35MPa

4.3.2.1 Idade de 7 dias

No Gráfico B. 10, tem-se os resíduos padronizados dos dados da resistência à compressão aos 7 dias para o concreto de 35 MPa com cinza moída em substituição ao cimento. Pode-se perceber que não há valores espúrios.

Na Tabela 33, tem-se a ANOVA dos resultados da resistência à compressão aos 7 dias dos concretos com cinza moída em substituição ao cimento. Pode-se verificar que o teor de cinza possui efeito significativo sobre a resistência à compressão nesta idade.

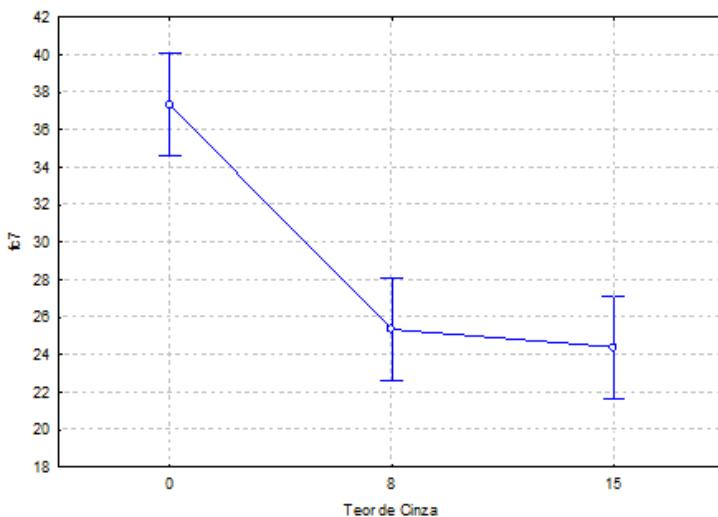
Tabela 33 - ANOVA dos dados de f_{c7} para 35MPa com cinza moída em substituição ao cimento

Efeito	Soma Quadrática	Graus de Liberdade	Média Quadrática	Valor F	Valor P
Interceção	15162,95	1	15162,95	1589,588	0,000000
Cimento	57,36	2	28,68	3,006	0,084495
Teor de Cinza	622,59	2	311,29	32,634	0,000009
Erro	124,01	13	9,54		

Fonte: Autor

O Gráfico 17 apresenta o comportamento da resistência à compressão em função do tipo de cimento enquanto que a Tabela 34 apresenta o resultado do teste de Duncan para esse resultado.

Gráfico 17 - Comportamento da resistência à compressão aos 7 dias do concreto de 35 MPa com cinza moída em substituição ao cimento, quando se varia o teor de cinza



Fonte: Autor

Tabela 34 - Duncan para os dados de f₇ para 35MPa com cinza moída em substituição ao cimento, considerando o teor de cinza

Teor de cinza	0% (37,323MPa)	8% (25,345MPa)	15% (24,403MPa)
0		0,000198	0,000098
8	0,000198		0,606489
15	0,000098	0,606489	

Fonte: Autor

Conforme os resultados da Tabela 34, pode-se verificar que a utilização dos teores de 8% e 15% de cinza não é viável, pois estes contribuem significativamente para a redução da resistência à compressão do concreto com $f_{ck}=35$ MPa na idade de 7 dias. Já o tipo de cimento não tem influência significativa nesta resistência.

4.3.2.2 Idade de 28 dias

No Gráfico B. 11, no Gráfico B. 12 e no Gráfico B. 13, tem-se os resíduos padronizados dos dados da resistência à compressão aos 28 dias para o concreto de 35 MPa com cinza moída em substituição ao cimento. Pode-se perceber que há valores espúrios, tendo sido estes excluídos.

Na Tabela 35, tem-se a ANOVA dos resultados da resistência à compressão aos 28 dias dos concretos com cinza moída em substituição ao cimento. Pode-se verificar que o teor de cinza possui efeito significativo sobre a resistência à compressão nesta idade.

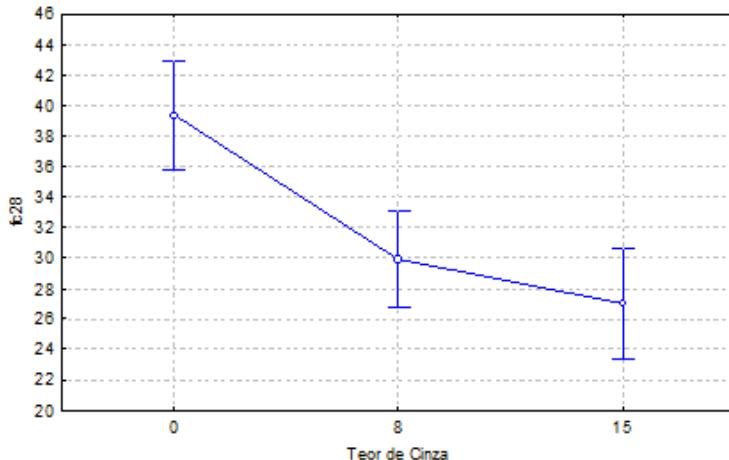
Tabela 35 - ANOVA dos dados de fc28 para 35MPa com cinza moída em substituição ao cimento

Efeito	Soma Quadrática	Graus de Liberdade	Média Quadrática	Valor F	Valor P
Interceção	20149,98	1	20149,98	1148,536	0,000000
Cimento	48,70	2	24,35	1,388	0,279865
Teor de Cinza	505,24	2	252,62	14,399	0,000323
Erro	263,16	15	17,54		

Fonte: Autor

O Gráfico 18 apresenta o comportamento da resistência à compressão em função do tipo de cimento enquanto que a Tabela 36 apresenta o resultado do teste de Duncan para esse resultado.

Gráfico 18 - Comportamento da resistência à compressão aos 28 dias do concreto de 35MPa com cinza moída em substituição ao cimento, quando se varia o teor de cinza



Fonte: Autor

Tabela 36 -Duncan para os dados de fc28 para 35MPa com cinza moída em substituição ao cimento, considerando o teor de cinza

Teor de cinza	0%	8%	15%
0		0,000925	0,000193
8	0,000925		0,276658
15	0,000193	0,276658	

Fonte: Autor

Conforme os resultados da Tabela 36, pode-se verificar que a utilização dos teores de 8% e 15% de cinza não é viável, pois estes contribuem significativamente para a redução da resistência à compressão do concreto com $f_{ck}=35$ MPa na idade de 28 dias. Já o tipo de cimento não tem influência significativa nesta resistência.

4.3.3 Com cinza moída como substituição ao cimento em concretos de 40MPa

4.3.3.1 Idade de 7 dias

No Gráfico B. 14, tem-se os resíduos padronizados dos dados da resistência à compressão aos 7 dias para o concreto de 40 MPa com cinza moída em substituição. Pode-se perceber que não há valores espúrios.

Na Tabela 37, tem-se a ANOVA dos resultados da resistência à compressão aos 7 dias dos concretos com cinza moída em substituição. Pode-se verificar que apenas o teor de cinza possui efeito significativo sobre a resistência à compressão.

