



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

FRANCISCA LILIAN CRUZ BRASILEIRO

UTILIZAÇÃO DE CINZAS DE TERMELÉTRICA NA CONFECÇÃO DE BLOCOS
DE CONCRETO PARA ALVENARIA

FORTALEZA

2018

FRANCISCA LILIAN CRUZ BRASILEIRO

UTILIZAÇÃO DE CINZAS DE TERMELÉTRICA NA CONFECÇÃO DE BLOCOS
DE CONCRETO PARA ALVENARIA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Estruturas e Construção Civil da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de Concentração: Construção Civil.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Araújo Bertini.

Coorientador: Prof. Dr. Antonio Eduardo Bezerra Cabral.

FORTALEZA

2018

FRANCISCA LILIAN CRUZ BRASILEIRO

UTILIZAÇÃO DE CINZAS DE TERMELÉTRICA NA CONFECÇÃO DE BLOCOS
DE CONCRETO PARA ALVENARIA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Estruturas e Construção Civil da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de Concentração: Construção Civil.

Aprovada em: 30/11/2018.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Alexandre Araújo Bertini (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Antonio Eduardo Bezerra Cabral (Coorientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Marcelo Silva Medeiros Júnior
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Ricardo André Fiorotti Peixoto
Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP)

A Deus.

Aos meus pais, Novinho e Dília.

Aos meus irmãos, Adílio e Marília.

Ao meu sobrinho, Guilherme.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por ter me concedido saúde e perseverança para superar todas as dificuldades e concluir o mestrado. A convicção de que Seus planos são os mais certos me confortava nos momentos difíceis. As bênçãos recebidas no decorrer desta caminhada são inumeráveis. Obrigada, Deus.

Aos meus pais, Novinho e Dília, pelo suporte oferecido no decorrer da minha vida, por serem exemplo em todos os sentidos, por me amarem e me apoiarem incondicionalmente. A vocês eu devo tudo que sou.

Aos meus irmãos, Adílio e Marília, que foram essenciais nessa nova fase. Agradeço por todo o apoio, o amor e a preocupação que sempre tiveram comigo e por sempre acreditarem em mim. Amo muito vocês.

Ao meu namorado, Ésio, por me incentivar e me apoiar em todos os momentos, por entender as ausências e por me ajudar sempre que possível. Agradeço também à sua família por todo o carinho.

Ao meu orientador, Bertini, por acreditar em mim, por me incentivar a ir cada vez mais longe e por se dedicar para que tudo desse certo. Ao meu coorientador, Eduardo, pelo apoio em todos os momentos, por sempre se disponibilizar em ajudar e por ter facilitado todo esse processo. Agradeço muito a vocês pelos ensinamentos. Obrigada.

Aos membros da banca examinadora, Prof. Dr. Ricardo Fiorotti e Prof. Dr. Marcelo Medeiros, por aceitarem o convite e por contribuírem com o trabalho.

À minha orientadora da graduação, Kelvya, pelo incentivo para ingressar na vida acadêmica, pela amizade e por ser exemplo para mim.

Aos técnicos do Laboratório de Materiais de Construção Civil, Helano e Maurício, por ajudarem diretamente na realização dos ensaios, por não medirem esforços para colaborar e pelos momentos de descontração. Agradeço também ao Alexandre, Manoel, Moisés, Anselmo, Ricardo, André e aos bolsistas do laboratório por toda a ajuda.

Aos amigos do mestrado, que ajudaram direta e indiretamente, sem vocês esse processo teria sido ainda mais complicado. Em especial agradeço aos amigos Raphael, Ada, Fred, Bruno, Larissa, Washington, Bernardo, Felipe, Alisson, Gisela e Davi. Agradeço também à Regilene por ter dividido todas as angústias da aquisição da máquina, pela amizade e pela ajuda. À Annie e à Helena por todo o suporte. Muito obrigada a todos vocês.

À Universidade Federal do Ceará e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Estruturas e Construção Civil, pela oportunidade.

À EDP, por acreditar em nossa equipe e financiar o projeto.

Ao Sr. Gadelha, por ajudar em tudo, por mobilizar a sua equipe para resolver os nossos problemas da melhor forma possível. Não tenho nem palavras para agradecê-lo.

Às empresas que nos apoiaram com doação de materiais e realização de ensaios, Cimenteira Apodi e OCS Mineração, o meu muito obrigada. Ao Sr. Dorival e ao Ricardo Magalhães pela assistência técnica e incentivo.

Enfim, a todos que contribuíram para a realização deste trabalho, o meu eterno agradecimento.

RESUMO

Aliado à extensa geração de resíduos, o setor da construção civil é um vasto explorador dos recursos naturais existentes e, em consequência disso, é visto como um dos grandes responsáveis pelos impactos negativos mundiais no contexto ambiental. Neste âmbito, os pesquisadores da área buscam atenuar estes impactos por meio da aplicação de resíduos industriais nos produtos utilizados pelo setor. A geração de energia no Brasil dá-se majoritariamente por hidrelétricas, porém, dentre as fontes não renováveis, as usinas termelétricas que empregam o carvão mineral como objeto de queima tem potencialidade de crescimento já prevista pelo governo federal brasileiro. No contexto global, o carvão mineral supre 41% da demanda de energia, logo o estudo acerca dos resíduos oriundos das usinas termelétricas é bastante pertinente. Dois subprodutos da queima do carvão mineral foram abordados nesta pesquisa, visando aplicação em blocos de concreto para alvenaria: as cinzas volantes em substituição parcial do cimento Portland e as cinzas pesadas em substituição parcial do agregado miúdo convencional. As substituições foram realizadas em massa compensando a massa específica, de forma isolada (10%, 20% e 30% de cinza volante; 5%, 10% e 15% de cinza pesada) e conjunta (10% de cinza volante e 5% de cinza pesada; 20% de cinza volante e 10% de cinza pesada; 30% de cinza volante e 15% de cinza pesada) para blocos confeccionados por vibro prensagem, com verificação da consistência no estado fresco do concreto seco por meio do consistômetro de Vebe modificado e da resistência à compressão axial, absorção de água e módulo de elasticidade no estado endurecido. Análises estatísticas mostraram que a influência das substituições é notória em alguns teores, porém, em outros, há similaridade com os blocos referenciais e manutenção dos limites estabelecidos na normativa pertinente. Assim, alcançaram-se produtos sustentáveis ambientalmente sem comprometer as suas características físico-mecânicas.

Palavras-chave: Cinza volante. Cinza pesada. Resíduos de termelétrica. Bloco de concreto para alvenaria.

ABSTRACT

Combined with the extensive generation of waste, the construction industry is a vast explorer of the existing natural resources and, consequently, it is seen as one of the main protagonists of the projects deactivated in the environmental context. In this context, the researchers of the area seek to mitigate these impacts through the application of industrial waste in the products used by the sector. Generation of energy in Brazil has as main hydropower criterion, but, among non-renewable sources, thermoelectric companies that use coal as the object of burning have growth potential already established by the Brazilian federal government. In the global context, mineral coal has 41% of energy demand, so study about the waste from thermoelectric power plants is quite pertinent. Two by-products of coal burning were used in the present study, with application pairing of masonry concrete: fly ash as partial replacement of Portland cement and the bottom ash as partial replacement of conventional fine aggregate. The substitutions were carried out in bulk, compensating for the specific mass, in isolation (10%, 20% and 30% of fly ash; 5%, 10% and 15% of bottom ash) and joint (10% fly ash and 5% bottom ash; 20% fly ash and 10% bottom ash; 30% fly ash and 15% bottom ash) for blocks made by vibro pressing, with verification of the consistency in the fresh state of the dry concrete by the modified Vebe consistometer and the axial compressive strength, water absorption and modulus of elasticity in the hardened state. Statistical analysis showed that the influence of the substitutions is notorious in some levels, but in others, there is similarity with the reference blocks and maintenance of the limits established in the pertinent regulations. Thus, environmentally sustainable products were achieved without compromising their physical-mechanical characteristics.

Keywords: Fly ash. Bottom ash. Thermoelectric waste. Concrete block for masonry.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Usina Termelétrica do Pecém.....	17
Figura 2	Evolução da potência instalada no Brasil, em GW.....	22
Figura 3	Fluxograma da metodologia da pesquisa.....	33
Figura 4	Cinza volante em estudo.....	34
Figura 5	Cinza pesada em estudo: (a) coletada; (b) após beneficiamento.....	35
Figura 6	Limites para blocos e <i>pavers</i> indicados por Fernandes (2016) e curva em estudo.....	41
Figura 7	Blocos após processos de moldagem e extrusão.....	44
Figura 8	Ensaio com o consistômetro de Vebe no estado fresco do concreto seco.....	45
Figura 9	Processo de vibro-prensagem dos blocos.....	46
Figura 10	Ensaio de módulo de elasticidade nos blocos.....	49
Figura 11	Distribuição granulométrica da cinza volante.....	52
Figura 12	Distribuição granulométrica do agregado graúdo convencional.....	53
Figura 13	Distribuição granulométrica do agregado miúdo convencional e da areia fina.....	54
Figura 14	Distribuição granulométrica dos agregados e da cinza pesada coletada.....	55
Figura 15	Difratograma da cinza volante.....	57
Figura 16	Difratograma da cinza pesada.....	58
Figura 17	Imagens da cinza volante obtidas por Microscopia Eletrônica de Varredura..	60
Figura 18	Distribuição da propriedade de Forma 2D dos agregados convencionais.....	62
Figura 19	Distribuição da propriedade de Forma 2D da cinza pesada.....	63
Figura 20	Distribuição dos valores de esfericidade dos agregados convencionais.....	64
Figura 21	Distribuição dos valores de esfericidade da cinza pesada.....	65
Figura 22	Distribuição dos valores de angularidade dos agregados convencionais.....	66
Figura 23	Distribuição dos valores de angularidade da cinza pesada.....	66
Figura 24	Distribuição da propriedade de textura superficial dos agregados convencionais.....	68
Figura 25	Distribuição da propriedade de textura superficial da cinza pesada.....	68
Figura 26	Razões entre as dimensões dos agregados convencionais.....	69
Figura 27	Razões entre as dimensões da cinza pesada.....	70

Figura 28	Representação gráfica dos resultados do ensaio com o consistômetro de Vebe.....	76
Figura 29	Representação gráfica do teste de Tukey para o tipo de cinza no ensaio com o consistômetro de Vebe.....	77
Figura 31	Representação gráfica dos valores estimados de resistência característica à compressão axial dos blocos.....	79
Figura 32	Representação gráfica do teste de Tukey para o tipo de cinza na resistência à compressão axial dos blocos aos 7 dias.....	80
Figura 33	Representação gráfica do teste de Tukey para o teor de cinza na resistência à compressão axial dos blocos aos 7 dias.....	81
Figura 34	Representação gráfica do teste de Tukey para o tipo de cinza na resistência à compressão axial dos blocos aos 28 dias.....	82
Figura 35	Representação gráfica do teste de Tukey para o teor de cinza na resistência à compressão axial dos blocos aos 28 dias.....	82
Figura 36	Representação gráfica dos resultados do ensaio de absorção de água dos blocos.....	85
Figura 37	Representação gráfica do teste de Tukey para o tipo de cinza na absorção de água.....	86
Figura 38	Representação gráfica do teste de Tukey para o teor de cinza na absorção de água.....	86
Figura 39	Representação gráfica dos resultados de volume real dos blocos.....	87
Figura 40	Representação gráfica do teste de Tukey para o tipo de cinza no volume real dos blocos.....	88
Figura 41	Representação gráfica do teste de Tukey para o teor de cinza no volume real dos blocos.....	89
Figura 42	Representação gráfica dos resultados de módulo de elasticidade dos blocos.	91
Figura 43	Representação gráfica do teste de Tukey para o tipo de cinza no módulo de elasticidade dos blocos.....	92
Figura 44	Representação gráfica do teste de Tukey para o teor de cinza no módulo de elasticidade dos blocos.....	92

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Proporção de cada agregado nas misturas.....	41
Tabela 2	Consumo de materiais em kg/m ³ de concreto.....	43
Tabela 3	Caracterização do CP V - ARI fornecida pela cimenteira.....	50
Tabela 4	Resultados dos ensaios de massa específica e absorção de água.....	51
Tabela 5	Resultados do ensaio de granulometria para agregados.....	53
Tabela 6	Resultados dos ensaios de requisitos físicos da cinza volante.....	55
Tabela 7	Composição química da cinza volante e da cinza pesada.....	56
Tabela 8	Extratos solubilizado e lixiviado dos compostos iônicos e catiônicos.....	59
Tabela 9	Resultados de forma 2D a partir do AIMS.....	61
Tabela 10	Resultados de esfericidade a partir do AIMS.....	63
Tabela 11	Resultados de angularidade a partir do AIMS.....	65
Tabela 12	Resultados de textura superficial a partir do AIMS.....	67
Tabela 13	Resultados de lamelaridade a partir do AIMS.....	69
Tabela 14	Resultados dos ensaios de reatividade álcali-agregado da cinza pesada.....	71
Tabela 15	Resultados do ensaio de material pulverulento.....	71
Tabela 16	Resultados do ensaio de massa unitária solta.....	72
Tabela 17	Resultados do ensaio de índice de forma.....	73
Tabela 18	Resultados do ensaio de índice de desgaste por abrasão “Los Angeles”.....	73
Tabela 19	Resultados do teor de cloretos, sulfatos e sais solúveis.....	74
Tabela 20	Resultados do ensaio com o consistômetro de Vebe.....	75
Tabela 21	Análise de variância dos resultados do ensaio com o consistômetro de Vebe	76
Tabela 22	Valores estimados de resistência característica à compressão axial dos blocos.....	78
Tabela 23	Análise de variância dos resultados de resistência à compressão axial dos blocos.....	80
Tabela 24	Resultados do ensaio de absorção de água e área líquida dos blocos.....	84
Tabela 25	Análise de variância dos resultados de absorção de água dos blocos.....	85
Tabela 26	Análise de variância dos resultados de volume real dos blocos.....	88
Tabela 27	Resultados do ensaio de módulo de elasticidade dos blocos.....	90
Tabela 28	Análise de variância dos resultados de módulo de elasticidade dos blocos....	91

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	14
1.1 Justificativa.....	16
1.2 Objetivos.....	17
1.2.1 Objetivo Geral.....	17
1.2.2 Objetivos Específicos.....	18
1.3 Estrutura da dissertação.....	18
1.4 Limitações da pesquisa.....	19
2 REFERENCIAL TEÓRICO.....	20
2.1 Carvão x Geração de Energia Elétrica.....	20
2.2 Cinzas Volantes.....	23
2.3 Cinzas Pesadas.....	25
2.4 Blocos de Concreto para Alvenaria.....	28
2.5 Cinzas de Termelétrica em Blocos de Concreto para Alvenaria.....	30
3 MATERIAIS E MÉTODO.....	33
3.1 Materiais.....	33
3.1.1 Cimento Portland.....	34
3.1.2 Cinza volante.....	34
3.1.3 Agregados.....	35
3.1.4 Cinza pesada.....	35
3.1.5 Aditivo.....	36
3.2 Método.....	36
3.2.1 Caracterização dos materiais.....	36
3.2.1.1 Massa específica e absorção de água.....	36
3.2.1.2 Distribuição granulométrica.....	37
3.2.1.3 Requisitos físicos da NBR 12653 (ABNT, 2015a).....	37
3.2.1.4 Fluorescência de Raios-X.....	37
3.2.1.5 Difração de Raios-X.....	38
3.2.1.6 Lixiviação e Solubilização.....	38
3.2.1.7 Microscopia Eletrônica de Varredura.....	38
3.2.1.8 Processamento Digital de Imagens.....	39
3.2.1.9 Reatividade álcali-agregado.....	39
3.2.1.10 Material pulverulento.....	39

3.2.1.11 Massa unitária solta.....	40
3.2.1.12 Índice de forma.....	40
3.2.1.13 Índice de desgaste por abrasão “Los Angeles”	40
3.2.1.14 Cloretos, Sulfatos e Sais solúveis.....	40
3.2.2 Dosagem do concreto seco.....	40
3.2.3 Produção dos Blocos de Concreto para Alvenaria.....	43
3.2.3.1 Consistômetro de Vebe.....	45
3.2.3.2 Vibro-prensagem.....	46
3.2.3.3 Cura.....	47
3.2.4 Caracterização dos Blocos de Concreto para Alvenaria.....	47
3.2.4.1 Resistência à Compressão Axial.....	47
3.2.4.2 Absorção de Água.....	48
3.2.4.3 Módulo de Elasticidade.....	48
3.2.5 Análise Estatística.....	49
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	50
4.1 Caracterização dos materiais.....	51
4.1.1 Massa específica e absorção de água.....	51
4.1.2 Distribuição granulométrica.....	52
4.1.3 Requisitos físicos da NBR 12653 (ABNT, 2015a).....	55
4.1.4 Fluorescência de Raios-X.....	56
4.1.5 Difração de Raios-X.....	57
4.1.6 Lixiviação e Solubilização.....	58
4.1.7 Microscopia Eletrônica de Varredura.....	59
4.1.8 Processamento Digital de Imagens.....	61
4.1.8.1 Forma 2D.....	61
4.1.8.2 Esfericidade.....	63
4.1.8.3 Angularidade.....	65
4.1.8.4 Textura superficial.....	67
4.1.8.5 Lamelaridade.....	69
4.1.9 Reatividade álcali-agregado.....	70
4.1.10 Material pulverulento.....	71
4.1.11 Massa unitária solta.....	72
4.1.12 Índice de forma.....	73
4.1.13 Índice de desgaste por abrasão “Los Angeles”	73

4.1.14 Cloretos, Sulfatos e Sais solúveis.....	73
4.2 Estado fresco do concreto seco.....	74
4.2.1 Consistômetro de Vebe.....	74
4.3 Caracterização dos blocos.....	78
4.3.1 Resistência à compressão axial.....	78
4.3.2 Absorção de água.....	83
4.3.3 Módulo de elasticidade.....	90
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	94
5.1 Conclusões.....	94
5.2 Sugestões para trabalhos futuros.....	95
REFERÊNCIAS.....	97

1 INTRODUÇÃO

Os subprodutos gerados em larga escala no Brasil e no mundo devem ser estudados, principalmente se for originário de processos produtivos onde não haja alternativa além da produção destes em larga escala. A geração de energia, por exemplo, sempre será necessária. No caso das usinas termelétricas, há uma contínua e vasta formação de cinzas e este cenário tende a continuar. Aplicar estes subprodutos no setor da construção civil, conhecido por explorar fortemente os recursos naturais e gerar resíduos em grande quantidade, tanto nas etapas da construção quanto em sua ocasional demolição (resíduos de construção e demolição), é significativo. Mais importante ainda é incorporá-los nos itens mais utilizados pelo setor, aumentando assim a capacidade de aproveitamento.