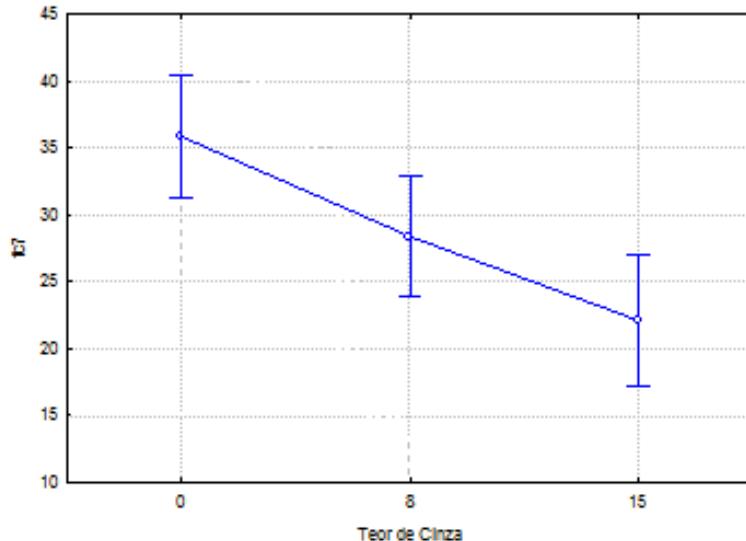
Tabela 37 - ANOVA dos dados de f_{c7} para 40MPa com cinza moída em substituição

Efeito	Soma Quadrática	Graus de Liberdade	Média Quadrática	Valor F	Valor P
Interceção	16178,33	1	16178,33	514,8469	0,000000
Cimento	39,90	2	19,95	0,6349	0,543668
Teor de Cinza	615,22	2	307,61	9,7892	0,001904
Erro	471,35	15	31,42		

Fonte: Autor

O Gráfico 19 apresenta o comportamento da resistência à compressão em função do teor de cinza, enquanto que a Tabela 38 apresenta o resultado do teste de Duncan para esse resultado.

Gráfico 19 - Comportamento da resistência à compressão aos 7 dias do concreto de 40 MPa com substituição de cinza moída quando se varia o teor de cinza



Fonte: Autor

Tabela 38 - Duncan para os dados de fc7 para 40MPa com cinza moída em substituição, considerando o teor de cinza.

Teor de cinza	0% (36,114MPa)	8% (28,636MPa)	15% (22,067MPa)
0		0,028296	0,000574
8	0,028296		0,049894
15	0,000574	0,049894	

Fonte: Autor

Conforme os resultados da Tabela 38 pode-se verificar que os teores de cinza de 8% e 15% reduzem a resistência à compressão dos concretos nesta idade. Diante disso infere-se que não é recomendável substituir cimento por cinza moída nos teores de 8% e 15% no concreto de $f_{ck}=40$ MPa, uma vez que esses teores interferem na resistência do concreto aos 7 dias.

4.3.3.2 Idade de 28 dias

No Gráfico B. 15, tem-se os resíduos padronizados dos dados da resistência à compressão aos 28 dias para o concreto de 40 MPa com cinza moída em substituição. Pode-se perceber que não há valores espúrios.

Na Tabela 39 tem-se a ANOVA dos resultados da resistência à compressão aos 28 dias dos concretos com cinza moída em substituição. Pode-se verificar que tanto o tipo de cimento quanto o teor de cinza possuem efeito significativo sobre a resistência à compressão nesta idade.

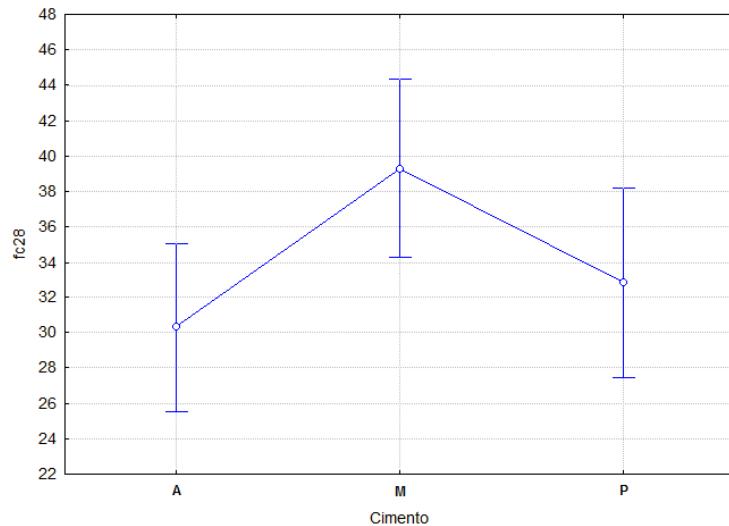
Tabela 39 - ANOVA dos dados de fc28 para 40MPa com cinza moída em substituição

Efeito	Soma Quadrática	Graus de Liberdade	Média Quadrática	Valor F	Valor P
Interceção	26571,43	1	26571,43	583,0873	0,000000
Cimento	356,01	2	178,01	3,9062	0,037930
Teor de Cinza	328,35	2	164,18	3,6027	0,047146
Erro	865,83	19	45,57		

Fonte: Autor

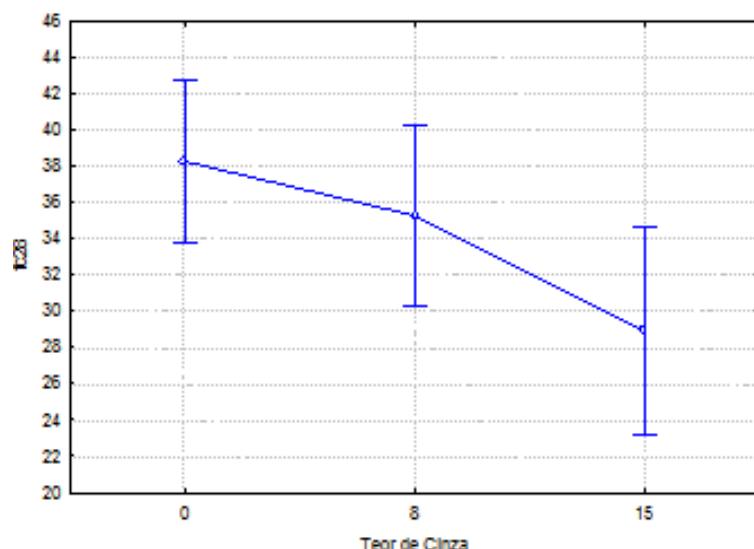
O Gráfico 20 e o Gráfico 21 apresentam o comportamento da resistência à compressão em função do tipo de cimento e do teor de cinza, respectivamente, enquanto que a Tabela 40 e a Tabela 41 apresentam o resultado do teste de Duncan para esses resultados, respectivamente.

Gráfico 20 - Comportamento da resistência à compressão aos 28 dias do concreto de 40 MPa com substituição de cimento cinza moída quando se varia o tipo de cimento



Fonte: Autor

Gráfico 21 - Comportamento da resistência à compressão aos 28 dias do concreto de 40 MPa com substituição de cimento por cinza moída quando se varia o teor de cinza



Fonte: Autor

Tabela 40 - Duncan para os dados de fc₂₈ para 40MPa com substituição de cimento por cinza moída, considerando o tipo de cimento.

Cimento	Cimento CP-V ARI A (31,352MPa)	Cimento CP-V ARI RS M (39,963MPa)	Cimento CP II-F-40 P (33,407MPa)
Cimento CP-V ARI A		0,025531	0,552074
Cimento CP-V ARI RS M	0,025531		0,068549
Cimento CP II-F-40 P	0,552074	0,068549	

Fonte: Autor

Tabela 41 - Duncan para os dados de fc28 para 40MPa com cinza moída em substituição, considerando o teor de cinza.

Teor de cinza	0% (37,878MPa)	8% (35,435MPa)	15% (28,910MPa)
0		0,487565	0,022488
8	0,487565		0,074027
15	0,022488	0,074027	

Fonte: Autor

Conforme os resultados da Tabela 40 e da Tabela 41, pode-se verificar que o cimento Cemento CP-V ARI RS M apresenta uma maior resistência que o Cemento CP-V ARI A e não apresenta diferença significativa com o Cemento CP II-F-40 P, e os cimentos Cemento CP-V ARI A e o Cemento CP II-F-40 P não apresentam diferença significativa entre si. Já a substituição de cimento por cinza moída diminui a resistência do concreto de forma significativa no percentual de 15%, já, utilizando 8% de substituição, não houve diferença significativa.

Diante disso infere-se que é possível adicionar cinza moída no teor de 8%, porém não é recomendável utilizar 15% de adição no concreto de $f_{ck}=40$ MPa, uma vez que esse teor não interfere na resistência do concreto aos 28 dias.