Teixeira (2013) observa que, apesar de o Brasil possuir uma matriz energética baseada no uso da hidroeletricidade e de biocombustíveis, sendo, por consequência, considerada “limpa”, o emprego de combustíveis como o gás natural, derivados de petróleo e carvão mineral deve aumentar nas próximas décadas. Para a autora, dentre as fontes não renováveis de energia, o carvão é digno de notoriedade visto que há grandes reservas no país e, por isso, o governo federal previu um incremento na geração de eletricidade por meio de termelétricas que utilizem esse combustível.

Em conformidade com a Agência Internacional de Energia (IEA, 2016), a geração de energia continua a ser o principal uso do carvão e produtos de carvão, com uma produção mundial 2,7 vezes maior em 2014 do que em 1973 e 75% maior do que em 2000. Dados da agência supracitada mostram ainda que a produção de eletricidade representa 35% do consumo total de carvão no Brasil, onde o carvão mineral participa com um pouco mais de 5% na matriz energética e com apenas 1,3% na matriz elétrica. Sua participação é maior em termos de produção de eletricidade: supre 41% da demanda de energia elétrica global.

No Brasil, Segundo Lacerda (2015), as usinas termelétricas são do tipo convencional, ou seja, utilizam carvão pulverizado, no qual a combustão se dá em altas temperaturas (acima de 1400°C). A autora lembra que as cinzas oriundas da queima do carvão podem ser de dois tipos: cinzas volantes ou leves (aproximadamente 80%) e cinzas de fundo ou pesadas (cerca de 20%), das quais a primeira é emitida junto aos gases de exaustão e abatida em sistemas de limpeza do tipo precipitadores eletrostáticos, com fração granulométrica inferior a 100 µm, enquanto a segunda é eliminada pela parte inferior do equipamento, normalmente na forma de lama, com fração granulométrica superior a 100 µm.

Conforme Saldanha (2014), as cinzas volantes obtidas por meio desse processo têm magnitude de geração na casa de milhões de toneladas por ano, no Brasil. De Paula (2016) comenta que a microestrutura da cinza volante é bastante peculiar, já que suas partículas são compostas por esferas ocas e plerosferas (esferas ocas preenchidas por esferas menores) e essa característica aumenta a reatividade do material, visto que as reações pozolânicas acontecem predominantemente na superfície, havendo a desagregação das pleroesferas e proporcionando um aumento da superfície específica da cinza.

De acordo com Ciseski (2013), a cinza pesada é depositada em bacias de sedimentação, sendo exposta a processos de lixiviação de metais pesados e tornando-se, portanto, um risco de contaminação do lençol freático e do solo da região. Segundo a autora, a cinza pesada é composta basicamente por sílica (SiO_2), alumina (Al_2O_3) e óxido de ferro (Fe_2O_3), com porcentagens menores de cálcio (Ca), magnésio (Mg), sulfatos (SO_4) e outras combinações.

Carvalho (2015) afirma que a cinza pesada pode promover uma melhor cura interna do concreto, sem que ocorram grandes forças de pressão capilar, o que torna o sistema menos vulnerável a deformações ou fissuras, apresentando-se com potencial para substituição parcial de agregados naturais em matrizes cimentícias.

Saldanha (2014) destaca a necessidade de buscar a preservação dos recursos naturais e a busca por novas aplicações de materiais como estes, abundantes e disponíveis na região de estudo, é um meio para isso. Consoante a Silva (2013), muitas aplicações dos produtos da combustão do carvão mineral resultam em artefatos mais eficientes tecnicamente e economicamente em relação aos convencionais, como, por exemplo, a aplicação de cinzas volantes em concreto, resultando em um composto com maior resistência mecânica, menor permeabilidade e maior resistência às reações com álcalis e sulfatos.

Todavia, Livi (2013) enfatiza que a qualidade do produto final depende fundamentalmente da matéria-prima e do processo de fabricação empregado, fazendo-se necessário um estudo específico com materiais disponíveis em cada região a fim de compreender o produto final e torná-lo exequível.

Teixeira (2013) ressalta que atender às exigências físicas e mecânicas preconizadas na normalização é uma exigência para que novos materiais sejam absorvidos pela construção civil. Com isso, espera-se contribuir com alternativas para a utilização destes subprodutos, favorecendo o desenvolvimento sustentável na região de estudo.

1.1 Justificativa

A utilização de subprodutos industriais é um tema bastante significativo, dada a contínua preocupação com seu descarte inadequado e consecutiva deterioração do meio ambiente. Na construção civil, a escolha dos resíduos deve seguir de modo que sejam satisfeitas as questões técnicas dos produtos que estes venham a compor, da extensão do passivo ambiental gerado pela indústria e da capacidade de incorporação permitida sem minorar o desempenho final da edificação. Além disso, incorporar refugos em compostos cimentícios como substituição parcial ou total dos materiais normalmente empregados é uma alternativa que minimiza a exploração dos recursos naturais e que pode diminuir o custo final das construções.

Para Martins (2014), a demanda por matérias-primas de baixo custo aliada à questão ambiental dos processos de produção tornou-se um diferencial tanto para as empresas quanto para os consumidores finais, porquanto pode ser um fator decisivo na escolha de um determinado produto pelo mercado cada vez mais exigente.

Pacheco-Torgal e Jalali (2012) citam que para um desenrolar mais sustentável nas técnicas construtivas há a possibilidade de buscar desenvolver e utilizar novas práticas e materiais que tenham um maior cuidado com a temática ambiental. Carvalho (2015) comenta que a sociedade está cada vez mais focada na consciência ambiental e redução de custos e, por consequência, manifesta interesse em resíduos passíveis de reaproveitamento.

Ademais, há a consciência de que estes resíduos possam ser dispostos de maneira incorreta, conforme Lacerda (2015), em zonas urbanas e/ou rurais sem o apropriado monitoramento ambiental. Um dos resultados dessa inadequada disposição é a contaminação de águas superficiais e subterrâneas.

Como afirma Livi (2013), a produção de cimento Portland libera uma grande quantidade de gás carbônico (CO_2) na atmosfera, conferindo vultoso impacto ambiental. Além disso, o Código Florestal Brasileiro (1965), por meio da Lei Federal 4.771 (BRASIL, 1965), considera como áreas de preservação permanentes as florestas e demais formas de vegetações naturais situadas ao longo dos rios ou cursos d'água e é sabido que a areia natural é obtida predominantemente nesses locais, o que dificulta o acesso a esse material, tornando-o cada vez mais caro e escasso.

No contexto local, tem-se a Usina Termelétrica do Pecém (Figura 1) que, conforme Silva (2017), em regime de operação plena, gera 474.500 toneladas de cinzas por ano. Destas, ainda de acordo com o autor, 328.500 ton.ano^{-1} são de cinzas volantes, 69.350 ton.ano^{-1} são de cinzas pesadas, e 76.650 ton.ano^{-1} são de cinzas de FGD (*Flue Gas Desulfuriza-*

tion). Dados fornecidos pela própria usina apontam que cerca de 33% destas cinzas são coletadas por uma cimenteira da região, sendo o restante armazenado em pátios.

Figura 1 – Usina Termelétrica do Pecém



Fonte: <https://caririrevista.com.br/>

Sendo assim, o presente estudo justifica-se pela diminuição do passivo ambiental gerado em larga escala pela Usina Termelétrica do Pecém, além de contribuir com uma alternativa para a preservação dos recursos naturais que serão substituídos parcialmente nos blocos de concreto para alvenaria da pesquisa. Esta faz parte do projeto desenvolvido em parceria com a Energia de Portugal (EDP), uma das empresas atuantes na referida usina, sendo intitulado “Caracterização do carvão mineral e suas cinzas de combustão, com aplicações na construção civil e na pavimentação”.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Realizar estudo de análise técnica sobre a utilização da cinza volante e da cinza pesada, geradas pela queima do carvão mineral na Usina Termelétrica do Pecém, nomeadamente em Pecém I, para fabricação de blocos de concreto para alvenaria.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Verificar as propriedades físico-químicas das cinzas em estudo;
- Produzir blocos de concreto para alvenaria com substituição parcial do cimento Portland pela cinza volante em estudo;
- Produzir blocos de concreto para alvenaria com substituição parcial do agregado miúdo convencional pela cinza pesada em estudo;
- Produzir blocos de concreto para alvenaria com substituição parcial conjunta do cimento Portland pela cinza volante em estudo e do agregado miúdo convencional pela cinza pesada em estudo;
- Analisar as propriedades físico-mecânicas dos blocos de concreto para alvenaria produzidos;
- Averiguar o maior percentual de substituição que satisfaça as normas vigentes em relação à resistência à compressão axial e à absorção de água, para cada cenário apresentado.

1.3 Estrutura da dissertação

A dissertação foi dividida em 5 capítulos. Na introdução, capítulo 1, tem-se uma contextualização do tema, justificando a importância da pesquisa e apresentando seus objetivos e limitações.

O referencial teórico, capítulo 2, trata das afirmações e descobertas de diversos autores sobre as cinzas volantes e pesadas, sobre os blocos de concreto para alvenaria e sobre a aplicação das referidas cinzas nestes.

O capítulo 3, de materiais e métodos, mostra a metodologia adotada para a confecção e análise dos diferentes tipos de blocos de concreto para alvenaria abordados neste trabalho.

O capítulo 4 traz os resultados alcançados e as discussões destes, tanto para o estado fresco do concreto seco quanto para os blocos de concreto para alvenaria produzidos. As análises estatísticas também são apresentadas neste capítulo.

As considerações finais são abordadas no capítulo 5, com as conclusões obtidas e as sugestões para trabalhos futuros.

1.4 Limitações da pesquisa

Como limitação da pesquisa, tem-se a representatividade das amostras e a possível variabilidade do carvão e dos processos até a geração das cinzas. A influência da temperatura e do tempo de queima, do tipo de carvão mineral e do processo de captação das cinzas nas suas características finais é desconhecida.

Outra limitação é a distribuição granulométrica da cinza pesada, que não permitiu a sua aplicação conforme coletada da usina. Sendo assim, os resultados desta pesquisa são limitados ao seu beneficiamento, feito por meio da aproximação da curva granulométrica da cinza pesada e do agregado miúdo convencional substituído parcialmente.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Carvão x Geração de Energia Elétrica

Segundo Teixeira (2013), o carvão é composto basicamente por carbono e hidrogênio, onde o primeiro é encontrado em grandes teores e sua quantidade está diretamente ligada ao grau de carbonificação, além de também conter, em menores porções, enxofre, nitrogênio, oxigênio e halogênios.

O Plano Nacional de Mineração 2030, desenvolvido pelo Ministério de Minas e Energia (MME, 2011), defende que o grande desafio é a produção e uso limpo do carvão mineral. Um dos meios que o Plano identifica é o desenvolvimento de tecnologias limpas na cadeia produtiva, assim como o desenvolvimento tecnológico e inovação aplicado à cadeia produtiva carbonífera, em especial para geração termelétrica, siderúrgica e carboquímica.

O amplo consumo de carvão mineral como fonte geradora de energia para as máquinas e locomotivas, em concordância com Siqueira (2011), foi instaurado durante a Revolução Industrial, ou seja, a partir do século XVII, também sendo utilizado como combustível nas indústrias de ferro e aço, onde por meio do vapor aplicado ao processo industrial havia, conjuntamente, produção de energia elétrica.

Como declara Brogni (2013), a incineração do carvão tornou-se mais eficiente nas usinas térmicas com o passar dos tempos, quando, por volta de 1920, a pulverização do carvão mineral no interior da caldeira substituiu o uso de torrões no processo de queima. A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2008) adverte que dentre as formas de produção de energia o carvão mineral é uma das mais deletérias ao meio ambiente pelo lançamento de gases de combustão como o nitrogênio e o dióxido de carbono.

Na Usina Termelétrica do Pecém, fornecedora dos resíduos utilizados nesta pesquisa, o carvão pulverizado entra a cerca de 80°C na fornalha, que oscila entre 1500°C e 1600°C. Nesta fábrica são recebidas, em média, duas cargas de carvão por mês e há o cuidado de sempre procurar comprá-lo da mesma mina, na Colômbia, e de monitorar cerca de 16.000 variáveis com o intuito de diminuir ao máximo a oscilação desta matéria-prima. Há, inclusive, um contrato de compra do carvão, onde há tolerâncias de variabilidade deste.

O carvão, de acordo com Vieira (2012), é a segunda fonte de energia primária do mundo, somente ficando atrás do petróleo e sendo responsável por cerca de 40% do atendimento da necessidade elétrica mundial. O autor avisa que assim como o impacto ambiental gerado pelas energias fósseis (emissão de gases poluentes) é reconhecido, o mesmo deve

ocorrer com o gerenciamento dos produtos resultantes da queima do carvão, as cinzas que atingem uma produção anual da ordem de centenas de milhares de toneladas.

Brown (2011) aponta que o emprego do carvão na geração de energia, mesmo que este seja considerado de baixo valor econômico, provoca discussões em razão da poluição nos arredores da usina, ocasionada, sobretudo, pelos resíduos de cinzas de combustão, uma vez que estes podem conter elementos tóxicos, gases de efeito estufa e são gerados em uma proporção que gira em torno de 50% da massa do carvão incinerado. Entretanto, Chen *et al.* (2010) lembram que os subprodutos oriundos da queima do carvão mineral são passíveis de utilização, evitando, à vista disso, impactos associados e permitindo a conservação de matérias-primas não renováveis.

A combustão do carvão fóssil origina dois tipos de cinzas, a cinza volante ou leve e a cinza pesada ou de grelha: a cinza volante é assim denominada por ser recolhida nos gases de exaustão da caldeira, e a cinza pesada por se depositar no piso da câmara de combustão (ISAIA, 2007). As técnicas mais empregadas para a captura desses resíduos sólidos são: precipitadores eletrostáticos, filtros de manga, lavadores úmidos e coletores mecânicos; já para o descarte das cinzas existem, basicamente, dois métodos: lagoas de sedimentação e aterros (BRANDÃO; RODRIGUES; SILVA, 2013).

Adriano *et al.* (1980) indicam que mais dois tipos de cinzas também podem ser geradas pela queima do carvão com calcário: as originadas pela dessulfurização do gás da chaminé (FGD) e as cinzas de combustão de leito fluidizado do tipo atmosférico, pressurizado ou circulante, sendo que a primeira é formada por meio da aspersão de uma mistura alcalina aquosa (geralmente uma combinação de cal e água) nos gases de exaustão, convertendo-os em um misto de cinza volante, sais de sulfito e/ou sulfato de cálcio e carbonato de cálcio, onde suas partículas variam, em sua maioria, de 5 a 50µm.

O descarte não adequado, de acordo com Teixeira (2013), desperta uma preocupação permanente nos pesquisadores, motivando-os a buscar maneiras de reduzir os impactos ambientais por meio da aplicação dos rejeitos industriais como matérias-primas ou insumos em outras atividades. A autora supracitada evidencia que, nos últimos tempos, esta tem sido uma linha bastante discutida e trabalhada no setor da construção civil e que, em termos de volume, as cinzas geradas pela incineração do carvão nas usinas termelétricas têm grande expressividade.

Martins (2014) ressalta os principais motivos do vasto passivo ambiental existente no mundo: o desenvolvimento da atividade industrial e a consequente agressividade exigida por este para que haja um elevado crescimento técnico-social em curto prazo, o que culmina

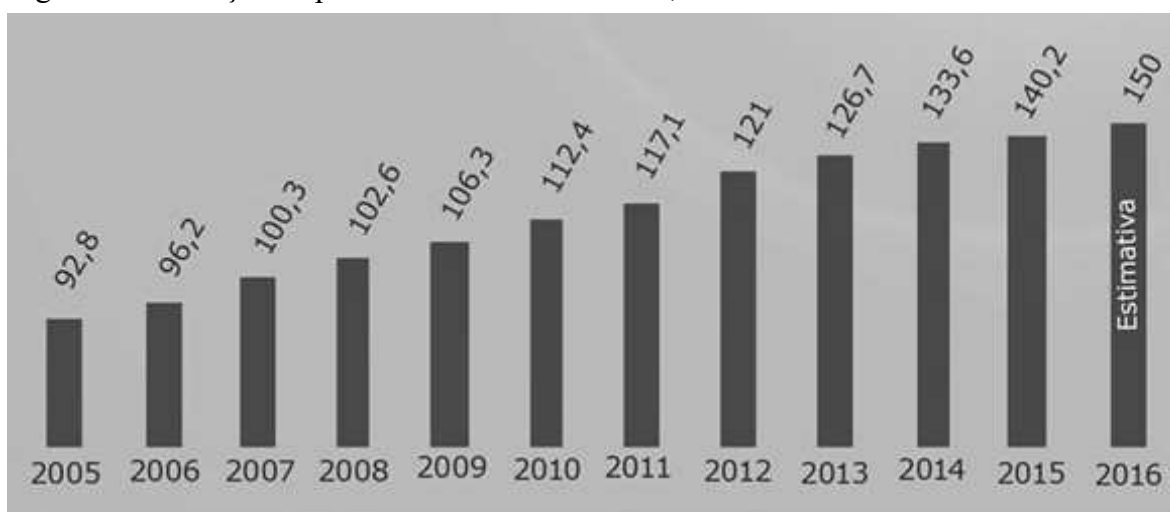
em uma maior exploração dos recursos naturais concomitante à larga, e predominantemente nociva, geração de resíduos. O autor salienta que este modelo trouxe grande riqueza econômica e que naquela época (após a segunda guerra mundial) os recursos naturais se mostravam abundantes e o meio ambiente não apresentava efeitos negativos para a disposição dos resíduos na própria natureza, o que não é mais admissível na atualidade.

Teixeira (2013) cita diversas vantagens garantidas pelo emprego das cinzas do carvão mineral como matérias-primas: “diminuição significativa de áreas destinadas aos aterros, conservação de recursos naturais, ambiente mais limpo e seguro, redução de emissão de dióxido de carbono, impulsão no desenvolvimento econômico e redução geral do custo de geração de eletricidade”.

Chies, Silva e Zwonok (2003) comentam que no setor da construção civil é notável a utilização das cinzas do carvão em aplicações em concreto, fabricação do cimento Portland pozolânico, argamassas, cinzas em processos de estabilização sob pressão, aterros estruturais, bases estabilizadas e solos modificados e estabilizados para rodovias, pistas e edificações, e como filer em misturas betuminosas.

Dados da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2016) mostram que a geração de eletricidade no Brasil segue em contínua expansão, com mais equilíbrio na diversificação da matriz. Sobre a potência instalada no país, 27% corresponde às usinas termelétricas e este número chegará a 32% quando as novas usinas atualmente em implantação começarem a operar, enquanto as hidrelétricas cairão de 66% para 19%. A Figura 2 traz a evolução da potência instalada, em GW.

Figura 2 – Evolução da potência instalada no Brasil, em GW



Fonte: ANEEL (2016).

Com isso, percebe-se que a geração dos resíduos provenientes das usinas termelétricas tende a aumentar e o estudo sobre o aproveitamento destes é significativo no setor da construção civil que, consoante a Zuo e Zhao (2014), é admitido como indispensável para o desenvolvimento de um país em razão de colaborar para o Produto Interno Bruto (PIB), gerar empregos e produzir edificações de uso geral, contudo, também é visto como vilão no que se refere ao consumo de recursos naturais e geração de resíduos.

Bilar (2016) defende que muitas tecnologias e medidas podem ser empregadas no intuito de melhorar as práticas construtivas, aliando o aumento de produtividade à questão ambiental e comenta que isso já tem sido feito pelo setor da construção civil após reconhecer os danos provenientes de suas práticas.

2.2 Cinzas Volantes

A cinza volante é um material obtido dos gases de exaustão de estações alimentadas por carvão, principalmente das usinas termoeletricas que queimam o carvão mineral para a produção de energia elétrica (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

De acordo com a NBR 12653 (ABNT, 2015a), cinzas volantes são “resíduos que resultam da combustão de carvão mineral pulverizado ou granulado, com atividade pozolânica”. A mesma norma explica que atividade pozolânica é a “capacidade que determinado material tem de reagir com o hidróxido de cálcio em presença de água e formar compostos com propriedades cimentícias”. Por fim, outro conceito exposto na norma citada anteriormente é o de materiais pozolânicos: “materiais silicosos ou silicoaluminosos que, sozinhos, possuem pouca ou nenhuma propriedade ligante mas que, quando finamente divididos e na presença de água, reagem com o hidróxido de cálcio à temperatura ambiente, formando compostos com propriedades ligantes”.

Pilar (2012) apresenta que a capacidade de formar silicato de cálcio hidratado ou similar (secundário) a partir do hidróxido de cálcio presente nos compostos cimentícios tem forte relação com o efeito químico das adições minerais, já que o primeiro é o grande agente da resistência mecânica de tais compostos. Em relação aos materiais pozolânicos, o mesmo autor expressa que as reações químicas inerentes a este tipo de material podem ocorrer de forma lenta ou relativamente rápida a depender de sua superfície específica, morfologia e composição química.

Neville (2016) explica que, utilizando o método de Blaine, a superfície específica das cinzas volantes geralmente oscila de 250 a 600 m²/kg, o que, como afirma o autor, facilita

bastante sua reação com o hidróxido de cálcio. Sobre a morfologia das cinzas volantes, este mesmo autor esclarece que suas partículas têm formato esférico (trazendo vantagens em relação à demanda de água exigida para atingir uma determinada plasticidade nas misturas cimentícias), além de possuir elevada finura e diâmetro de partículas variando entre menos do que 1 μm e 0,0001 m.

Salum (2016) descreve que a sílica e a alumina são vulneráveis ao hidróxido de cálcio, podendo se combinar com o mesmo e caracterizar a reação pozolânica, que auxilia na durabilidade da pasta de cimento endurecida frente a meios ácidos por formar silicatos de cálcio hidratados adicionais.

A estequiometria do silicato de cálcio hidratado formado na hidratação do cimento Portland, de acordo com Silva (2007), não é muito diferente daquela resultante da incorporação de cinzas volantes ou pozolanas naturais nas misturas. Todavia, a relação cálcio/silício é levemente superior. Esta relação, para Taylor (1997), é influenciada, sobretudo, pelo tempo de hidratação, teor e tipo de adição mineral incorporada à pasta de cimento, onde pozolanas muito reativas (sílica ativa, por exemplo), possuem relação cálcio/silício próxima de 1.

Yu, Y., Yu, J. e Ge (2016) afirmam que a introdução da cinza volante no concreto em substituição parcial do cimento reduz a hidratação inicial e, conseqüentemente, a resistência do composto nas primeiras idades, porém, confere melhores aspectos de compactidade e permeabilidade. Conforme estes autores, a atual produção mundial anual de cinzas de carvão é estimada em cerca de 700 milhões de toneladas, dos quais pelo menos 70% são compostos por cinza volantes.

Liu *et al.* (2016) explicam que as cinzas volantes são um dos materiais pozolânicos mais comuns e que, como demonstrado por vários estudos encontrados na literatura, a sua utilização em compostos cimentícios causa alta porosidade em idades precoces, o que resulta em menor resistência à penetração de íons cloreto e de dióxido de carbono (CO_2) neste período. No entanto, as cinzas volantes tem efeito micro filer, ou seja, de preenchimento, e reação pozolânica em idades mais avançadas, o que é benéfico para melhorar a resistência do concreto contra a entrada de substâncias nocivas durante toda a sua vida útil.

Simčič *et al.* (2015) desenvolveram uma pesquisa para avaliação do processo, a longo prazo, de penetração de cloretos em concretos com substituição parcial do cimento por dois tipos de cinza volante. Foram investigados os perfis de penetração de cloreto total e solúvel em água e profundidades de cobertura de concreto em ciclos de molhamento-secagem. Os autores obtiveram resultados satisfatórios para os concretos modificados quando comparados aos referenciais: menores profundidades de penetração de cloreto, atribuindo-se a isso a me-

nor porosidade destes (ao longo do tempo essa diferença torna-se ainda mais evidente); menores cobrimentos necessários, tendo em conta o teor de cloreto para cloretos solúveis totais, logo, melhor resistência ao ataque de cloretos.

Puthipad *et al.* (2016) lembram que uma vez que a cinza volante é um subproduto da queima de carvão mineral em usinas termelétricas, é desejável que seja reaproveitado em maior quantidade. Ainda segundo os autores, as cinzas volantes também são conhecidas por sofrer reações pozolânicas e de hidratação, onde essas reações químicas podem manter a resistência à compressão necessária do concreto quando uma proporção de substituição adequada de cinzas volantes é empregada. Subsequentemente, a cinza volante é amplamente introduzida em compostos cimentícios devido ao seu baixo custo e alto desempenho como material suplementar ao cimento.

2.3 Cinzas Pesadas

Cinzas pesadas (ou cinzas de fundo) são resíduos silicoaluminosos, produtos da combustão de carvão mineral pulverizado em leito de arraste em usinas termelétricas; são retiradas da fornalha pela sua base, caindo dentro de tanques com água de resfriamento (CHIES; SILVA; ZWONOK, 2003).

Livi (2013) expõe que a cinza pesada é composta principalmente por sílica, alumina e óxido de ferro, com porcentagens menores de óxido de cálcio, óxido de magnésio, sulfatos e outras combinações. Froener (2016) explicita que as características químicas das cinzas pesadas, que representam o segundo resíduo de maior relevância na indústria termoelétrica, são semelhantes às das cinzas volantes, diferenciando-se fundamentalmente pelos contaminantes presentes (metais pesados ou voláteis), densidade, granulometria e conteúdo de fases amorfas, porém, estas não são utilizadas como adição pozolânica por serem de granulometria mais grosseira e menos reativas, não recebendo, portanto, a atenção devida na indústria da construção civil.

A autora citada anteriormente discorre que dentre as vantagens e desvantagens do seu uso, sabe-se que a baixa reatividade desta cinza pode ser melhorada por meio de beneficiamentos, tais como moagem e/ou tratamentos térmicos e que mais uma alternativa à melhoria desta reatividade é o uso combinado com outros precursores disponíveis na região, de natureza mais reativa e/ou de composição química complementar.

Sani, Muftah e Muda (2010) afirmam que estas cinzas são materiais fisicamente grosseiros, porosos, vítreos, granulares, acinzentados e incombustíveis que são recolhidos a

partir do fundo de fornos de usinas termelétricas que utilizam o carvão como combustível; que a composição química da cinza produzida depende dos tipos de forno, carvão e procedimentos utilizados na termelétrica; e que a partir do processo de queima cerca de 80% do produto se tornará cinzas volantes e os 20% remanescentes serão cinzas pesadas.

Os autores supracitados comentam que muitos estudos já foram desenvolvidos e apontam que a cinza pesada tem algumas propriedades cimentantes que podem aumentar a resistência a longo prazo em comparação à misturas compostas apenas com areia natural. Estes mesmos autores estudaram a substituição parcial do agregado miúdo de origem natural pela cinza pesada em concretos especiais e inferiram que o teor de 30% de substituição foi o mais satisfatório, visto que obteve um bom desenvolvimento de resistência ao longo das idades estudadas.

Ibrahim *et al.* (2015) defendem que as cinzas pesadas de carvão, devido aos seus atributos de dureza e leveza, são uma boa alternativa para substituição do agregado miúdo natural. O desenvolvimento da resistência do concreto composto por estas cinzas é relativamente lento, começando, em geral, após os 28 dias de produção. Considera-se que as cinzas pesadas são utilizadas como substituição da areia no concreto devido às suas distribuições de tamanho de partícula semelhantes e massas específicas parecidas, porém, em comparação com a areia comumente utilizada, as cinzas pesadas contêm um maior teor de finos. Estes autores consideraram o teor de 10% de substituição (com relação água/cimento de 0,45) como ótimo em sua pesquisa.

Carvalho (2015) verificou, na bibliografia, que alguns pesquisadores desenvolveram experimentos utilizando a cinza pesada em substituição parcial do agregado miúdo natural para confecção de blocos de concreto, base para construção de estradas, argamassa e concreto. O autor frisa que do ponto de vista ambiental e tecnológico essas pesquisas são bastante relevantes, já que um aperfeiçoamento em algumas propriedades do material que contém o resíduo é viável.

Singh e Siddique (2016) advertem que o método atual de eliminação das cinzas pesadas, em lagos, representa um risco para a saúde humana e para o ambiente já que os constituintes perigosos destas cinzas migram e podem contaminar a água subterrânea ou superficial e, portanto, afetar organismos vivos. A indústria da construção tem um enorme potencial para o uso de cinzas pesadas como material de construção visto que suas partículas têm características de intertravamento.

Os autores falam ainda que as cinzas pesadas são mais leves e mais frágeis em comparação à areia natural de rio, ou seja, possuem baixa densidade e têm uma textura porosa

que se degrada facilmente sob carga ou compactação, no entanto, caso sejam derivadas de carvões com alto teor de enxofre e baixa espessura, não são intensamente porosas e são bastante densas. Em sua pesquisa os autores concluíram que este é um material adequado para ser usado como substituição parcial de areia na fabricação de concreto.

Kim e Lee (2011) verificaram a aplicação da cinza pesada como agregado miúdo e gráudo em concreto de alto desempenho. Uma areia de britagem e a fração fina da cinza pesada foram utilizadas como agregado miúdo (com diâmetro máximo de 2,36 mm) e o cascalho e a cinza pesada na fração grossa como agregados gráudos (4,75-13,2 mm). A massa específica das cinzas pesadas nas duas frações foi menor do que as dos outros agregados (30% para o miúdo e quase 40% para o gráudo); a absorção de água foi bem maior (miúdo de 0,08% para 5,45% e gráudo de 0,56% para 8,14%) e porosidade quase 10 vezes superior, porém, o módulo de finura dos dois agregados miúdos foi praticamente idêntico. Os autores realizaram substituições parciais (20, 25, 50, 75 e 100%) para cada fração isoladamente e depois uma junção das duas com 50% e 100% de cada.

Os autores supracitados avaliaram que, no estado fresco, o uso da cinza pesada como agregado miúdo quase não influenciou na trabalhabilidade do concreto, no entanto, como agregado gráudo, houve uma diminuição de até 20,8% no caso da substituição total, atribuindo este resultado à forma diferenciada, superfície mais áspera e maior porosidade. No estado endurecido houve uma redução da massa específica do concreto à medida que a proporção de cinza pesada era aumentada: no caso da substituição total das duas frações obteve-se 2000 kg/m³.

Aos 7 e 28 dias obteve-se por volta de 60 e 70MPa de resistência à compressão axial, nesta ordem, e as substituições não influenciaram fortemente. O módulo de elasticidade diminuiu de acordo com o aumento das substituições: o concreto com substituição total das duas frações alcançou resultado 49% menor em relação à amostra de controle. A resistência à flexão diminuiu quase linearmente ao passo que aumentou a proporção de substituição. Observou-se que as fissuras foram mais facilmente propagadas pelas partículas de cinza pesada, enquanto que os outros agregados eram difíceis de penetrar e, em consequência disso, a direção da propagação de fissuras foi divergente.

Park *et al.* (2009) estudaram o uso das cinzas volantes (adição de 20% - teor considerado ótimo em testes prévios) e das cinzas pesadas em substituições parciais e totais ao agregado gráudo natural de origem granítica (de 0 a 100%, com intervalos de 20%), em duas faixas granulométricas, separadamente (5-13 mm e 13-20mm), em concreto poroso para pavimentação. Os autores observaram uma absorção de água 15% maior na faixa de menor diâme-

tro máximo em relação à outra para os dois tipos de agregado, porém, as cinzas pesadas apresentaram absorção de água quase duas vezes maior em relação aos naturais.

Como resposta nos compostos, os mesmos autores alcançaram um índice de vazios e permeabilidade menor à medida que a proporção de mistura de cinza aumentou, no entanto, a diferença foi pequena. O contrário ocorreu nos ensaios de resistências à compressão e à flexão, onde os resultados tenderam a diminuir à medida que a proporção de cinza era aumentada. A ruptura dos espécimes contendo apenas agregados naturais ocorreu na interface pasta/agregado, já nos compostos com cinza pesada, ocorreu no próprio agregado. Os autores concluíram que, neste caso, para incorporações em grandes quantidades, faz-se necessário a inclusão de algum elemento de reforço que melhore a resistência à compressão e à tração.

2.4 Blocos de Concreto para Alvenaria

A NBR 6136 (ABNT, 2016a) define bloco vazado de concreto simples como um “componente para execução de alvenaria, com ou sem função estrutural, vazado nas faces superior e inferior, cuja área líquida é igual ou inferior a 75% da área bruta”. De acordo esta norma, área bruta é a “área da seção perpendicular aos eixos dos furos, sem desconto das áreas dos vazios” e área líquida é a “área medida da seção perpendicular aos eixos dos furos, descontadas as áreas médias dos vazios”.

Kumar, Ananthan e Balaji (2017) afirmam que os tijolos são considerados o segundo material mais utilizado na construção civil, perdendo somente para o concreto. Zhao e Wang (2015) relatam que os blocos vazados de concreto substituíram os tradicionais tijolos cerâmicos em construções recentes por sua maior capacidade de carga, proteção de terras agrícolas e conservação de energia.

Chies, Silva e Zwonok (2003) expõem que a confecção de tijolos cerâmicos vem apresentando cada vez maiores prejuízos, com ênfase para o uso intensivo do solo necessário para a sua produção, que leva algumas centenas de anos para formar cerca de 1 cm de camada.

A utilização de blocos de concreto para alvenaria em substituição aos tradicionais tijolos cerâmicos é aconselhável nos casos em que seja necessário: maior agilidade na obra (devido ao maior tamanho dos blocos), maior resistência à compressão axial (podendo suportar o peso de toda a construção caso tenha função estrutural), obstáculos na execução de revestimentos (pode ser utilizada apenas uma demão de revestimento argamassado ou de gesso

e no caso de revestimento cerâmico, este pode ser aplicado diretamente na superfície do bloco).