Tabela 42 - Resumo dos Resultados

Compressão	Modo	Idade	Resultado Cimento	Resultado Cinza
30MPa	Adição	7	S (CP-V ARI RS M maior)	S (8% e 15% diminuíram)
		28	S (CP II-F-40 P menor)	N
	Substituição	7	S (CP-V ARI RS M maior)	S (8% e 15% diminuíram)
		28	N	N (8% e 15% numericamente menor)
35MPa	Adição	7	N	S(8% e 15% diminuíram)
		28	S (CP-V ARI RS M maior)	S (8% diminuiu)
	Substituição	7	N	S (8% e 15% diminuíram)
		28	N	S (8% e 15% diminuíram)
40MPa	Adição	7	N	S (8% e 15% diminuíram)
		28	S (CP-V ARI RS M maior que CP II-F-40 P)	S(8% diminuiu)
	Substituição	7	N	S (8% e 15% diminuíram)
		28	S (CP-V M maior que CP-V A)	S (15% diminuiu)

Fonte: Autor

5 CONCLUSÕES

A NBR 12653 (ABNT, 2014) trata dos requisitos para que um material possa ser considerado pozolânico, nos quais a cinza moída passou. Dentre eles há a soma dos óxidos de silício, ferro e alumínio, que é um dos principais requisitos relacionados à reatividade da pozolana. Porém, segundo K. Wesche (1991), cinzas com teor de SiO₂ inferior à 35% são praticamente inativas como pozolana, no entanto essas cinzas podem possuir soma dos óxidos de silício, ferro e alumínio maior do que o requisitado por norma. Gobbi (2014) afirma que a NBR 5752 (ABNT, 2014) desconsidera parâmetros importantes para a atividade pozolânica, por exemplo, área específica, características físico-químicas, teor de material amorfo e taxa de reação ao longo do tempo. Logo, conclui-se que, apesar de a NBR 12653 (ABNT, 2014) ser um bom indicador da pozolânicidade do material, este não deve ser o principal critério utilizado para garantir o sucesso da sua utilização no concreto.

A partir dos resultados obtidos, que podem ser vistos em resumo na Tabela 42, é possível concluir que a cinza moída, quando incorporada ao concreto, reduz significativamente a resistência aos 7 dias em todos os casos analisados, o que pode ser grave para aplicações em estruturas pretendidas, já que estas são solicitadas exatamente aos 7 dias.

Na idade de 28 dias, o concreto de 30 MPa não apresentou modificação significativa na sua resistência quando adicionado cinza nem quando substituído cimento por cinza, apesar de, no caso da substituição, os valores encontrados mostrarem uma tendência de diminuição da resistência. Para os concretos de 35 MPa e 40 MPa, em adição, o teor de 8% diminuiu a resistência aos 28 dias, sendo que o teor de 15% não apresentou modificação significativa, apesar de ser numericamente menor tanto no concreto de 35 MPa quanto no de 40 MPa. Para o concreto de 35 MPa, em substituição, houve queda de resistência em ambos os teores. Para o concreto de 40 MPa, em substituição, houve queda significativa apenas no teor de 15%, apesar de, no teor de 8%, a resistência ter sido menor que a da referência.

Analizando de forma geral os dados encontrados, nota-se uma tendência de, com incorporação da cinza moída no concreto, haver uma queda na resistência à compressão do concreto, tornando inviável a sua utilização nos concretos estudados.

Apesar de Yazici e Arel (2012) mostrarem que, com a moagem da cinza, o potencial reativo aumenta, não há como extrapolar os resultados encontrados por eles para este estudo, uma vez que as cinzas são quimicamente diferentes e o estudo realizado por Yazici e Arel (2012) utilizam uma cinza de Blaine máximo 5239 cm²/g, enquanto que a cinza utilizada nesse estudo possui Blaine 6787 cm²/g. Supõe-se então que, caso Yazici e Arel

(2012) tivessem moído a cinza para obter valores maiores de Blaine, o comportamento da resistência a compressão do concreto, com o aumento do Blaine, poderia se tornar parabólico com concavidade voltada para baixo.

Outra justificativa pode ser encontrada na moagem da cinza. Quando observada a Figura 2, onde vê-se o MEV, os formatos dos grãos são uma mistura de pouquíssimas partículas esféricas e muitas partículas de formato irregular, denotando que houve uma quase total destruição do formato original dos grãos, o que pode ter causado algum efeito deletério nos concretos estudados.

A partir dos dados mostrados na Tabela 42, as superioridades ou inferioridades apresentadas por alguns cimentos não se perpetuaram, sendo portanto pontuais. Logo conclui-se que não há nenhuma cimento com desempenho superior aos demais.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Sugere-se que uma análise, considerando a interação entre a cinza e o tipo de cimento seja realizada, pois não foi possível, a partir do estudo realizado, encontrar qual cimento provoca comportamento diferente na resistência à compressão quando é incorporada a cinza. Este tipo de análise mais complexa poderia indicar que alguns dos cimentos, com a incorporação de cinza, por exemplo, podem apresentar desempenho superior aos dos outros.

Pode ser sugerido que, a partir de um concreto de referência (0% de cinza), sejam produzidos traços com incorporação (substituição ou adição) de um percentual fixo de cinza, variando o nível de moagem, medido pela finura Blaine, e avaliar o comportamento do concreto.

Nos concretos de 30MPa, aos 28 dias, analisados neste trabalho, não houve diferença significativa em relação à referência, diferente do que ocorreu nos concretos de 35 MPa e 40 MPa que as suas resistências diminuíram. Sugere-se que sejam produzidos concretos com resistência característica menor que 30MPa com a incorporação da cinza moída para verificar se os resultados encontrados revelam um tendência real de maior eficácia da utilização da cinza moída nesses concretos de maior relação água cimento.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (Org.). **Guia básico de utilização do cimento portland.** 7. ed. São Paulo: Abcp, 2002. 28 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653:** Materiais pozolânicos. Rio de Janeiro, 2014. 3 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12655:** Concreto de cimento Portland – Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento Rio de Janeiro, 2015. 23 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738:** Concreto — Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2015. 9 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739:** Concreto - Ensaio de compressão decorpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 1994. 4 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5752:** Materiais pozolânicos – Determinação do índice de desempenho com cimento Potland aos 28 dias. Rio de Janeiro, 2014. 4 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118:** Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 2014. 238 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215:** Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1996. 8 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215:** Agregados para concreto - Especificação. Rio de Janeiro, 2005. 11 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8953:** Concreto para fins estruturais – Classificação pela massa específica por grupos de resistência e consistência. Rio de Janeiro, 2015. 3 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9202:** Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da finura por meio da peneira 0,044mm. Rio de Janeiro, 1985. 4 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 23:** Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2001. 5 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248:** Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003. 6 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 45:** Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios . Rio de Janeiro, 2006. 7 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 52:** Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2003. 6 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 53**: Agregado graúdo - Determinação de massa específica, massa específicaaparente e absorção de água . Rio de Janeiro, 2002. 8 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 67**: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998. 8 p. BAUER, Luiz Alfredo Falcão. **MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO**. São Paulo: Ltc, 1994. 471 p.

AZEVEDO, Aires Fernando Fernandes Leite Camões de. **Betões de Elevado Desempenho com Incorporação de Cinzas Volantes**. 2002. 456 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade do Minho Escola de Engenharia, Guimarães, 2002.

BRANCO, Péricio de Moraes. **Carvão Mineral**. 2014. Disponível em: <<http://www.cprm.gov.br/publique/Redes-Institucionais/Rede-de-Bibliotecas---Rede-Ametista/Canal-Escola/Carvao-Mineral-2558.html>>. Acesso em: 06 jul. 2017.

CASIMIRO, Lucas. **Laboratório viabiliza novas aplicações de cinzas de carvão**. 2017. Disponível em: <<http://www.agencia.ufc.br/laboratorio-da-ufc-viabiliza-novas-aplicacoes-de-cinzas-de-carvao/>>. Acesso em: 20 nov. 2017.