De acordo com Fernandes (2016), os ingleses detêm a patente dos blocos vazados de concreto, com furos para reduzir o peso próprio, desde 1850, contudo, foi em 1832 que os mesmos idealizaram o bloco de concreto para alvenaria ainda no formato maciço. Relatos do autor mostram que, no Brasil, a alvenaria estrutural composta por blocos de concreto teve início formal no fim da década de 60, mas há indícios do consumo do bloco como vedação muito antes desta época. O autor assegura que o bloco de concreto para alvenaria é o artefato de concreto mais produzido no Brasil.

Tauil (2016) narra que, nos Estados Unidos (EUA), especialmente nos últimos 40 anos, houve um amplo crescimento da utilização de alvenaria estrutural armada na construção de hotéis, tomando como exemplo o Hotel Excalibur, em Las Vegas. Constituído de 4 edifícios de 28 pavimentos cada um, o Hotel Excalibur teve sua construção em paredes estruturais de 29 centímetros nos cinco primeiros pavimentos e 19 centímetros de espessura nas paredes estruturais dos outros 23 pavimentos.

No âmbito nacional, Tauil (2016) pronuncia que o desafio de construir casas e edifícios residenciais dos programas do extinto Banco Nacional da Habitação (BNH) com qualidade e gastos reduzidos foi satisfeito com o surgimento da alvenaria estrutural no país; no início da década de 70, sobrados e prédios de poucos andares eram erguidos seguindo este método construtivo; já nos anos 90, os construtores procederam à construção de edifícios de 10 a 20 pavimentos e atualmente esta tecnologia (com o emprego dos blocos de concreto) é vista em bairros nobres, com apartamentos de, por exemplo, 200 m² de área, citando o Edifício Solar dos Alcântara, em São Paulo. Este possui 24 andares e é o mais alto do Brasil construído em alvenaria estrutural.

Em Fortaleza, o Edifício Fortune Residence Club, situado no bairro Água Fria, é o maior da cidade utilizando este método construtivo, com 15 andares (10 primeiros em blocos de concreto e 5 últimos em blocos cerâmicos) e duas torres de estruturas idênticas.

Dentro de boa técnica, explica Fernandes (2016), os blocos de concreto propiciam um sistema construtivo limpo, prático, rápido, econômico e eficiente; a produção destes se dá por meio de equipamentos manuais, pneumáticos ou hidráulicos, sendo este último o mais eficaz por garantir o controle dos tempos de alimentação, prensagem, acomodação e extrusão das peças, além de assegurar vibração e prensagem sincronizadas, o que permite a aquisição de elementos de densidade constante, bem compactos e resistentes (mesmo com pequenas in-

constâncias nas características dos materiais utilizados em sua fabricação), e com razoável economia de cimento.

O concreto utilizado neste tipo de produção é de consistência seca, com aspecto semelhante à terra úmida ou “farofa”. O concreto de consistência plástica, aplicado de forma corrente na construção civil, segue a Lei de Abrams. Nesse caso, a resistência do concreto é diretamente influenciada pela relação água/cimento, sendo que quanto maior esta relação, menor a resistência.

Oliveira (2004) esclarece que, no concreto seco, essa regra não é válida: uma maior quantidade de água, dentro de certos limites, resultará em uma resistência mais elevada. Isso acontece pelo fato da trabalhabilidade ser melhorada quando há um aumento da quantidade de água, visto que o atrito interno diminui e facilita a compactação do concreto.

Zhao e Wang (2015) declaram que o bloco de concreto é um material facilmente disponível e que seu uso em estruturas de alvenaria continua sendo difundido em todo o mundo.

2.5 Cinzas de Termelétrica em Blocos de Concreto para Alvenaria

Chies, Silva e Zwonok (2003) noticiam que os grupos industriais que fabricam produtos, e nestes incluem-se os artefatos para a construção civil (blocos, tijolos, placas, lajotas, painéis, etc.), se destacam como o setor que usufrui, provavelmente, do mais significativo potencial de elaborar novas utilidades que agreguem considerável utilização dos resíduos de carvão. Estes autores produziram blocos de encaixe moldados sob pressão à base de cinzas pesadas, propondo a substituição da areia pela dita cinza.

Segundo os referidos autores, não há necessidade de tratamento prévio do resíduo, sendo estes utilizados como recebidos das fontes produtoras. A confecção deu-se com substituição total da areia por uma mistura de cinza pesada e cal hidratada, nas proporções de 90% e 10%, respectivamente. Os autores fizeram testes de resistência à compressão axial, obtendo respostas entre 6 MPa e 10 MPa, e absorção de água com resultados variando de 25% a 30%.

Arenas *et al.* (2011) pesquisaram a substituição de até 50% do cimento pelas cinzas volantes e de até 30% do agregado miúdo natural pela cinza pesada em blocos de concreto para alvenaria, concluindo que as cinzas volantes e pesadas aumentaram a resistência ao fogo e diminuíram a densidade e a resistência mecânica aos 28 dias. Em resumo, seu uso simultâneo afetou negativamente as propriedades físicas e mecânicas dos blocos, mas aumentou a resistência ao fogo.

Os autores citados anteriormente compreenderam que as propriedades do material modificado validam seu possível uso para aplicações não estruturais, como fachadas e divisórias internas, uma vez que possui propriedades mecânicas similares aos materiais de mercado. Além disso, o novo composto produzido por eles obteve maior isolamento contra incêndio e menor condutividade térmica do que os blocos referenciais, sendo conveniente para certas aplicações.

Wongkeo *et al.* (2012) estudaram a substituição parcial do cimento pela cinza pesada em 10%, 20% e 30% (em massa) na produção de blocos de concreto leve pelo método do concreto celular autoclavado. Os autores aplicaram cimento Portland tipo I, areia de rio como agregado miúdo (diâmetro máximo de 4,75 mm), hidróxido de cálcio e pó de alumínio (adição de 0,2% em massa, sobre a massa do composto), utilizado como agente formador de poros, visto que reage com o hidróxido para formar hidrogênio (bolhas de gás) na pasta de cimento. A cinza pesada foi triturada em um moinho de bolas por 6h e apresentou cerca de 82% na soma dos óxidos de silício, alumínio e ferro, o que é um indício de sua pozolanicidade.

Após a desforma, os concretos foram autoclavados por 6h e deixados ao ar por 7 dias para verificação da resistência à compressão, massa específica aparente, resistência à flexão e condutividade térmica. Observou-se que houveram incrementos nos valores dos resultados destes ensaios conforme aumentava o teor de cinza pesada como parte de substituição ao cimento Portland. Contudo, enquanto as resistências à compressão e à flexão aumentavam em aproximadamente 20% para o teor de 30% de substituição, a condutividade térmica crescia apenas 6%. Os autores concluíram, portanto, que o uso da cinza pesada como substituição parcial do cimento pode ser visto como benéfico.

Conte (2014) pesquisou a confecção de blocos de concreto para alvenaria compostos por cinzas pesadas de carvão mineral, cal, cimento, areia e água, produzidos por procedimentos padronizados e com dimensões características de 12x15x30 cm, possuindo dois furos transversais com diâmetro de 8,8 cm e saliências tronco-cônicas na face superior e rebaixos iguais na sua face inferior, no entorno dos furos, permitindo o seu encaixe. Como a finalidade deste autor era verificar o desempenho da alvenaria de vedação que estes blocos possam vir a compor, não foi explicitado no trabalho o traço utilizado ou se a aplicação da cinza pesada foi como adição ou substituição de agregados.

Os blocos possuíram baixa variação dimensional, atendendo às tolerâncias previstas em norma. Para o ensaio de absorção de água, os valores individuais obtidos para os blocos de cinza pesada foram inferiores ao valor máximo individual de 16% previsto em norma (obteve-se 14,4%, 14,6% e 14,5%), já a média, de 14,5%, foi superior ao limite especificado

(13%), porém, o autor não considerou o lote como recusado. A resistência característica dos blocos foi de 2,68 MPa.

O autor avaliou o desempenho da alvenaria com blocos assentados com junta seca, rejuntados e pintados em uma das faces. O nível de desempenho das alvenarias foi considerado mínimo quanto ao choque térmico e ao impacto de corpo mole. Enquadraram-se no nível intermediário em relação ao impacto de corpo duro e no nível superior para os ensaios de estanqueidade e solicitações provenientes de cargas de peça suspensa.

Silveira (2001) produziu blocos de concreto para vedação com substituição em volume dos agregados pela cinza pesada de termelétrica e observou que não houve uma tendência entre o teor de inclusão desta cinza no composto e os valores de resistência à compressão, porém, a substituição do pó-de-pedra foi avaliada como positiva, especialmente para a substituição total. O autor também constatou que o incremento de cinza pesada atribuiu uma melhor coesão às misturas.

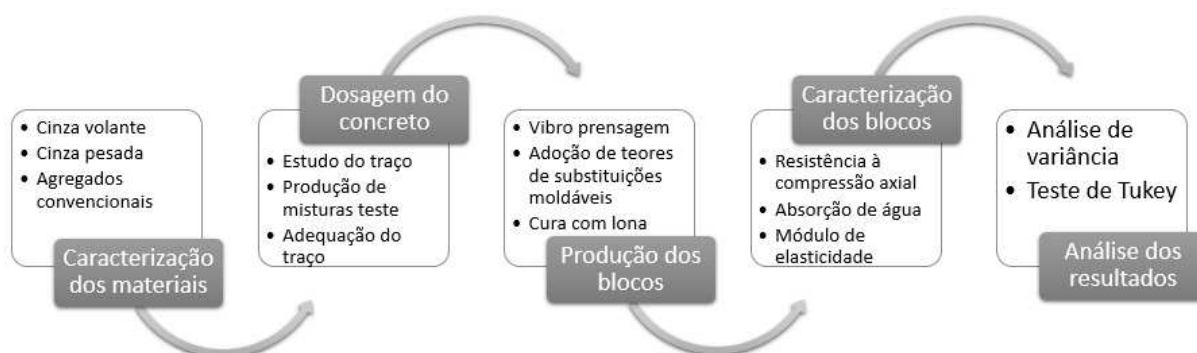
Percebe-se que há uma carência de estudos que abordem a aplicação das cinzas volantes e pesadas em blocos de concreto para alvenaria, o que torna esta pesquisa ainda mais relevante.

3 MATERIAIS E MÉTODO

O método utilizado no desenvolvimento da pesquisa foi de caráter fundamentalmente experimental. Iniciou-se com a caracterização da cinza volante, da cinza pesada e dos demais materiais que compuseram as misturas, com subsequente dosagem, confecção, caracterização dos blocos de concreto para alvenaria e análise dos resultados obtidos.

Abaixo, na Figura 3, encontra-se um fluxograma com o resumo das etapas supracitadas. Logo nos itens seguintes, foi feita uma descrição dos materiais e dos ensaios que foram realizados nestes e nos blocos, além do procedimento utilizado para as produções e para a análise estatística.

Figura 3 – Fluxograma da metodologia da pesquisa



Fonte: Autoria própria (2018).

3.1 Materiais

Os materiais convencionais utilizados neste estudo foram os mesmos empregados em uma grande fábrica de blocos de concreto situada em Fortaleza - CE. Buscou-se replicar o traço e os materiais desta empresa com a finalidade de reproduzir em laboratório condições que assegurassem, ou que pelo menos se aproximassem bastante, da realidade do mercado local. Apesar de utilizar o mesmo fornecedor da máquina vibro prensa da referida fábrica de blocos, foi necessário um ajuste no traço com a inserção de uma areia natural fina para melhor acabamento. A água de amassamento foi a fornecida pelo sistema de abastecimento público de Fortaleza – CE.

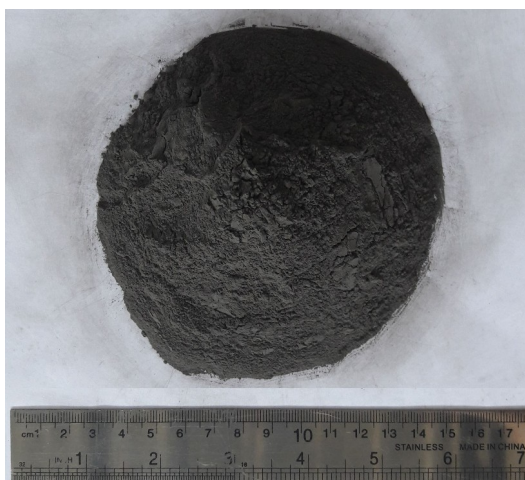
3.1.1 Cimento Portland

O cimento Portland utilizado nas produções foi o CP V-ARI por ser o mais puro comercializado na cidade de Fortaleza - CE. Dessa forma, verifica-se apenas a influência das substituições propostas neste estudo, diminuindo ao máximo a interferência de adições minerais contidas nos demais tipos de cimento distribuídos na região de estudo. Além disso, recomenda-se o uso deste tipo de cimento por proporcionar maiores resistências nas primeiras idades, o que facilita o manuseio das peças e diminui o índice de quebras.

3.1.2 Cinza volante

A cinza volante (Figura 4) foi obtida a partir dos gases de exaustão da queima do carvão mineral na Usina Termelétrica do Pecém, instalada em São Gonçalo do Amarante - CE, município pertencente à região metropolitana de Fortaleza - CE.

Figura 4 – Cinza volante em estudo



Fonte: Autoria própria (2018).

Esta cinza não passou por nenhum tipo de beneficiamento a não ser a secagem em estufa até constância de massa, com resfriamento ao ar antes das produções.

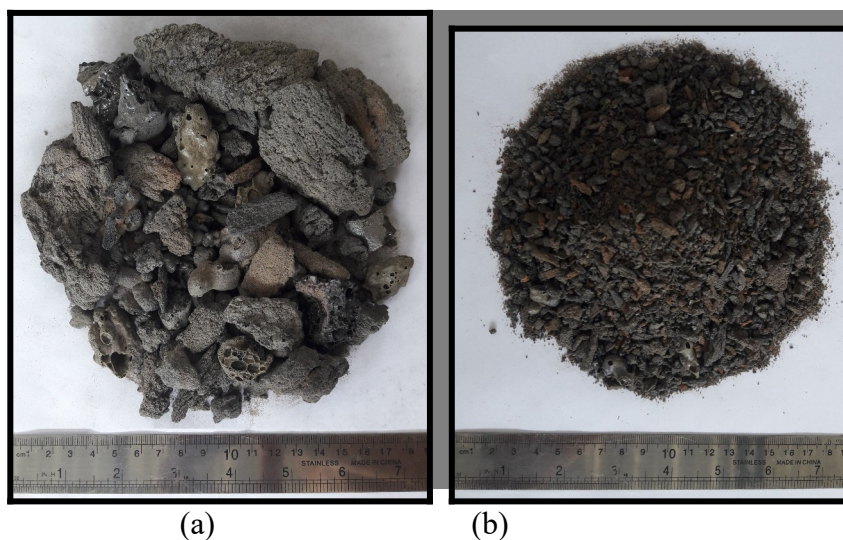
3.1.3 Agregados

Os agregados convencionais foram: gráúdo e miúdo artificiais de origem granítica, sendo provenientes da britagem da mesma rocha; e areia fina de origem natural não especificada.

3.1.4 Cinza pesada

A cinza pesada (Figura 5a) também foi fornecida pela Usina Termelétrica do Pecém, a partir do leito de arraste, com resfriamento em tanques com água. Esta cinza é granular, com formatos e dimensões variados. Com o intuito de minimizar o efeito dessas variáveis no empacotamento granulométrico entre os agregados convencionais e a mistura destes com cinza pesada, fez-se uma adequação da curva granulométrica da cinza em relação ao agregado miúdo convencional, por meio de peneiramento e proporcionamento indicado no ensaio de composição granulométrica dos agregados convencionais.

Figura 5 – Cinza pesada em estudo: (a) coletada; (b) após beneficiamento



Fonte: Autoria própria (2018).

A cinza utilizada nas produções foi a beneficiada (Figura 5b). Dessa forma, procura-se estudar o efeito do próprio material alternativo em substituição parcial aos convencionais. Antes do beneficiamento, esta cinza também foi seca em estufa até constância de massa e, após, armazenada em baldes hermeticamente fechados até as produções.

3.1.5 Aditivo

O aditivo utilizado foi, segundo o fabricante, elaborado para fins industriais, pronto para uso, com função plastificante e densificador de concreto, isento de cloretos. Dessa forma atende-se a recomendação da NBR 6136 (ABNT, 2016a): “os aditivos não podem conter substâncias potencialmente capazes de promover a deterioração do concreto dos blocos ou materiais próximos, quer por contato direto, quer por disseminação de íons”.

Algumas vantagens citadas pelo fabricante são: melhora a consistência do concreto, aumenta a resistência mecânica, melhora a qualidade do acabamento, facilita a desmoldagem, aumenta o grau de compactação, reduz a necessidade de cura a vapor e aumenta a impermeabilização.

3.2 Método

A princípio, fez-se a caracterização dos materiais constituintes dos concretos. Em seguida, a dosagem do concreto seco envolveu misturas teste e adequações no traço, com posterior definição dos teores de substituição de cada tipo de cinza. Logo após, a produção dos blocos de concreto para alvenaria deu-se de forma homogênea, adotando o mesmo tempo de vibração e energia de compactação para todos os traços estudados. Nas idades de 7 e 28 dias, os testes foram realizados nos blocos para caracterização destes, com posterior análise dos resultados obtidos.

3.2.1 Caracterização dos materiais

Para a caracterização dos materiais seguiu-se o recomendado nas normas técnicas vigentes. Em alguns casos, na ausência de normas específicas ou de equipamentos próprios, foram feitas adaptações que serão explicadas neste capítulo.

3.2.1.1 Massa específica e absorção de água

A realização do ensaio de massa específica é essencial tendo em vista que o foco desta pesquisa é a substituição parcial de cimento e/ou do agregado miúdo por resíduos de termelétrica na produção de blocos de concreto para alvenaria. Isso se deve à circunstância de que, para um melhor efeito de comparação, o volume de cada material a ser utilizado na con-

fecção dos traços deve ser o mesmo, e não a massa. Assim, cada traço será desenvolvido em massa, porém, com compensação da massa específica, promovendo, então, uma substituição em volume. Para a cinza volante em estudo, observou-se o método proposto pela NBR NM 23 (ABNT, 2001a), já para a cinza pesada e para o agregado miúdo convencional utilizou-se o recomendado na NBR NM 52 (ABNT, 2009a), enquanto que para a fração graúda do agregado convencional acompanhou-se o fixado pela NBR NM 53 (ABNT, 2009b), norma que também estabelece o método para obtenção do dado de absorção de água desta fração de agregado. Para o ensaio de absorção de água do agregado miúdo convencional e da cinza pesada seguiu-se o recomendado pela NBR NM 30 (ABNT, 2001b).

3.2.1.2 Distribuição granulométrica

No caso da cinza volante em estudo, este ensaio deu-se pela granulometria a laser, executada pelo equipamento Mastersize 2000 E, com o auxílio de uma unidade de dispersão Scirocco 2000 M, enquanto que para a cinza pesada e para os agregados convencionais cumpriu-se o indicado pela NBR NM 248 (ABNT, 2003a).

3.2.1.3 Requisitos físicos da NBR 12653 (ABNT, 2015a)

A norma de requisitos para classificação de um material como pozolânico, NBR 12653 (ABNT, 2015a), apresenta requisitos físicos para sua certificação. Os ensaios exigidos são: material retido na peneira 45 μ m, obtido por intermédio do ensaio de granulometria a laser; índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias, em relação ao controle, NBR 5752 (ABNT, 2014b) e atividade pozolânica com cal aos sete dias, NBR 5751 (ABNT, 2015b). Logo, estes ensaios foram realizados na cinza volante em estudo.

3.2.1.4 Fluorescência de Raios-X

Este ensaio, executado com materiais em forma de pó, foi realizado com um espectrômetro de Raios-X Rigaku ZSX mini II, no intuito de identificar os elementos químicos e suas concentrações na composição dos resíduos estudados, dessa forma verificando um dos requisitos químicos expostos na NBR 12653 (ABNT, 2015a). Com isso, é possível entender a influência que as substituições possam vir a causar nas propriedades dos compostos modifica-

dos. Então, a cinza volante foi enviada em seu estado natural e a cinza pesada foi peneirada na peneira com abertura de malha #0,15 mm.

3.2.1.5 Difração de Raios-X

Este é um complemento do ensaio de Fluorescência de Raios-X, visto que, têm-se a identificação dos compostos químicos cristalinos presentes na amostra. Para isso, utilizou-se um difratômetro de raios-X de modelo e marca X'Pert PRO - PANalytical com *spinner* e geometria Bragg-Brentano, operando de modo contínuo com radiação de Co K-alpha1 a 40 kV e 40mA. Os difratogramas foram obtidos no intervalo 2θ de 5° a 100° e tempo de contagem de 67s, sendo analisados com o software X'Pert HighScore Plus para a identificação de fases. As amostras foram enviadas como citado no ensaio de Fluorescência de Raios-X.

3.2.1.6 Lixiviação e Solubilização

Lixiviação, conforme a NBR 10005 (ABNT, 2004a), é a “capacidade de transferência de substâncias orgânicas e inorgânicas presentes no resíduo sólido, por meio de dissolução no meio extrator”. A norma supracitada fixa os requisitos exigíveis para a obtenção do extrato lixiviado de resíduos sólidos, visando diferenciar os resíduos classificados pela NBR 10004 (ABNT, 2004b) como perigosos (classe I) e não perigosos (classe II). Na hipótese da classificação se ajustar como não perigosos, há ainda a subdivisão em não inertes (classe II A) e inertes (classe II B), regida pelo ensaio de solubilização, NBR 10006 (ABNT, 2004c). A partir destes dois ensaios tem-se a classificação dos resíduos sólidos, de acordo com a NBR 10004 (ABNT, 2004b), que no caso deste estudo são as cinzas volantes e as cinzas pesadas provenientes da queima do carvão mineral na Usina Termelétrica do Pecém.

3.2.1.7 Microscopia Eletrônica de Varredura

O conhecimento da forma da cinza volante, por meio de análises microscópicas, também é significativo para um melhor entendimento da sua influência em substituição ao cimento Portland. O equipamento utilizado neste ensaio foi um microscópio eletrônico de varredura Inspect S50 - FEI.

3.2.1.8 Processamento Digital de Imagens

O *Aggregate Image Measurement System* (AIMS) é um equipamento que utiliza diferentes métodos de processamento digital de imagens para analisar características como forma 2D (agregados miúdos), esfericidade (agregados graúdos), angularidade (agregados graúdos e miúdos), textura superficial (agregados graúdos) e lamelaridade (agregados graúdos). De acordo com Bessa (2012), o AIMS utiliza um sistema simples, que consiste em uma câmera e dois diferentes tipos de iluminação para capturar imagens de agregados em diferentes resoluções, das quais as propriedades de forma são avaliadas usando técnicas de análise de imagens. Ainda segundo o autor, resumidamente: quando o ensaio é iniciado, a bandeja contendo os agregados começa a girar dentro do equipamento, e a imagem de cada partícula é capturada; em seguida, a bandeja gira novamente para que a altura dos agregados seja obtida e, assim, todas as dimensões incluindo a profundidade, sejam adquiridas; uma terceira digitalização é feita para que os níveis de textura sejam obtidos.

3.2.1.9 Reatividade álcali-agregado

Já que é um resíduo sabidamente rico em sílica, a cinza pesada torna-se suscetível a expansões quando utilizada como agregado em compostos cimentícios. O resultado deste ensaio comprovou se o agregado avaliado é potencialmente reativo e, caso afirmativo, qual o seu grau de reatividade, ou inócuo com grau R0, de acordo com a NBR 15577-1 (ABNT, 2018a), logo, a realização deste é bastante relevante no que se refere à durabilidade dos produtos da pesquisa. Para a determinação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado cumpriu-se o proposto na NBR 15577-4 (ABNT, 2018b). Este ensaio foi aplicado nos agregados naturais (para efeito de comparação) e na cinza pesada em estudo.

3.2.1.10 Material pulverulento

Este ensaio é regido pela NBM NM 46 (ABNT, 2003b) e determina o material fino que passa através da peneira de 75µm, por lavagem. Foi realizado nos agregados convencionais e na cinza pesada em estudo.

3.2.1.11 Massa unitária solta

A determinação da massa unitária solta foi conforme o recomendado pela NBR NM 45 (ABNT, 2006). Como citado anteriormente, a cinza pesada tem formatos variados e diferentes dos agregados convencionais, então, pretendeu-se avaliar essa variabilidade no tocante à massa do material em um determinado volume de recipiente, em relação aos agregados convencionais.

3.2.1.12 Índice de forma

A forma dos agregados pode influenciar tanto no estado fresco quanto no estado endurecido do concreto, então, a fim de averiguar o índice de forma da cinza pesada e comparar com o resultado obtido nos agregados convencionais, realizou-se o método descrito na NBR 7809 (ABNT, 2008a).

3.2.1.13 Índice de desgaste por abrasão “Los Angeles”

Observando a fragilidade da cinza pesada e na ausência do equipamento necessário para a execução do ensaio de resistência ao esmagamento de agregados graúdos, optou-se por realizar o ensaio de índice de desgaste por abrasão “Los Angeles” como medida indireta de resistência dos agregados convencionais e da cinza pesada, comparando as duas situações. A obtenção deste índice é orientada pela norma NBR NM 51 (ABNT, 2001c).

3.2.1.14 Cloretos, Sulfatos e Sais solúveis

Visando garantir a durabilidade dos compostos cimentícios que a cinza pesada possa vir a compor, realizou-se o teste para verificação do teor de cloretos, sulfatos e sais solúveis nesta e, analogamente, nos agregados convencionais. A norma técnica NBR 9917 (ABNT, 2009c) traz as recomendações para este fim.

3.2.2 Dosagem do concreto seco

Inicialmente, tentou-se replicar o traço utilizado em uma grande empresa de produção de blocos situada em Fortaleza - CE. Apesar de possuir máquinas vibro-prensas do mesmo fabricante que a desta pesquisa, os métodos de produção são diferentes, sendo a primeira completamente automatizada e a segunda manual. Logo, não se obteve êxito nesta re-

produção, sendo necessário ajustar o traço com um aumento do consumo de cimento e a inserção de uma areia fina natural para melhor acabamento.

A proporção entre os agregados foi obtida pela curva granulométrica ponderada para blocos e *pavers* indicada por Fernandes (2016), onde a partir da composição granulométrica de cada um dos agregados arbitram-se suas porcentagens na mistura até adequação dos limites apresentados para blocos e *pavers*. A Tabela 1 apresenta a composição final dos agregados; a Figura 6 os limites para blocos e *pavers* e a curva em estudo se enquadrando nestes limites.

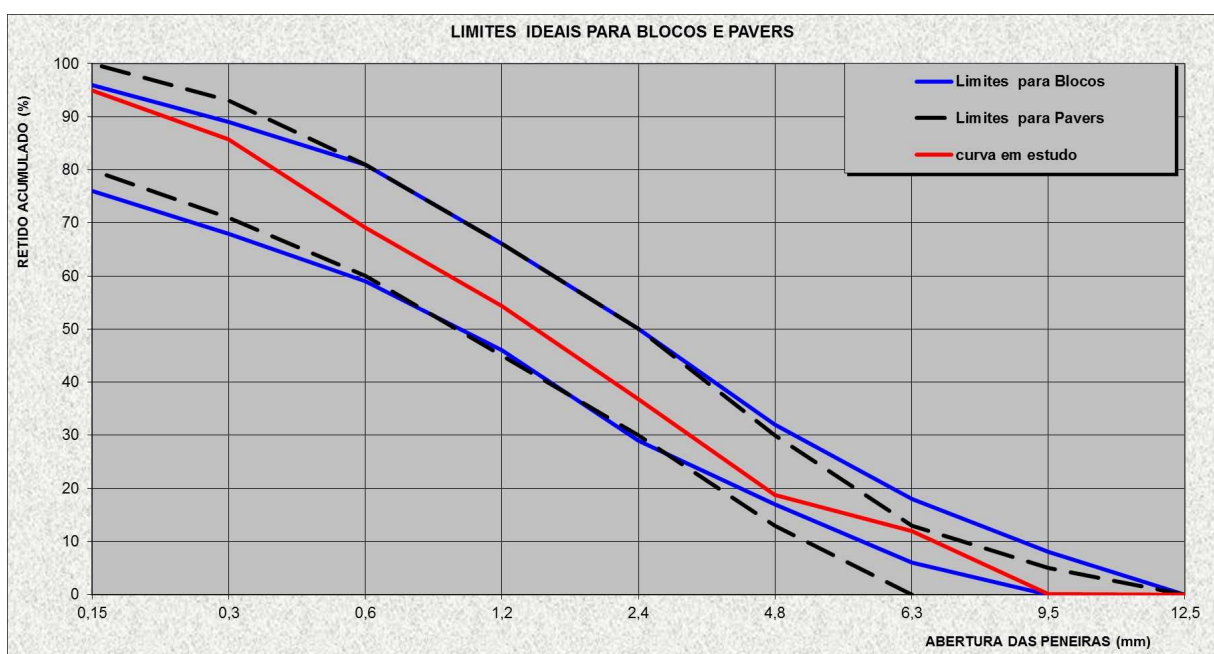
Tabela 1 – Proporção de cada agregado nas misturas

<i>Material</i>	<i>Areia fina</i>	<i>Agregado miúdo</i>	<i>Agregado graúdo</i>
<i>Proporção</i>	15%	60%	25%

Fonte: Autoria própria (2018).

Figura 6 – Limites para blocos e *pavers* indicados por Fernandes (2016) e curva em estudo

Fonte: Adaptado de Fernandes (2016).



A proporção (cimento : agregados), adotada de acordo com a capacidade de produção da máquina vibro-prensa utilizada nesta pesquisa, foi 1 : 12. Assim, aplicando as proporções identificadas na Tabela 1, o traço unitário em massa seca para o concreto referencial (cimento : areia fina : agregado miúdo : agregado graúdo) ficou 1 : 1,8 : 7,2 : 3.

A quantidade de água adicionada na mistura foi relativa à umidade de 7% sobre a massa de agregados, sendo que estes foram secos em estufa até constância de massa antes das produções, garantindo, assim, que este teor de umidade fosse fixado em todos os traços. Para o aditivo adotou-se a proporção utilizada na empresa supracitada, onde um traço de 872 kg de agregado deve conter 4 kg de aditivo + água na proporção de 1 : 9. Dessa forma, nas produções desta pesquisa, o aditivo foi diluído na água de amassamento e, assim, estes foram acrescentados conjuntamente.

Para os traços modificados, aliou-se a bibliografia com a viabilidade de moldagem da máquina vibro-prensa. Dentre os estudos pesquisados, Sani, Muftah e Muda (2010) mostram o teor de 30% de substituição parcial do agregado miúdo pela cinza pesada em concretos especiais como o mais satisfatório. Propôs-se, então, utilizar este teor como máximo nesta pesquisa. Iniciou-se com 10% de substituição (10P) e percebeu-se uma certa dificuldade em moldar os blocos, devido à influência da cinza pesada no estado fresco do concreto seco. Então, o próximo teor produzido foi o de 15% (15P), onde observou-se que este seria o máximo possível de moldar. Para criar um intervalo constante, o último traço foi com 5% de substituição (5P), criando assim o intervalo de substituições adotado nesta pesquisa.

Em relação à cinza volante, propuseram-se teores maiores de substituição tendo em vista o baixo consumo de cimento na produção dos blocos. Pesquisa desenvolvida por Silva (2017) utilizando uma cinza volante também proveniente da Usina Termelétrica do Pecém em concreto convencional explana que a substituição de 15% do cimento pela cinza volante já traz prejuízos nos resultados de resistência à compressão axial, no entanto, o teor de 7,5% melhorou essa característica. A cinza volante não piora significativamente o estado fresco do concreto seco, com isso, indicaram-se os teores de 10% (10V), 20% (20V) e 30% (30V) de substituição do cimento Portland pela cinza volante.

Sabendo da fragilidade da cinza pesada e do potencial de incremento da resistência à compressão axial da cinza volante, também sugeriu-se unir estas duas e verificar sua interação e capacidade de equiponderar seus efeitos nas misturas. Além disso, Froener (2016) cita que o uso combinado de um material mais reativo aliado à cinza pesada pode melhorar sua reatividade nos compostos cimentícios. Assim, sugeriu-se unir os teores individuais anteriores, resultando nos traços 5P10V, 10P20V e 15P30V.

O consumo dos materiais por metro cúbico de concreto será apresentado correlacionando a massa específica de cada um dos seus constituintes (Tabela 2), porém, por se tratar de concreto seco, os vazios presentes após a mistura dos materiais proporciona um volume fi-

nal superior a 1m³, ficando mais próximo deste valor após a vibro-prensagem, todavia, ainda excedente.

Tabela 2 – Consumo de materiais em kg/m³ de concreto

Material Traço	Cimento	Cinza volante	Areia fina	Agregado miúdo	Cinza pesada	Agregado grauído	Água	Aditivo
Referencial	171,3	-	308,4	1336,3	-	411,2	123,4	0,9
5P	171,3	-	308,4	1269,5	41,0	411,2	123,4	0,9
10P	171,3	-	308,4	1202,7	81,9	411,2	123,4	0,9
15P	171,3	-	308,4	1135,9	122,9	411,2	123,4	0,9
10V	154,2	12,5	308,4	1336,3	-	411,2	123,4	0,9
20V	137,1	25,0	308,4	1336,3	-	411,2	123,4	0,9
30V	119,9	37,5	308,4	1336,3	-	411,2	123,4	0,9
5P10V	154,2	12,5	308,4	1269,5	41,0	411,2	123,4	0,9
10P20V	137,1	25,0	308,4	1202,7	81,9	411,2	123,4	0,9
15P30V	119,9	37,5	308,4	1135,9	122,9	411,2	123,4	0,9

Onde: 5P – traço com substituição de 5% do agregado miúdo convencional pela cinza pesada beneficiada; 10P – traço com substituição de 10% do agregado miúdo convencional pela cinza pesada beneficiada; 15P – traço com substituição de 15% do agregado miúdo convencional pela cinza pesada beneficiada; 10V – traço com substituição de 10% do cimento Portland pela cinza volante; 20V – traço com substituição de 20% do cimento Portland pela cinza volante; 30V – traço com substituição de 30% do cimento Portland pela cinza volante; 5P10V – traço com substituição conjunta de 5% do agregado miúdo convencional pela cinza pesada beneficiada e de 10% do cimento Portland pela cinza volante; 10P20V – traço com substituição conjunta de 10% do agregado miúdo convencional pela cinza pesada beneficiada e de 20% do cimento Portland pela cinza volante; 15P30V – traço com substituição conjunta de 15% do agregado miúdo convencional pela cinza pesada beneficiada e de 30% do cimento Portland pela cinza volante.

Fonte: Autoria própria (2018).

Vale ressaltar que as substituições foram em massa compensando a massa específica, promovendo, então, uma substituição em volume. Dessa forma, observa-se na Tabela 2 que a massa de agregados convencionais + cinza pesada não foi mantida constante em relação ao traço de referência, entretanto, o consumo de água e de aditivo foi fixado. Com manutenção destes parâmetros em relação ao traço referencial, contempla-se o efeito das cinzas tanto no estado fresco quanto no estado endurecido dos concretos.