EDP. **DADOS TÉCNICOS**. [2011]. Disponível em: <<http://www.edp.com.br/geracao-renovaveis/geracao/ceara/energia-pecem/A-Usina/Paginas/Dados-Tecnicos.aspx>>. Acesso em: 20 nov. 2017.

ENEVA. **Geração de Energia**. [2013]. Disponível em: <<http://www.eneva.com.br/nossos-negocios/geracao-de-energia/>>. Acesso em: 20 nov. 2017.

GOBBI, Andressa. **ATIVIDADE POZOLÂNICA DE ADIÇÕES MINERAIS PELAS NBR 5751/2012 E NBR 5752/2012: UMA ANÁLISE CRÍTICA A PARTIR DE MÉTODOS COMPLEMENTARES**. 2014. 143 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Construção Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014

ISAIA, Geraldo Cechella et al. (Ed.). **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. 2. ed. São Paulo: Ibracon, 2010. 1774 p

K. WESCHE (Ed.). **Fly Ash in Concrete Properties and Performance**: Report of Technical Committee 67-FAB Use of Fly Ash in Building RILEM. London: Chapman & Hall, 1991. 284 p.

MEHTA, P. Kumar; MONTEIRO, Paulo J. M.. **Concrete**: Microstructure, Properties, and Materials. 3. ed. Berkeley: McGraw-hill, 2006. 659 p.

MONTGOMERY, Douglas C.. **Design and analysis of experiments**. 5. ed. Tempe: John Wiley & Sons, Inc., 2010. 684p.

NEVILLE, A. M.. **Properties of concrete**. 5. ed. London: Pearson, 2011. 799 p.

PEDROSO, Fábio Luís. **Concreto:** as origens e a evolução do material construtivo mais usado pelo homem. *Concreto e Construções*, São Paulo, v. 1, n. 53, p.14-19, mar. 2009.

SILVA, M. G. **Influência da cura térmica em pastas e argamassas de cimentos de escória de alto-forno.** São Paulo: USP, 1998. 232p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Departamento de Engenharia de Construção Civil da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.

TUTIKIAN, B. F.; MOLIN, D. dal. Comparativo das propriedades do concreto autoadensável (CAA) utilizando areia fina e cinza volante. **Revista Ibracon de Estruturas e Materiais**, São Paulo, v. 4, n. 2, p.263-276, jun. 2011.

YAZICI, Semsi; AREL, Hasan Sahan. Effects of fly ash fineness on the mechanical properties of concrete. **Sadhana – Academy Proceedings In Engineering Sciences**, Bangalore, v. 37, n. 3, p.389-403, jun. 2012.

7 APÊNDICES

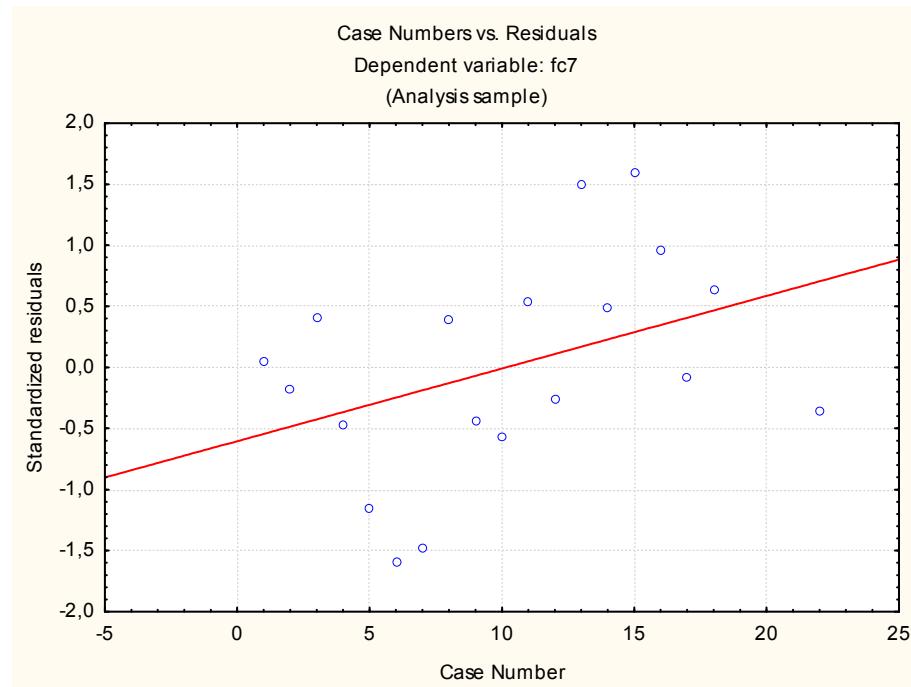
Tabela A. 1- Resistência a Compressão dos Concretos - Dados Brutos

Fck	Marca	Cinza (%)	Modo	7 Dias			28 Dias		
30	CP-V A	0	-	30,31	28,64	-	41,79	38,26	
35	CP-V A	0	-	32,56	34,53	-	39,31	39,45	
40	CP-V A	0	-	32,08	37,02	-	44,34	35,43	33,38 25,52
30	CP II-F-40 P	0	-	28,60	35,30	-	30,18	21,73	24,48
35	CP II-F-40 P	0	-	42,86	38,54	-	33,94	34,41	
40	CP II-F-40 P	0	-	40,72	33,75	-	33,23	43,14	26,85
30	CP-V M	0	-	34,45	39,85	-	35,99	36,81	
35	CP-V M	0	-	38,27	37,18	-	24,52	42,74	46,15
40	CP-V M	0	-	43,77	34,45	31,01	35,85	54,16	46,88
30	CP-V A	8	Adição	21,64	23,62		26,11	27,16	
35	CP-V A	8	Adição	34,23	28,80		23,51	22,36	
40	CP-V A	8	Adição	24,09	27,52		30,65	34,83	
30	CP-V A	15	Adição	25,94	24,11		26,66	26,57	
35	CP-V A	15	Adição	25,10	25,97		26,81	30,04	
40	CP-V A	15	Adição	31,73	27,65		37,59	30,13	28,54
30	CP II-F-40 P	8	Adição	25,64	24,36		26,28	27,73	
35	CP II-F-40 P	8	Adição	28,59	23,79		31,34	32,44	
40	CP II-F-40 P	8	Adição	19,74	20,33		22,50	28,77	29,48
30	CP II-F-40 P	15	Adição	26,07	29,01		31,37	30,59	
35	CP II-F-40 P	15	Adição	28,10	23,14		32,74	27,96	
40	CP II-F-40 P	15	Adição	19,78	18,08		27,48	29,48	
30	CP-V M	8	Adição	24,54	29,01		40,62	37,50	
35	CP-V M	8	Adição	28,05	40,03	32,44	44,28	38,61	40,14

40	CP-V M	8	Adição	25,17	30,63		29,53	35,97	22,81	30,79
30	CP-V M	15	Adição	25,96	34,72	29,35	37,02	31,59	29,47	
35	CP-V M	15	Adição	31,54	29,92		48,79	32,95	44,07	
40	CP-V M	15	Adição	29,99	35,03		37,08	46,03	51,68	
30	CP-V A	8	Substituição	23,90	24,62		25,81	24,83		
35	CP-V A	8	Substituição	21,20	25,86		21,83	33,88	28,49	
40	CP-V A	8	Substituição	22,64	26,54		31,98	24,00	28,17	
30	CP-V A	15	Substituição	23,50	19,20		22,10	26,75		
35	CP-V A	15	Substituição	20,95	23,95		27,72	24,64		
40	CP-V A	15	Substituição	21,73	25,85		28,82	30,53		
30	CP II- F-40 P	8	Substituição	18,04	18,95		30,30	28,75		
35	CP II- F-40 P	8	Substituição	23,13	22,32		22,88	32,82	32,52	
40	CP II- F-40 P	8	Substituição	23,06	21,18		32,96	34,71		
30	CP II- F-40 P	15	Substituição	25,04	22,17		27,96	33,70		
35	CP II- F-40 P	15	Substituição	26,03	27,71		29,94	27,19		
40	CP II- F-40 P	15	Substituição	23,67	25,29		31,87	31,09		
30	CP-V M	8	Substituição	25,74	28,51		33,99	36,85		
35	CP-V M	8	Substituição	27,09	32,47		32,02	32,65		
40	CP-V M	8	Substituição	39,78	31,10	36,15	47,50	40,76	43,40	
30	CP-V M	15	Substituição	26,04	22,29		23,62	31,37	19,80	
35	CP-V M	15	Substituição	22,12	25,66		29,90	22,74	23,81	
40	CP-V M	15	Substituição	19,44	16,42		26,60	24,55		