3.2.3 Produção dos Blocos de Concreto para Alvenaria

Por serem as dimensões nominais mais corriqueiras na região de estudo, foi adotado o formato de 14x19x39 cm (largura, altura, comprimento), representando um bloco inteiro da família 15x40, com dois furos. A NBR 6136 (ABNT, 2016a) define família de blocos

como um “conjunto de componentes de alvenaria que interagem modularmente entre si e com outros elementos construtivos”. Os materiais foram misturados em betoneira.

Foram moldados blocos de classe C, que podem ou não ter função estrutural, com espessura de paredes transversais e longitudinais de 20 mm, sendo superior ao mínimo estabelecido pela norma supracitada, 18 mm. A mesma norma define classe como a “diferenciação dos blocos segundo o seu uso” e permite o uso de blocos com função estrutural classe C, com larguras de 140 mm e 190 mm, para edificações de até cinco pavimentos. Após a produção ocorreu a extrusão, ou seja, a desmoldagem quase que imediata dos blocos para reutilização do molde na produção de outras peças. A Figura 7 ilustra os blocos após os processos de moldagem e extrusão.

Figura 7 – Blocos após processos de moldagem e extrusão



Fonte: Autoria própria (2018).

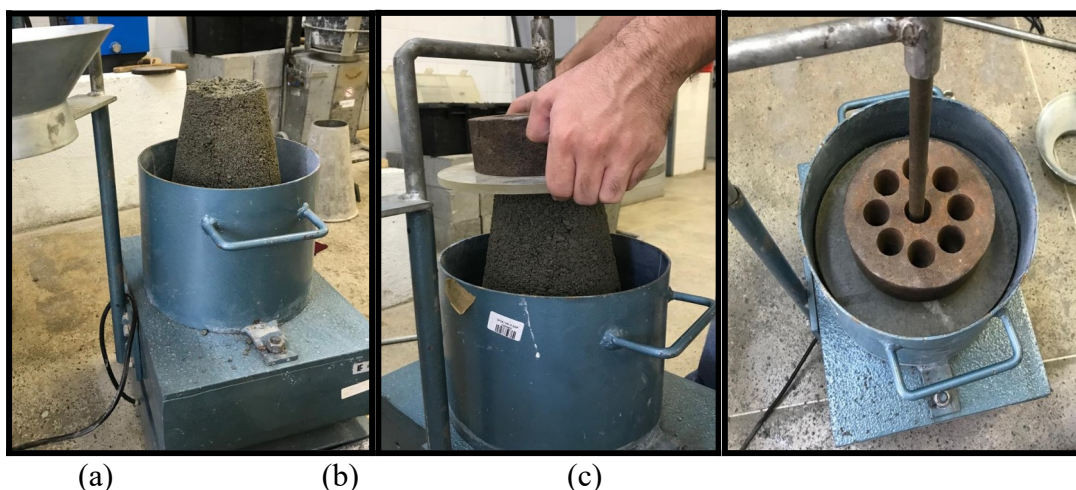
Então, foi realizada uma inspeção visual, onde foi observado se os blocos possuíam arestas vivas, o que é recomendado pela NBR 6136 (ABNT, 2016a), e/ou trincas, fraturas ou outros defeitos que possam prejudicar o seu assentamento ou afetar a resistência e a durabilidade das construções que venham a empregar os produtos finais desta pesquisa, não sendo realizado qualquer reparo que oculte defeitos eventualmente existentes nos blocos. Após esta verificação, os blocos que não atenderam aos requisitos visuais foram descartados e os demais submetidos à cura.

3.2.3.1 Consistômetro de Vebe

Na produção de blocos de concreto para alvenaria por vibro-prensagem e extrusão, é utilizado um concreto de consistência seca. Nesse caso, o ensaio convencionalmente aplicado para determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone, regido pela NBR NM 67 (ABNT, 1998), aplicado em concretos de consistência plástica, é ineficaz.

Para o concreto seco, então, utiliza-se o consistômetro de Vebe, onde o método da norma supracitada é mantido até o estágio de puxar o molde tronco-cônico, ou seja, após compactar cada camada a 1/3 da altura com 25 golpes da haste metálica. No entanto, após a retirada do molde, como percebe-se na Figura 8a, não há abatimento, sendo intitulado como “*no-slump*” ou “*slump zero*”. Com isso, o equipamento sujeita uma vibração com 60 Hz de frequência, ao mesmo tempo em que o operador solta o prato de vidro com um peso de 7,5 kg (Figura 8b). No momento em que aciona-se a vibração e solta-se o prato, inicia-se a contagem do tempo necessário para que a massa de concreto entre em contato com todo o diâmetro do prato (Figura 8c). O resultado é, então, este tempo medido em segundos.

Figura 8 – Ensaio com o consistômetro de Vebe no estado fresco do concreto seco



Fonte: Autoria própria (2018).

Logo, após a mistura do concreto, este ensaio foi realizado. No Brasil, não há uma norma técnica regulamentadora para este ensaio, sendo, internacionalmente, referido pela ACI 211.3 (2009) e pela ASTM C1170 (1998). Esta última preconiza que o peso acima do prato de vidro seja de 22,5 kg, todavia, adotou-se 7,5 kg como forma de adaptação, visto que o consistômetro utilizado na pesquisa é manual. Como utilizou-se o mesmo peso para todos os concretos, manteve-se a ideia de comparação entre o traço referencial e os modificados.

3.2.3.2 Vibro-prensagem

A fim de promover uma melhor compactação das misturas nas fôrmas dos blocos, foi utilizada uma máquina hidráulica com comandos manuais que opera por vibro prensagem, ou seja, além da vibração do equipamento durante a confecção dos blocos há também uma força atuando de cima para baixo ao final do processo com o intuito de condensar ainda mais os compostos (Figura 9).

Figura 9 – Processo de vibro-prensagem dos blocos



Fonte: Autoria própria (2018).

A referida máquina possui capacidade de aplicação de carga de compressão de 40kN e o motor responsável pela vibração tem 10 cv de potência. Com isso, cumpriram-se as recomendações da NBR 6136 (ABNT, 2016a), que estabelece os requisitos para produção e aceitação de blocos vazados de concreto simples, destinados à execução de alvenaria com ou sem função estrutural, onde é explanado que “os blocos devem ser fabricados e curados por processos que assegurem a obtenção de um concreto suficientemente homogêneo e compacto, de modo a atender todas as exigências desta norma”.

3.2.3.3 Cura

A cura foi realizada por meio da cobertura dos blocos com uma lona plástica na cor preta (caracterizada por absorver o calor proveniente da luz solar) por 72 horas. Houve o cuidado para que as amostras não entrassem em contato com o solo, evitando uma possível absorção da água que propicia a umidade dos blocos por este. Em seguida, os blocos foram identificados e empilhados na área externa do Laboratório até as datas dos ensaios mencionados a seguir.

3.2.4 Caracterização dos Blocos de Concreto para Alvenaria

Alguns requisitos físico-mecânicos, expostos na NBR 6136 (ABNT, 2016a), devem ser atendidos para aceitação do lote de blocos: resistência à compressão axial e absorção de água. Além destes, também foi executado o ensaio de módulo de elasticidade. Todos estão descritos abaixo.

3.2.4.1 Resistência à Compressão Axial

De acordo com a NBR 12118 (ABNT, 2014a), é a “relação entre a carga de ruptura e a área bruta do corpo de prova quando submetido ao ensaio de compressão axial”. Esta foi obtida aos 7 e 28 dias de produção por meio do método de ensaio recomendado pela dita norma. A NBR 6136 (ABNT, 2016a) fixa valores mínimos apenas para os 28 dias de produção, no entanto, procurou-se investigar a evolução deste parâmetro nos blocos.

Para este ensaio, em cada traço, foram utilizadas 6 amostras, como prescrito na norma citada anteriormente. A regularização das faces de trabalho dos corpos de prova submetidos ao ensaio de resistência à compressão axial, ou seja, as faces que estiveram em contato direto com a prensa (aplicação de carga na direção do esforço que o bloco deve suportar durante o seu emprego), foi feita por meio de retífica superficial com equipamento apropriado, seguindo o recomendado na NBR 12118 (ABNT, 2014a).

Este resultado será apresentado em concordância com o prescrito na NBR 6136 (ABNT, 2016a), que apresenta a expressão para estimar o valor da resistência característica à compressão do bloco ($f_{bk,est}$). No caso da análise estatística, serão inseridos os 6 valores individuais obtidos.

3.2.4.2 Absorção de Água

Conforme a NBR 12118 (ABNT, 2014a), “é a relação entre a massa de água contida no bloco saturado e a massa do bloco seco em estufa até constância de massa, expressa em porcentagem”. Este dado foi obtido aos 28 dias com uma amostragem de 3 blocos para cada traço estudado, sendo o resultado expresso pela sua média aritmética. Durante o avanço deste ensaio, também é possível mensurar a área líquida das amostras, o que também foi executado.

Neste ensaio, determina-se a massa do bloco em três situações: seco em estufa até constância de massa, saturado em água com a superfície seca e submerso em água. Dessa forma, além de obter os resultados de absorção e área líquida, também é possível identificar a massa específica e o volume real do bloco aplicando o princípio de Arquimedes, que diz: “todo corpo imerso em um fluido sofre ação de uma força (empuxo) verticalmente para cima, cuja intensidade é igual ao peso do fluido deslocado pelo corpo”. A subtração entre o peso do bloco na condição seca e o peso do bloco submerso em água é numericamente igual ao volume deslocado de água pela ação do bloco e, conseqüentemente, ao seu volume real.

A finalidade da obtenção destes dados complementares é averiguar a influência da aplicação das cinzas na compactidade dos blocos, o que influi diretamente nos demais ensaios exigidos para aceitação do lote pela NBR 6136 (ABNT, 2016a).

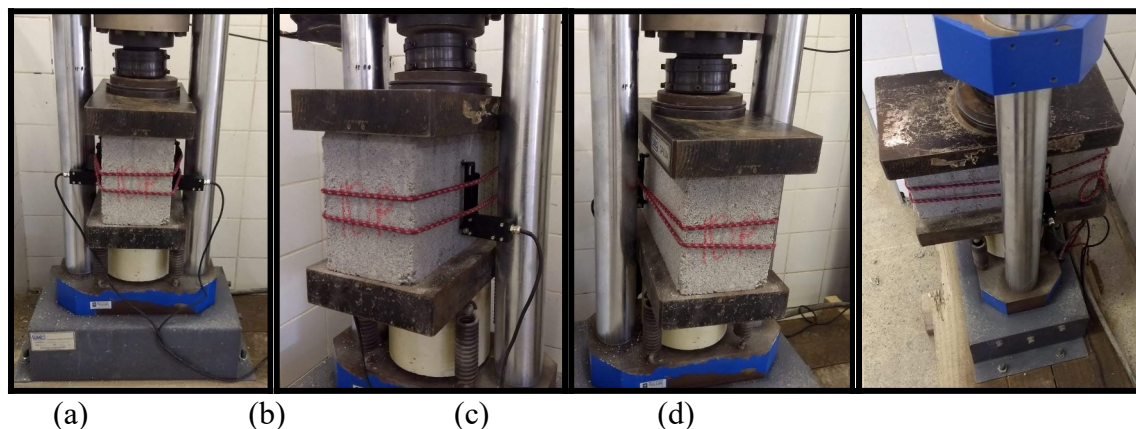
3.2.4.3 Módulo de Elasticidade

O resultado deste ensaio tem grande relevância para o correto dimensionamento das alvenarias autoportantes e, como explicado anteriormente, os blocos produzidos nesta pesquisa podem ser utilizados para este fim. A NBR 8522 (ABNT, 2008b) estabelece o método para determinação do módulo de elasticidade do concreto endurecido em corpos de prova cilíndricos.

Na ausência de uma norma específica para blocos, este foi utilizado como corpo-de-prova e foram adotados os mesmos procedimentos da norma supracitada, com algumas adaptações: como entrada no *script*, o diâmetro equivalente à área bruta do bloco; 30% do valor de força equivalente à menor resistência à compressão, a fim de não danificar o extensômetro; duas determinações, onde em uma delas o extensômetro fica posicionado a 140mm da face frontal do bloco (Figura 10a e Figura 10b), e na outra a 140mm do fundo do bloco (Figura 10c e Figura 10d), sendo o resultado expresso pela média aritmética entre elas; σ_a igual a

0,05 MPa com o intuito de criar um intervalo entre os ciclos equivalente ao do concreto plástico.

Figura 10 – Ensaio de módulo de elasticidade nos blocos



Fonte: Autoria própria (2018).

Como medidor de deformação foi utilizado um extensômetro conectado à máquina de ensaio.

3.2.5 *Análise Estatística*

Objetivando uma análise mais pormenorizada do grau de significância das substituições nas propriedades dos blocos de concreto para alvenaria produzidos, também foi realizada uma análise de variância (ANOVA) dos resultados obtidos, por intermédio do *software* Statistica. Esta análise foi do tipo fator único, adotando como variáveis dependentes os resultados analisados e como variáveis independentes o tipo de cinza e o teor de cinza. Para isso, adotou-se três teores de substituição: T1, T2 e T3, que representam os níveis de substituições menores, intermediários e maiores, respectivamente. O limite de confiança foi de 95% e o nível de significância foi de 5%. Além disso, realizaram-se testes de comparação de média pelo método de Tukey. O mesmo método foi aplicado nos casos em que algum dos teores supracitados apresentou diferenças significativas com o traço referencial, esmiuçando os traços específicos de cada teor adotado.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com o intuito de visualizar melhor a diferença entre os resultados obtidos para os agregados convencionais e para as cinzas estudadas, estes serão apresentados conjuntamente neste capítulo. No caso do cimento Portland aplicado, a caracterização foi fornecida pela cimenteira, sendo disposta abaixo na Tabela 3.

Tabela 3 – Caracterização do CP V - ARI fornecida pela cimenteira

Ensaio		Método de ensaio	Resultado	Requisitos NBR 16697 (ABNT, 2018c)
Área específica (Blaine)		NBR 16372 (ABNT, 2015c)	4198 cm²/g	-
Massa específica		NBR NM 23 (ABNT, 2001a)	3,06 g/cm³	-
Finura – Resíduo na Pe- neira #0,075mm		NBR 11579 (ABNT, 2013)	0,2%	≤ 6,0%
Finura – Resíduo na Pe- neira #0,032mm		NBR 12826 (ABNT, 2014c)	4,8%	-
Água de consistência		NBR 16606 (ABNT, 2017a)	28,5%	-
Início de pega		NBR 16607 (ABNT, 2017b)	2h45min	≥ 1h
Fim de pega		NBR 16607 (ABNT, 2017b)	3h45min	≤ 10h
Expansibilidade de Le Chatelier – a quente		NBR 11582 (ABNT, 2016b)	0,00 mm	≤ 5 mm
Perda ao fogo		NBR NM 18 (ABNT, 2012a)	4,39%	≤ 6,5%
Óxido de Magnésio - MgO		NBR NM 11 – 2 (ABNT, 2012b)	4,17%	≤ 6,5%
Anidrido Sulfúrico – SO ₃		NBR NM 16 (ABNT, 2012c)	3,24%	≤ 4,5%
Resíduo insolúvel		NBR NM 15 (ABNT, 2012d)	0,69%	≤ 3,5%
Anidrido carbônico – CO ₂		NBR NM 20 (ABNT, 2012e)	2,97%	≤ 5,5%
Resistência à compres- são	1 dia	NBR 7215 (ABNT, 1997)	25,9 MPa	≥ 14,0 MPa
	3 dias		36,6 MPa	≥ 24,0 MPa
	7 dias		44,3 MPa	≥ 34,0 MPa
	28 dias		53,2 MPa	-

Fonte: Ficha técnica do CP V - ARI (2018).

Percebe-se na Tabela 3 que os valores obtidos pela cimenteira se enquadraram nos limites previstos em norma. A análise estatística será exposta nas seções de estado fresco do concreto seco e caracterização dos blocos, auxiliando na discussão dos resultados.

4.1 Caracterização dos materiais

O conhecimento das características dos materiais é de suma importância, visto que a partir deste tem-se um entendimento das propriedades dos compostos produzidos e das possíveis variabilidades que as substituições podem causar nas misturas. Os resultados obtidos no tocante à caracterização dos materiais constituintes do concreto, sejam convencionais ou alternativos, estão dispostos nesta seção.

4.1.1 Massa específica e absorção de água

A partir dos dados de massa específica, a quantidade em massa das substituições pôde ser calculada. A absorção de água indica possíveis mudanças na trabalhabilidade dos compostos produzidos. A Tabela 4 traz os resultados dos ensaios de massa específica e absorção de água dos agregados convencionais e das cinzas estudadas.

Tabela 4 – Resultados dos ensaios de massa específica e absorção de água

Índice físico	Agregado graúdo convencional	Agregado miúdo convencional	Areia fina	Cinza Pesada	Cinza Volante
<i>Massa específica</i>	2,51 g/cm ³	2,48 g/cm ³	2,62 g/cm ³	1,52 g/cm ³	2,23 g/cm ³
<i>Absorção de água</i>	0,9%	1,3%	2,0%	1,4%	-

Fonte: Autoria própria (2018).

Segundo a Tabela 4, as cinzas são mais leves do que os materiais convencionais: a cinza pesada é 38,7% mais leve do que o agregado miúdo convencional e a cinza volante é 27,1% mais leve do que o cimento Portland utilizado na pesquisa.

Devido ao processo de queima do carvão mineral, a cinza pesada possui muitos grãos com porosidade aparente. A cinza volante é um material obtido dos gases de exaustão da caldeira, sendo também denominada de “cinza leve”. Por estes motivos, as cinzas mostra-

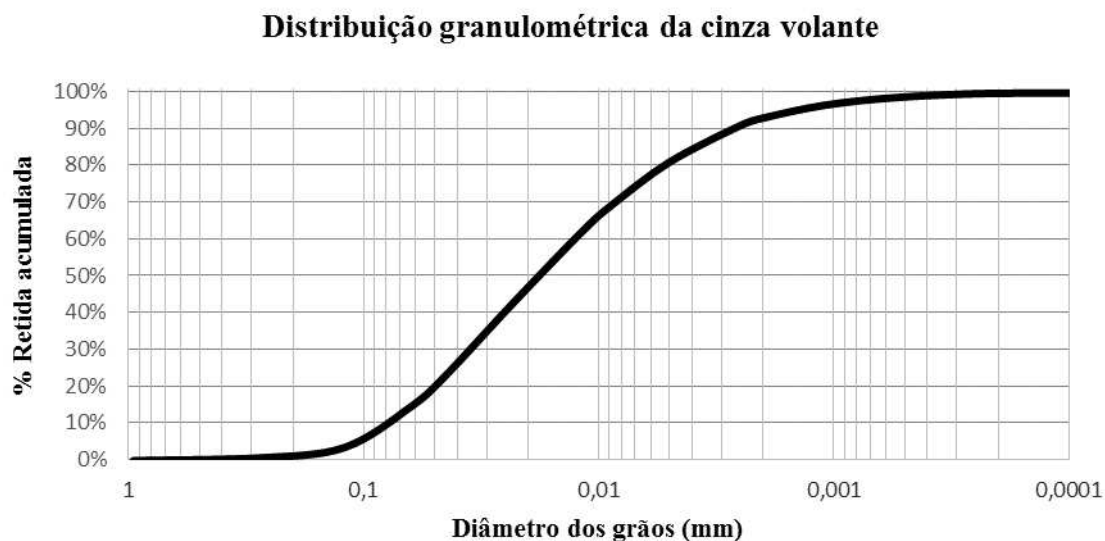
ram-se com massas específicas inferiores às dos materiais convencionais, corroborando com a ideia de compensá-las nas substituições parciais deste estudo.

Sobre o ensaio de absorção de água dos agregados convencionais e da cinza pesada, os resultados ficaram bem próximos, ou seja, a porosidade da cinza praticamente não influenciou nesse dado. Acredita-se que isso ocorreu devido ao método de ensaio aplicado, sendo o mesmo para agregados convencionais. Deste modo, sugere-se que normas técnicas para materiais alternativos sejam elaboradas, levando em consideração as suas particularidades.

4.1.2 Distribuição granulométrica

Este dado foi obtido para a cinza volante, para os agregados convencionais e para a cinza pesada conforme coletada. A Figura 11 mostra a distribuição granulométrica da cinza volante. Como resultado, também se obteve um diâmetro médio de 33,777 μm , com valores de D10%, D50% e D90% iguais a 2,770 μm , 18,311 μm e 78,470 μm , respectivamente.

Figura 11 – Distribuição granulométrica da cinza volante



Fonte: Autoria própria (2018).

A Tabela 5 expõe os resultados obtidos com o ensaio de granulometria de agregados. A dimensão máxima característica de um agregado é relevante tanto para a dosagem do concreto quanto para o seu tipo de aplicação. O módulo de finura é uma grandeza adimensional e quanto menor o seu valor, aponta-se que mais fino é o material. Essa característica geralmente influencia na consistência do concreto, necessitando-se de uma maior ou menor quanti-

dade de água para uma certa trabalhabilidade requerida. Salienta-se que a cinza pesada utilizada nas produções foi beneficiada, apenas como informação adicional, são apresentados os resultados do material da maneira que foi coletado na termelétrica.

Tabela 5 – Resultados do ensaio de granulometria para agregados

Índice físico	Agregado gráúdo con- vencional	Agregado miúdo con- vencional	Areia fina	Cinza Pesa- da*
<i>Dimensão máxima característica</i>	9,5 mm	4,75 mm	1,18 mm	63,0 mm
<i>Módulo de finura</i>	5,37	3,31	1,74	5,46

* Da maneira que foi coletada na termelétrica.

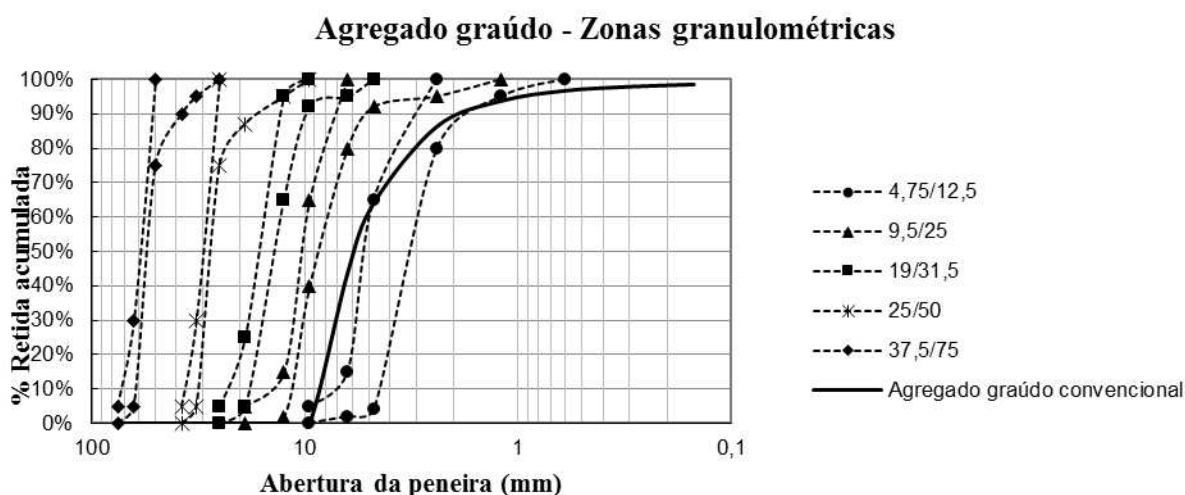
Fonte: Autoria própria (2018).

A NBR 6136 (ABNT, 2016a) recomenda que a dimensão máxima característica do agregado gráúdo deva ser inferior à metade da menor espessura da parede do bloco, que, nesse caso, é de 20 mm. Logo, esta recomendação foi atendida.

Apesar de possuírem valores de dimensão máxima característica bem diferentes, o módulo de finura do agregado gráúdo convencional e da cinza pesada coletada ficaram semelhantes devido às suas distribuições granulométricas distintas.

Para os agregados convencionais, os resultados de distribuição granulométrica serão divididos entre agregado gráúdo (Figura 12) e miúdo (Figura 13), a fim de verificar o atendimento aos limites estabelecidos na NBR 7211 (ABNT, 2009d).

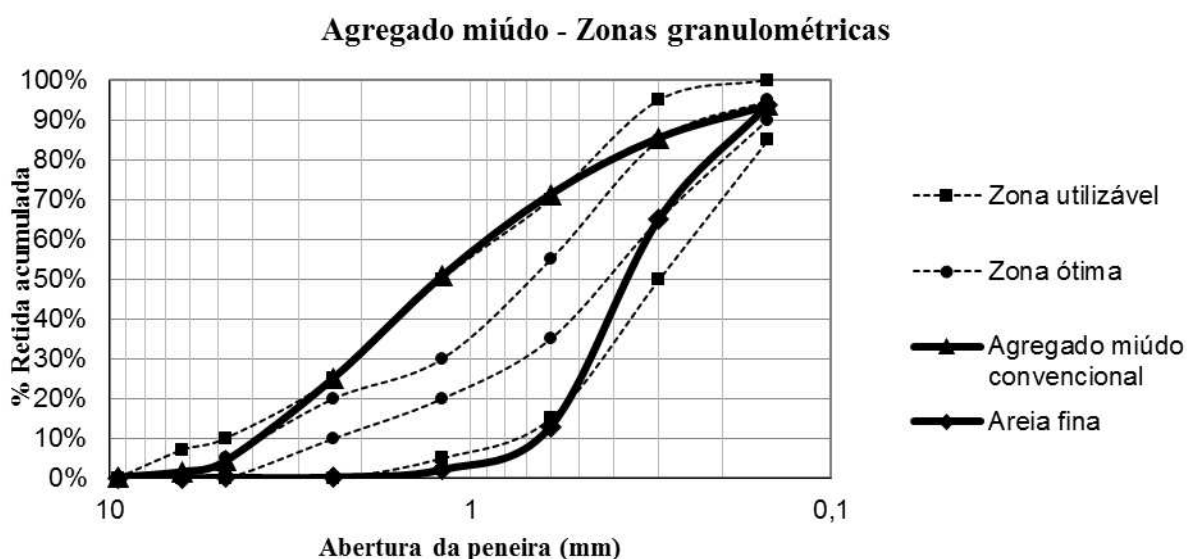
Figura 12 – Distribuição granulométrica do agregado gráúdo convencional



Fonte: Autoria própria (2018).

Como percebe-se na Figura 12, o agregado graúdo convencional não se enquadrou em nenhuma das zonas previstas pela NBR 7211 (ABNT, 2009d). Isso geralmente acontece com os agregados graúdos comercializados na região de estudo e, como já foi dito, os materiais usados nesta pesquisa foram os mesmos de uma grande fábrica de blocos desta região. Por isso, manteve-se o agregado graúdo embora apenas uma parte da sua distribuição granulométrica tenha ficado inserida na zona 4,75/12,5.

Figura 13 – Distribuição granulométrica do agregado miúdo convencional e da areia fina



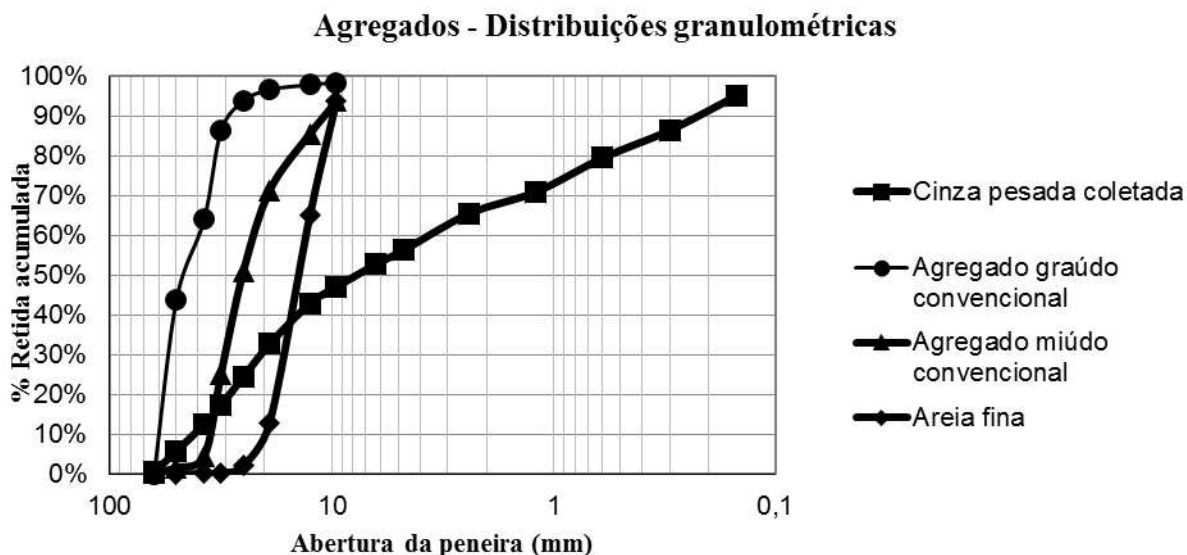
Fonte: Autoria própria (2018).

A Figura 13 mostra que tanto o agregado miúdo convencional quanto a areia fina enquadraram-se predominantemente na zona utilizável da NBR 7211 (ABNT, 2009d), sendo o primeiro no limite superior e o segundo no limite inferior.

Abaixo, na Figura 14, todas as curvas serão apresentadas juntamente com a da cinza pesada coletada, para efeito de comparação e justificativa de necessidade da aproximação granulométrica efetuada para a confecção dos blocos de concreto para alvenaria desta pesquisa.

A curva de distribuição granulométrica da cinza pesada beneficiada não foi apresentada por ser exatamente igual à do agregado miúdo convencional: a partir dos dados das porcentagens retidas em cada peneira do referido ensaio, dosou-se as quantidades de cinza pesada que iria compor o material beneficiado. Ressalta-se que esta foi a parte utilizada nas produções dos blocos.

Figura 14 – Distribuição granulométrica dos agregados e da cinza pesada coletada



Fonte: Autoria própria (2018).

Na Figura 14 observa-se o quão discrepantes as curvas granulométricas dos demais agregados são em relação à da cinza pesada coletada, por isso a necessidade de beneficiamento para aproximação destas.

4.1.3 Requisitos físicos da NBR 12653 (ABNT, 2015a)

Como propôs-se trabalhar com substituição parcial do cimento, o atendimento aos requisitos constantes na NBR 12653 (ABNT, 2015a) é significativo. Os resultados dos índices físicos, bem como os requisitos expostos na referida norma estão expostos na Tabela 6.

Tabela 6 – Resultados dos ensaios de requisitos físicos da cinza volante

Índice físico	Resultado	Requisito NBR 12653 (ABNT, 2015a)
<i>Material retido na peneira 45 μm</i>	19,81%	< 20%
<i>Índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias</i>	104,2%	$\geq 90\%$
<i>Atividade pozolânica com cal aos 7 dias</i>	7,40 MPa	≥ 6 MPa

Fonte: Autoria própria (2018).

Pela Tabela 6, percebe-se que, nos requisitos físicos, a cinza volante em estudo enquadrou-se nos limites estabelecidos para classificação do material como Pozolânico de Classe C, tendo, portanto, potencialidade de substituir parcialmente o cimento Portland.

4.1.4 Fluorescência de Raios-X

Além dos requisitos físicos, a NBR 12653 (ABNT, 2015a) traz requisitos químicos para classificação do material como pozolânico e alguns destes são obtidos no ensaio de Fluorescência de Raios-X. Seu resultado está disposto na Tabela 7 para a cinza volante e para a cinza pesada, sendo este último apenas para conhecimento do material.

Tabela 7 – Composição química da cinza volante e da cinza pesada

<i>Óxidos</i>	<i>Material</i>	<i>Quantidade</i>
SiO₂	Cinza volante	48,8%
	Cinza pesada	56,9%
Al₂O₃	Cinza volante	14,7%
	Cinza pesada	13,5%
Fe₂O₃	Cinza volante	16,7%
	Cinza pesada	5,6%
K₂O	Cinza volante	3,1%
	Cinza pesada	4,1%
CaO	Cinza volante	9,1%
	Cinza pesada	7,3%
TiO₂	Cinza volante	3,7%
	Cinza pesada	2,6%
Cl	Cinza volante	-
	Cinza pesada	0,1%
SrO	Cinza volante	0,5%
	Cinza pesada	-
P₂O₅	Cinza volante	3,0%
	Cinza pesada	-
Rb₂O	Cinza volante	0,1%
	Cinza pesada	-
ZrO₂	Cinza volante	0,3%
	Cinza pesada	-
ThO₂	Cinza volante	0,1%
	Cinza pesada	-

Fonte: Autoria própria (2018).

Um dos requisitos químicos da norma supracitada é que a soma dos óxidos de silício (SiO_2), alumínio (Al_2O_3) e ferro (Fe_2O_3) seja superior a 70%. No caso da cinza volante em estudo, de acordo com a Tabela 7, obteve-se 80,19%. Outra premissa é que o teor de óxido sulfúrico (SO_3) seja limitado a 5%. Este composto não foi identificado nas amostras enviadas, atendendo, portanto, a outro requisito previsto em norma.

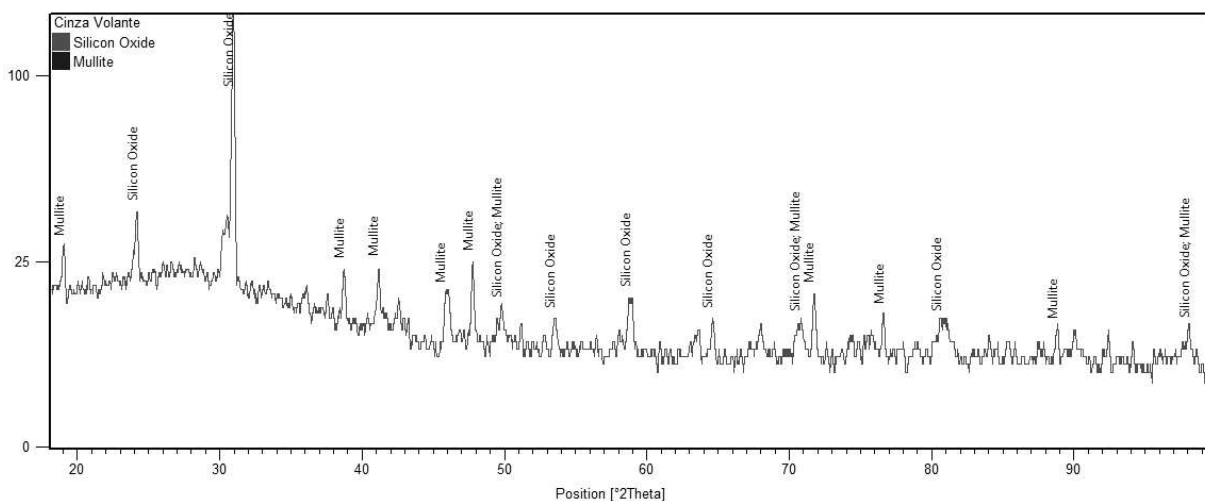
A perda ao fogo, conforme NBR NM 18 (ABNT, 2012a), é fixada em até 6%. Este ensaio não foi realizado nesta pesquisa, porém, outro estudo desenvolvido com a cinza volante oriunda da Usina Termelétrica do Pecém (MELO, 2017) aponta que não houve perda de massa ao fogo, o que satisfaz mais um requisito para que a cinza seja considerada pozolânica, de classe C.