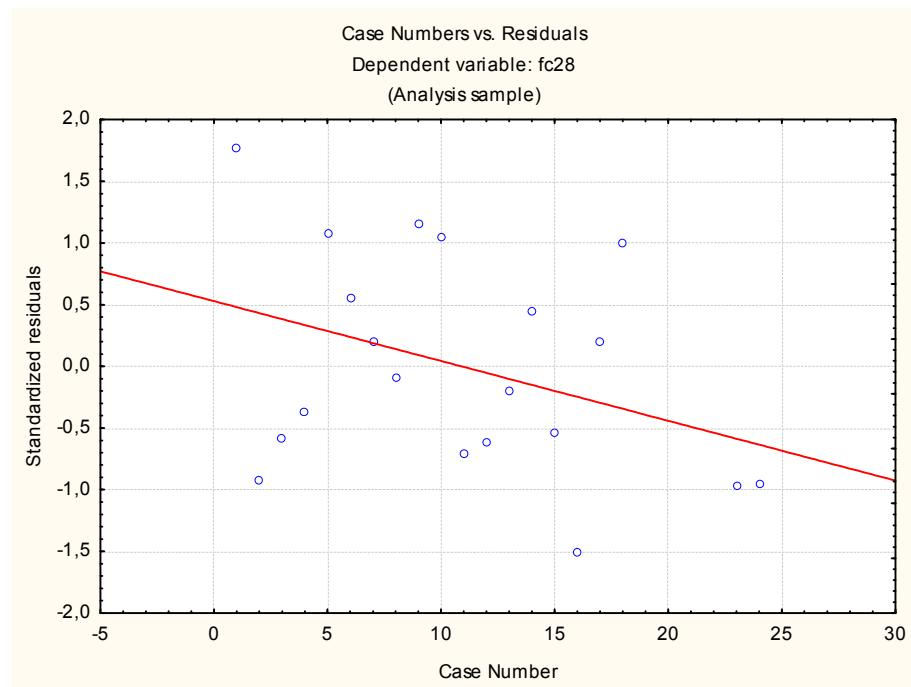
Fonte: Autor

Gráfico B. 1 - Resíduos padronizados dos dados de fc7 para 30MPa com cinza moída em adição



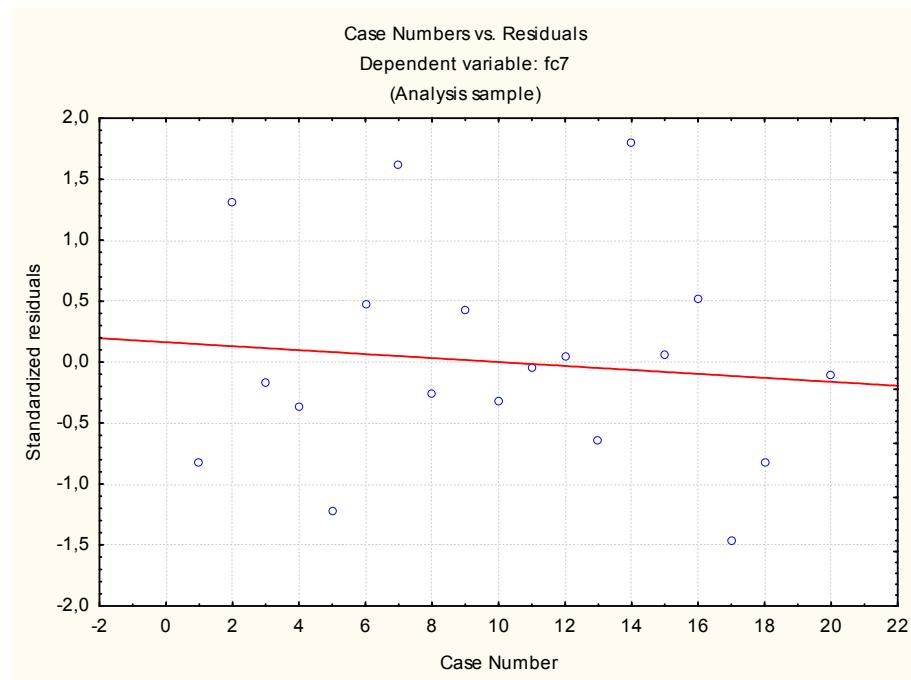
Fonte: Autor

Gráfico B. 2 - Resíduos padronizados dos dados de fc28 para 30MPa com cinza moída em adição



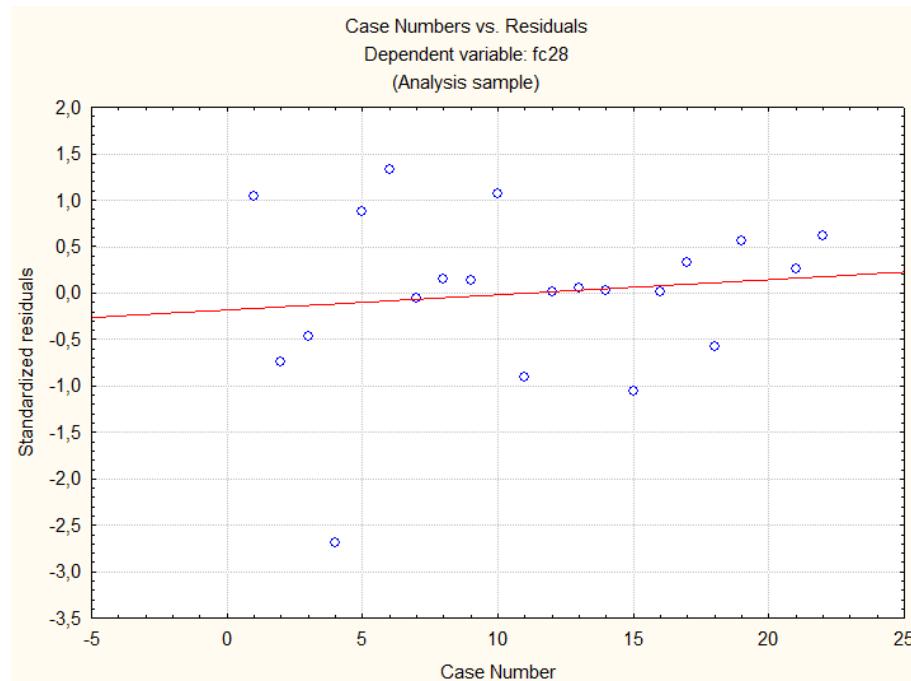
Fonte: Autor

Gráfico B. 3 - Resíduos padronizados dos dados de fc7 para 35MPa com cinza moída em adição ao cimento



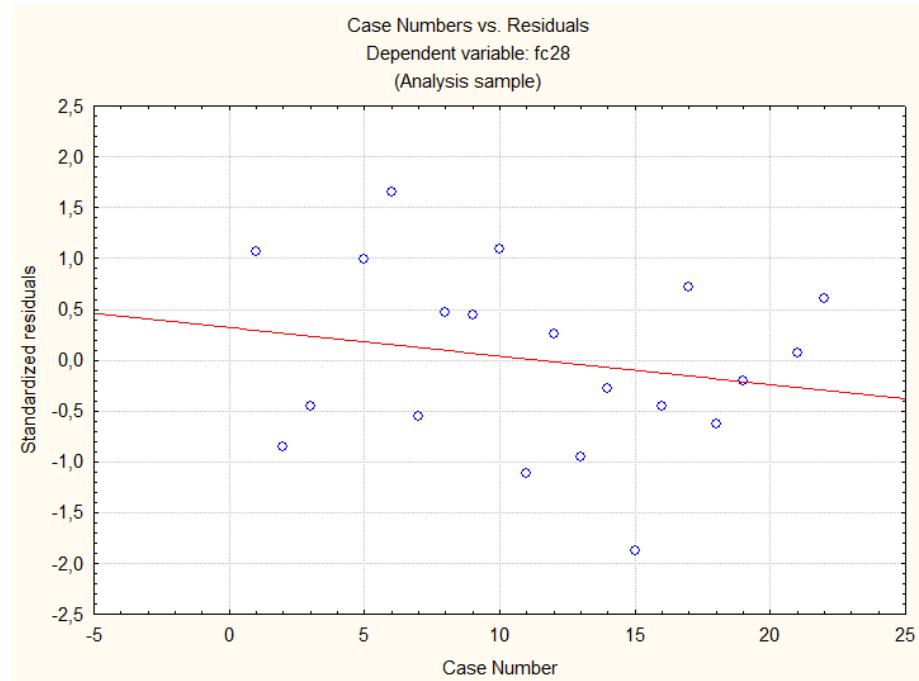
Fonte: Autor

Gráfico B. 4 - Resíduos padronizados dos dados de fc28 para 35MPa com cinza moída em adição ao cimento – 1^a rodada



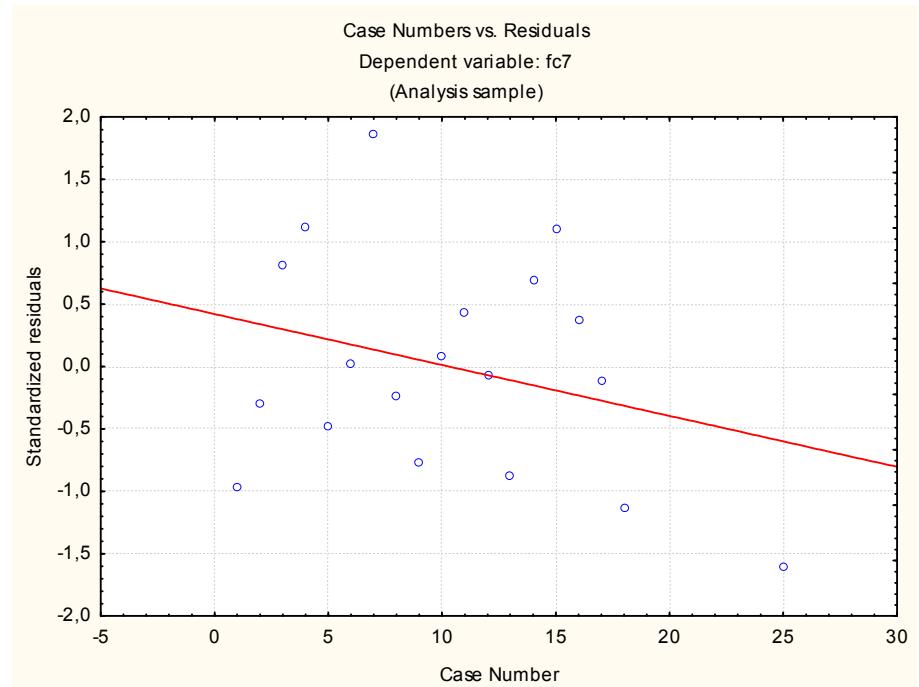
Fonte: Autor

Gráfico B. 5 - Resíduos padronizados dos dados de fc28 para 35MPa com cinza moída em adição ao cimento– 2^a rodada



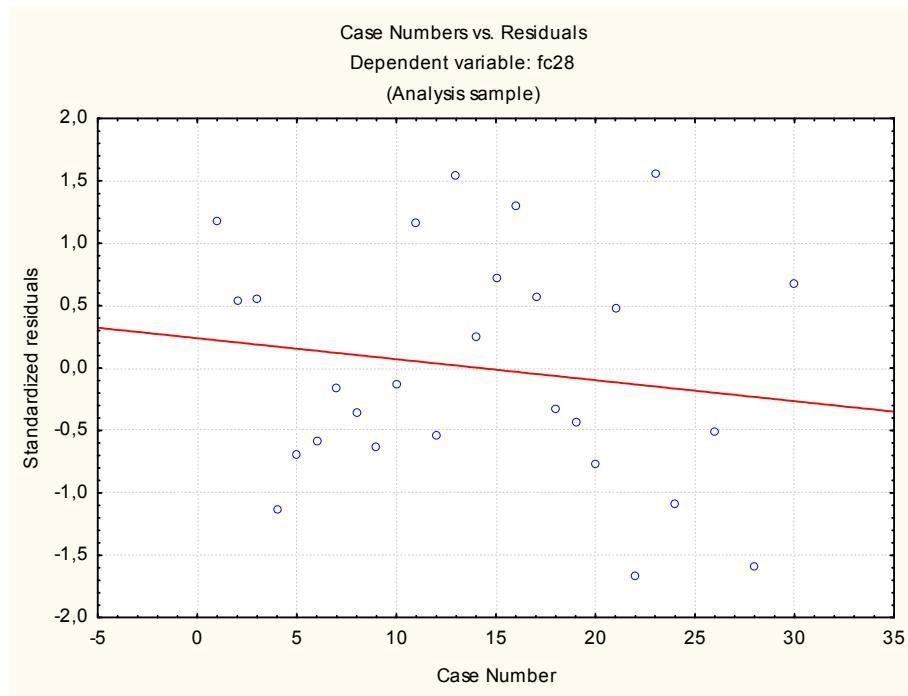
Fonte: Autor

Gráfico B. 6 - Resíduos padronizados dos dados de fc7 para 40MPa com adição de cinza moída



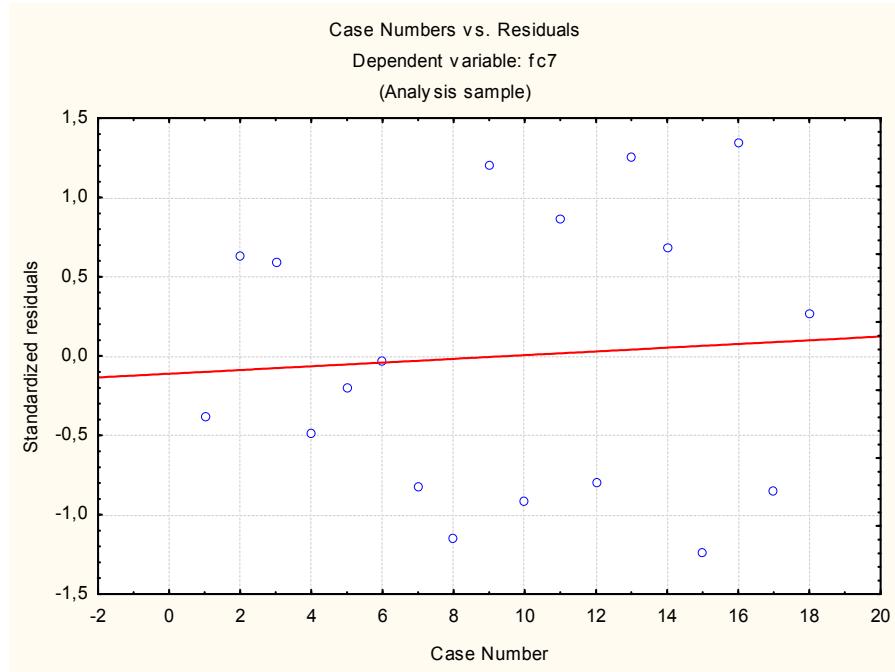
Fonte: Autor

Gráfico B. 7 - Resíduos padronizados dos dados de fc28 para 40MPa com adição de cinza moída



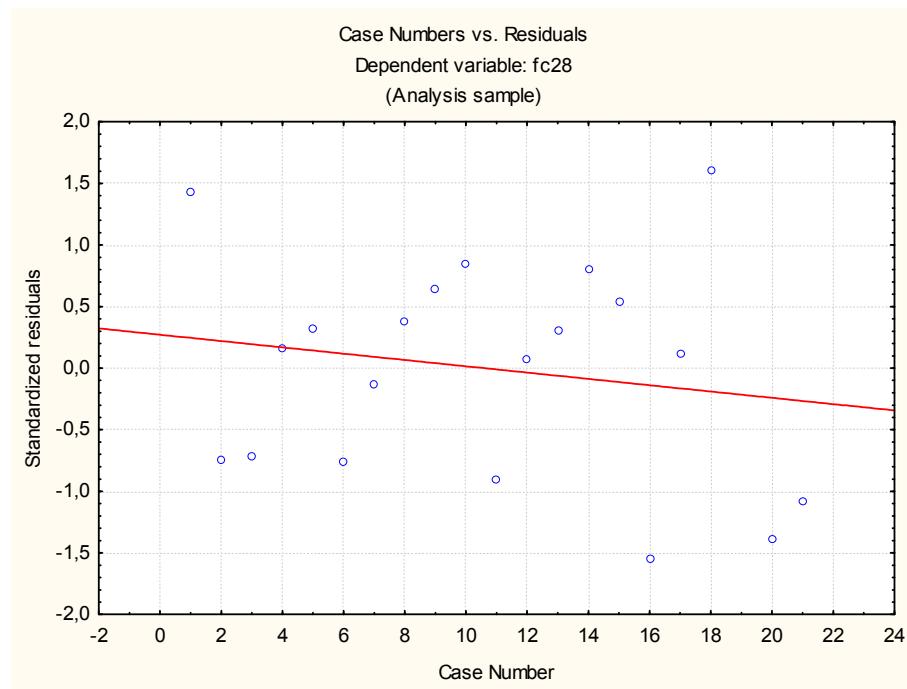
Fonte: Autor

Gráfico B. 8 - Resíduos padronizados dos dados de fc7 para 30MPa com cinza moída em substituição



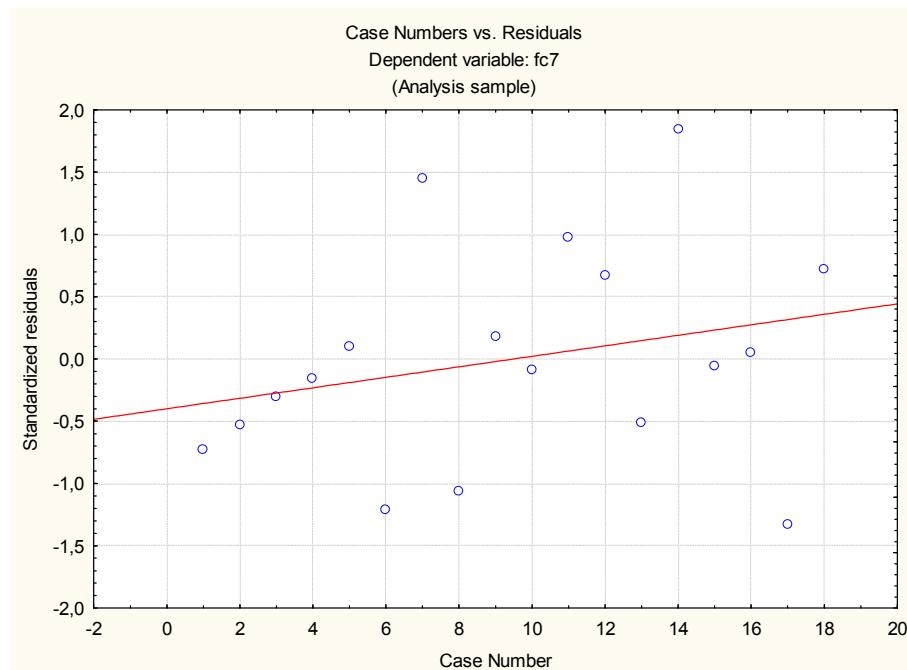
Fonte: Autor

Gráfico B. 9 - Resíduos padronizados dos dados de fc28 para 30MPa com cinza moída em substituição



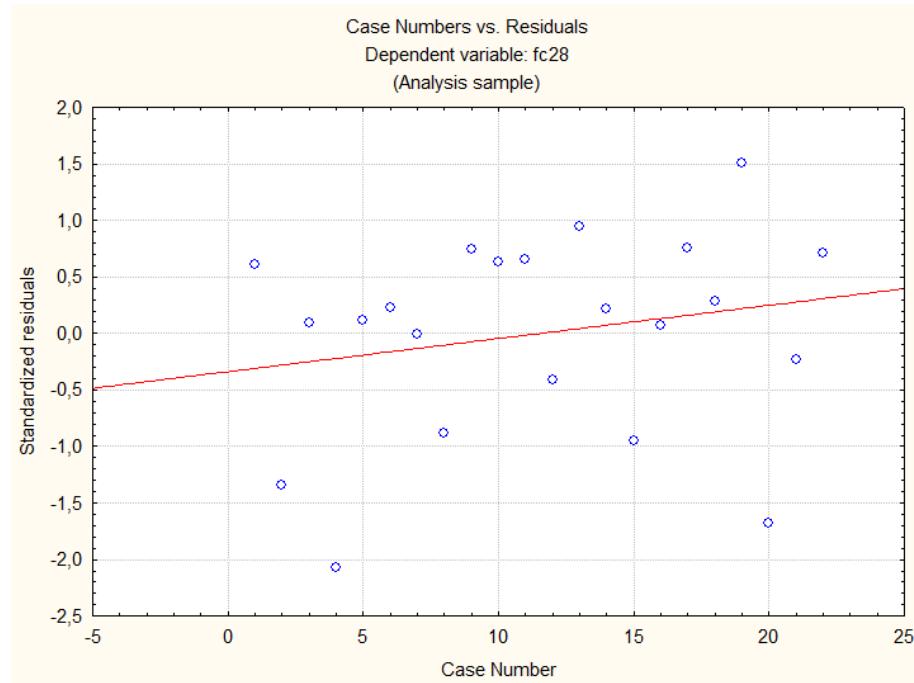
Fonte: Autor

Gráfico B. 10 - Resíduos padronizados dos dados de fc7 para 35MPa com cinza moída em substituição ao cimento



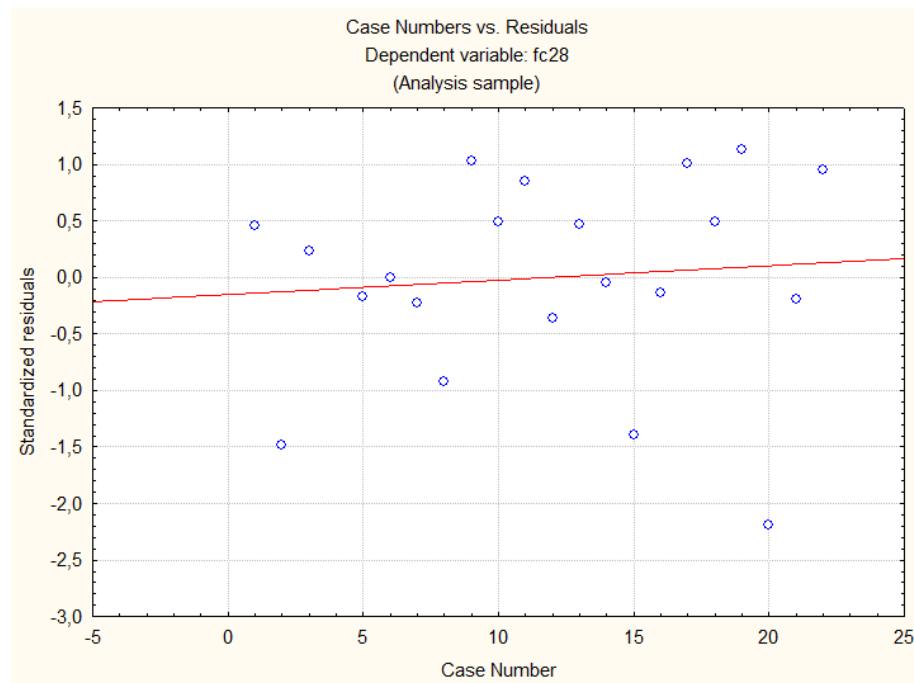
Fonte: Autor

Gráfico B. 11 - Resíduos padronizados dos dados de fc28 para 35MPa com cinza moída em substituição ao cimento– 1^a rodada



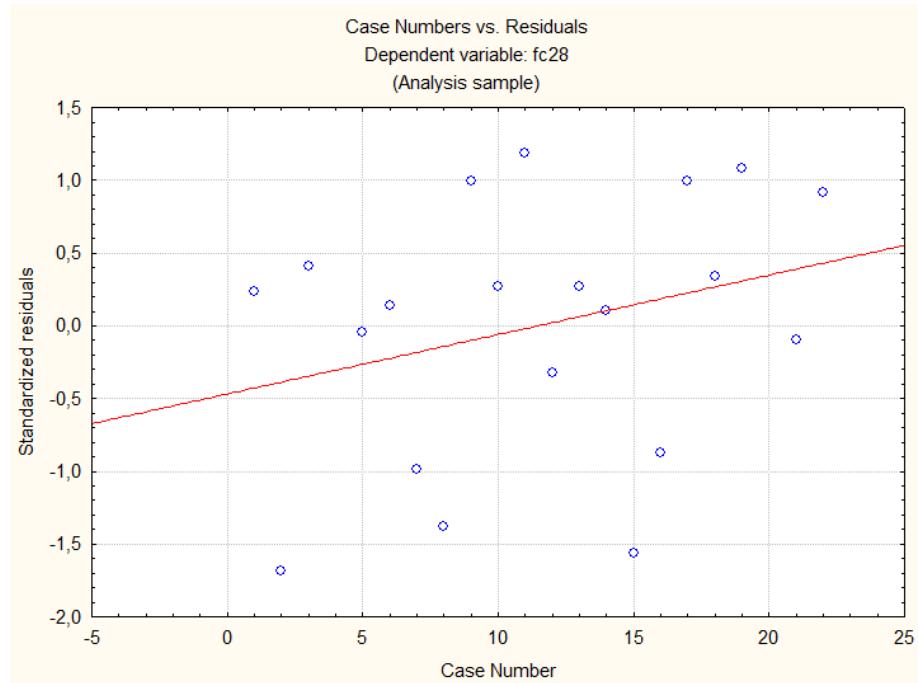
Fonte: Autor

Gráfico B. 12 - Resíduos padronizados dos dados de fc28 para 35MPa com cinza moída em substituição ao cimento– 2^a rodada



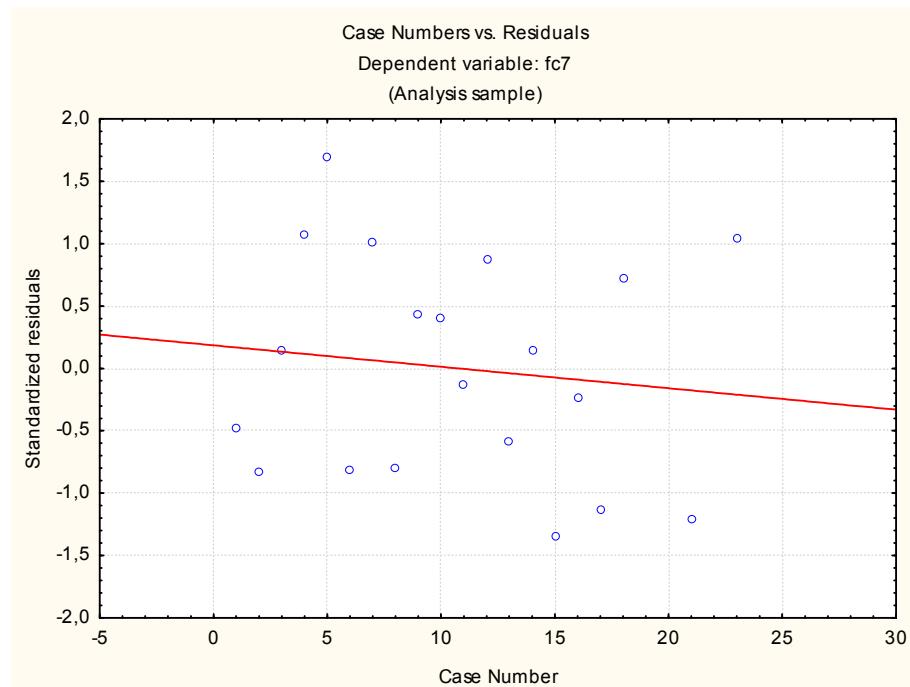
Fonte: Autor

Gráfico B. 13 - Resíduos padronizados dos dados de fc28 para 35MPa com cinza moída em substituição ao cimento– 3^a rodada



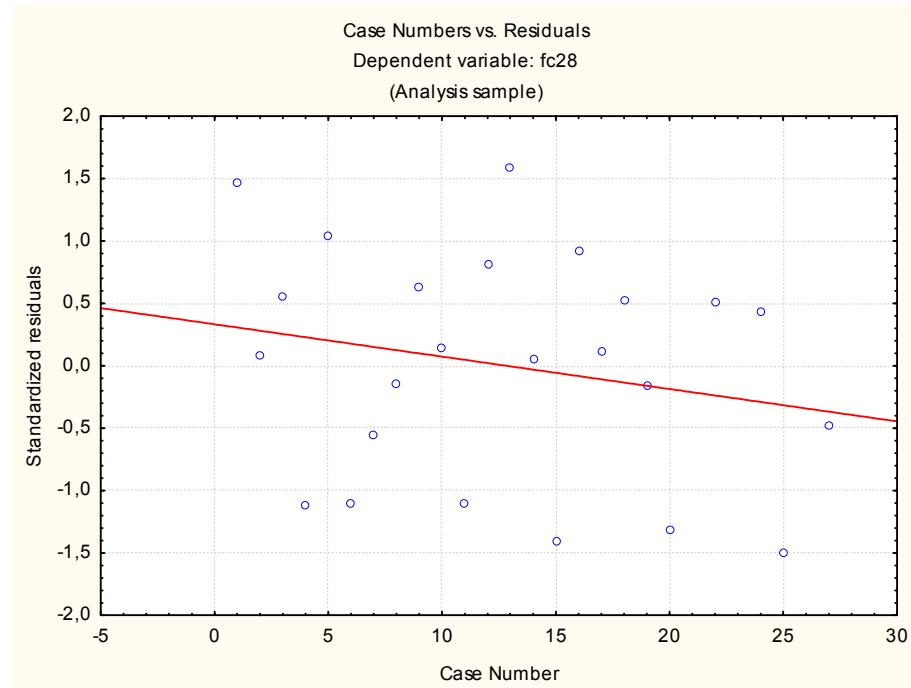
Fonte: Autor

Gráfico B. 14 - Resíduos padronizados dos dados de fc7 para 40MPa com substituição de cimento por cinza moída



Fonte: Autor

Gráfico B. 15 - Resíduos padronizados dos dados de fc28 para 40MPa com substituição de cimento por cinza moída



Fonte: Autor