Sobre a classificação dos materiais pozolânicos, a NBR 12653 (ABNT, 2015a) define como Classe C “cinzas volantes produzidas pela queima de carvão mineral em usinas termelétricas, que obedeçam aos requisitos desta norma”.

4.1.5 Difração de Raios-X

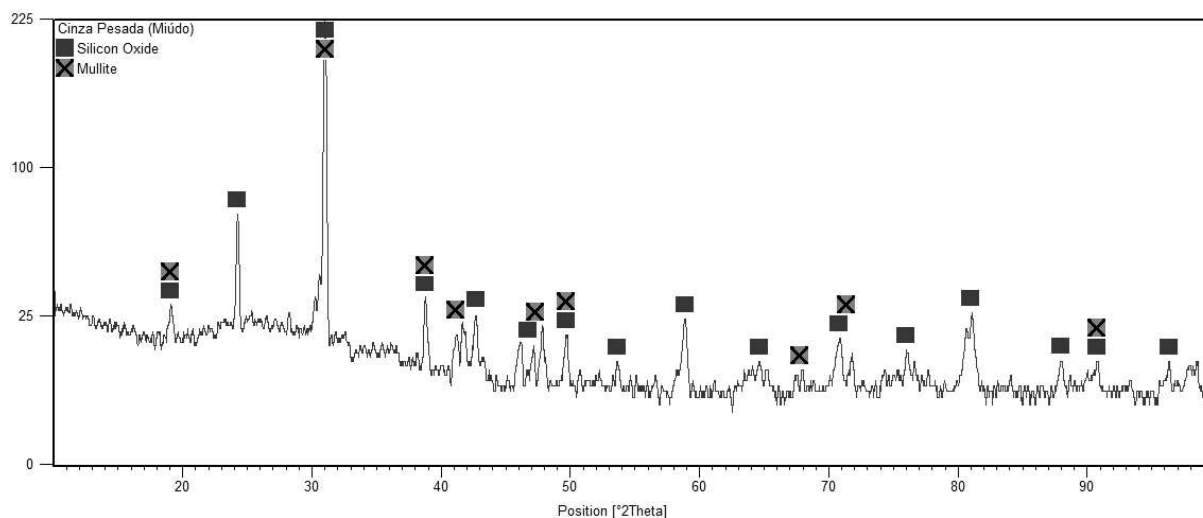
Os difratogramas exibidos abaixo (Figura 15 e Figura 16) mostram as fases cristalinas presentes em cada espécime. No caso da cinza volante, os nomes dos compostos foram apresentados em seus picos correspondentes; na cinza pesada, como há alguns picos sobrepostos, o que dificulta a visualização, ilustrou-se por diferentes representações.

Figura 15 – Difratograma da cinza volante



Fonte: Autoria própria (2018).

Figura 16 – Difratoograma da cinza pesada



Fonte: Autoria própria (2018).

A mulita (*mullite*), presente na cinza volante e na cinza pesada tem a seguinte fórmula química: $3(\text{Al}_2\text{O}_3) \cdot 2(\text{SiO}_2)$. Já o óxido de silício (*silicon oxide*), SiO_2 . A NBR 12653 (ABNT, 2015a) define materiais pozolânicos como “materiais silicosos ou silicoaluminosos que, sozinhos, possuem pouca ou nenhuma propriedade ligante mas que, quando finamente divididos e na presença de água, reagem com o hidróxido de cálcio à temperatura ambiente, formando compostos com propriedades ligantes”. Portanto, os compostos reconhecidos no difratoograma da cinza volante satisfazem esta definição. Possivelmente, os outros compostos identificados no ensaio de Fluorescência de Raios-X não foram expressos nos difratogramas por apresentarem-se em teores menores.

4.1.6 Lixiviação e Solubilização

O resultado destes ensaios é pertinente no tocante aos possíveis riscos que os materiais alternativos estudados possam oferecer ao meio ambiente, no caso de sua disposição inadequada, podendo contaminar solos e/ou lençóis freáticos, bem como reservatórios superficiais de água; ao seu manuseio por pessoal desprovido de equipamentos de proteção individual; aos compostos produzidos com estes, da mesma maneira que aos indivíduos do entorno.

Deste modo, apresentar-se-á abaixo (Tabela 8) os extratos solubilizado e lixiviado dos compostos iônicos e catiônicos para a cinza volante e para a cinza pesada provenientes da Usina Termelétrica do Pecém.

Tabela 8 – Extratos solubilizado e lixiviado dos compostos iônicos e catiônicos

<i>Extrato</i>	Solubilizado (ppm)	Lixiviado (ppm)	Solubilizado (ppm)	Lixiviado (ppm)
<i>Material Composto</i>	Cinza volante		Cinza pesada	
<i>Fluoreto</i>	0,22	0,06	5,75	3,59
<i>Cloreto</i>	14,34	2,17	19,31	4,33
<i>Brometo</i>	0,51	-	1,01	2,32
<i>Nitrato</i>	0,12	-	0,91	0,87
<i>Fosfato</i>	4,75	1,09	-	0,53
<i>Sulfato</i>	150,91	22,21	750,99	146,81
<i>Cromo</i>	0,126	0,172	0,179	0,201
<i>Ferro</i>	0,021	-	0,024	0,009
<i>Cobre</i>	-	0,047	0,105	0,024
<i>Níquel</i>	0,033	0,088	0,079	0,067
<i>Manganês</i>	0,065	0,063	0,067	0,063

Fonte: Autoria própria (2018).

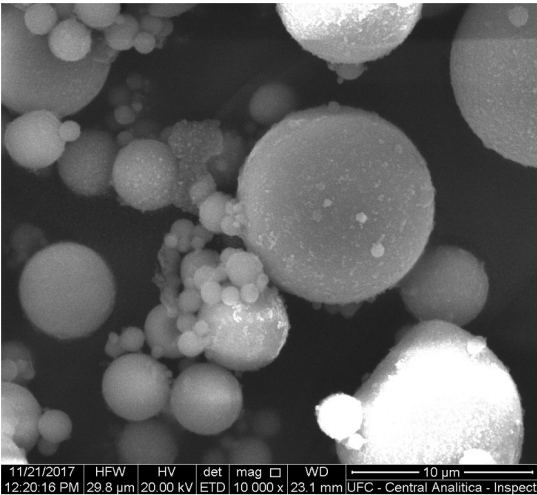
A NBR 10004 (ABNT, 2004b) limita as quantidades dos extratos lixiviado e solubilizado para classificação dos resíduos sólidos. As amostras ultrapassaram alguns desses limites para o extrato solubilizado: fluoreto acima de 1,5 na cinza pesada, sulfato na cinza pesada além dos 250,0 permitidos e cromo em ambas extrapolando os 0,05 prescritos. Assim, as cinzas volante e pesada classificaram-se como resíduos classe II A – não perigosos e não inertes.

Ainda em concordância com a NBR 10004 (ABNT, 2004b), sendo a cinza volante e a cinza pesada consideradas resíduos não perigosos, são isentos de periculosidade, inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade ou patogenicidade. Por serem não inertes, podem ter propriedades como: biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água. Logo, as cinzas não apresentaram riscos ao seu manuseio e aplicação.

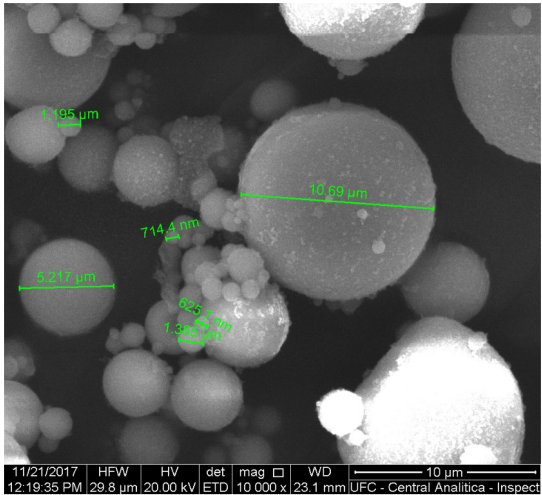
4.1.7 Microscopia Eletrônica de Varredura

Abaixo estão inseridas as imagens obtidas na cinza volante em diferentes escalas: 10 µm (Figura 17a e Figura 17b), 20 µm (Figura 17c), 40 µm (Figura 17d), 50 µm (Figura 17e) e 100 µm (Figura 17f).

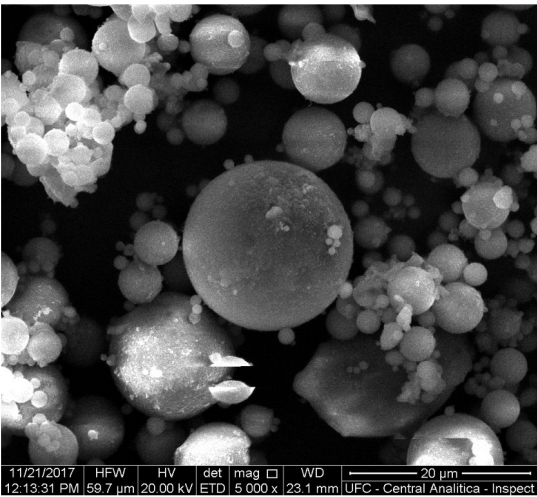
Figura 17 – Imagens da cinza volante obtidas por Microscopia Eletrônica de Varredura



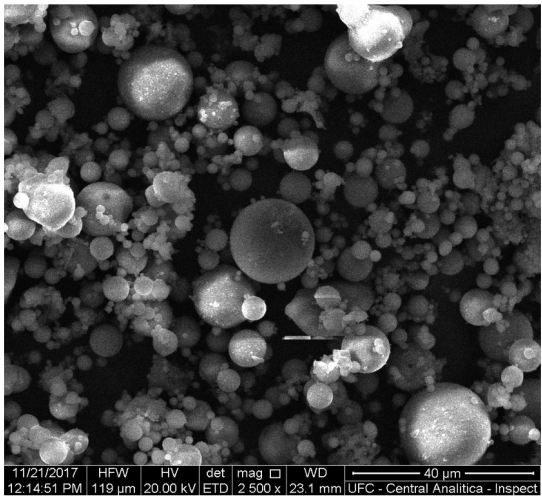
(a)



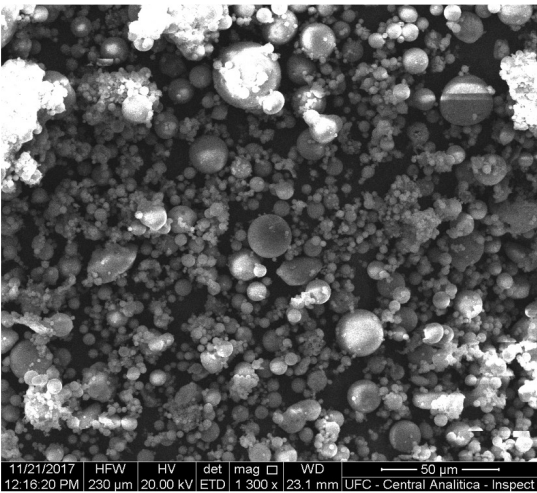
(b)



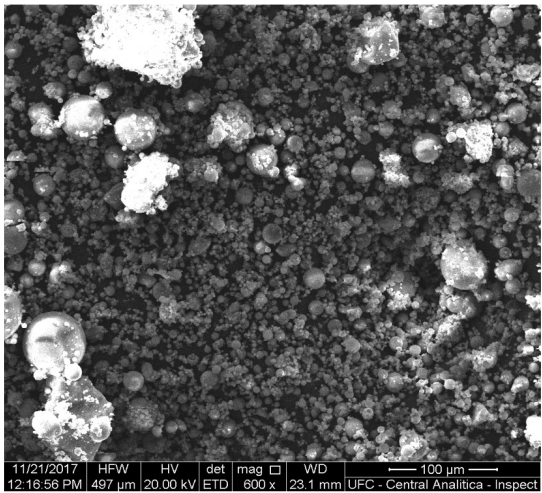
(c)



(d)



(e)



(f)

Fonte: Autoria pr3pria (2018).

Observa-se nas figuras acima que as partículas de cinza volante apresentam um formato arredondado, característico deste material. Também se vê diferentes tamanhos de partícula, reafirmando o resultado do ensaio de distribuição granulométrica a laser.

4.1.8 Processamento Digital de Imagens

Os resultados médios do processamento digital de imagens, obtidos por intermédio do *Aggregate Image Measurement System* (AIMS) serão apresentados para cada parâmetro fornecido pelo equipamento, nos agregados convencionais e na cinza pesada, juntamente com o desvio padrão. Neste ensaio são enviadas amostras de agregados retidas em cada peneira do ensaio de granulometria, de acordo com a NBR NM 248 (ABNT, 2003a), por isso os resultados para a cinza pesada também serão expostos nos parâmetros inerentes aos agregados graúdos.

Al Rousan (2004) desenvolveu uma metodologia de classificação dos agregados de acordo com os dados fornecidos pelo AIMS em cada parâmetro analisado, estabelecendo limites de classificação para cada propriedade. Estes limites também serão expostos a fim de classificar os agregados da pesquisa segundo o estudo do autor, utilizando os valores médios.

4.1.8.1 Forma 2D

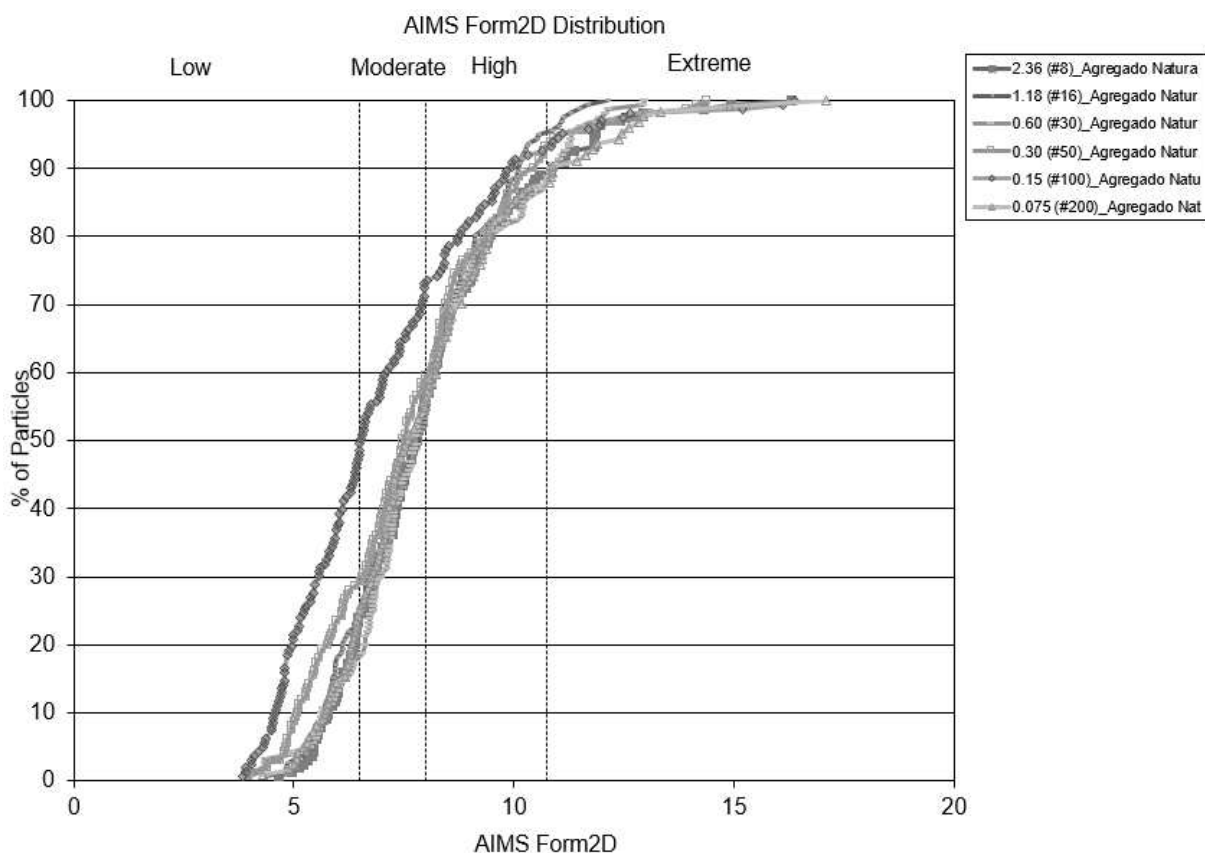
A forma 2D é obtida para os agregados miúdos. Este parâmetro relata a proximidade da forma das partículas com relação a um círculo: quanto mais próximo o valor estiver de 0, mais circular será a partícula e quanto mais próximo de 20, mais alongada. A Tabela 9 traz os valores e a classificação obtidos nos agregados convencionais e na cinza pesada, assim como as Figuras 18 e 19 mostram a distribuição da propriedade de forma 2D.

Tabela 9 – Resultados de forma 2D a partir do AIMS

Limite de Al Rousan (2004)		Agregados convencionais		Cinza pesada	
Valor	Classificação	Valor	Classificação	Valor	Classificação
< 6,5	Circular	7,78 ± 2,07	Semicircular	8,95 ± 2,54	Semialongado
6,5 a 8	Semicircular				
8 a 10,5	Semialongado				
> 10,5	Alongado				

Fonte: Autoria própria (2018) e adaptado de Al Rousan (2004).

Figura 18 – Distribuição da propriedade de Forma 2D dos agregados convencionais



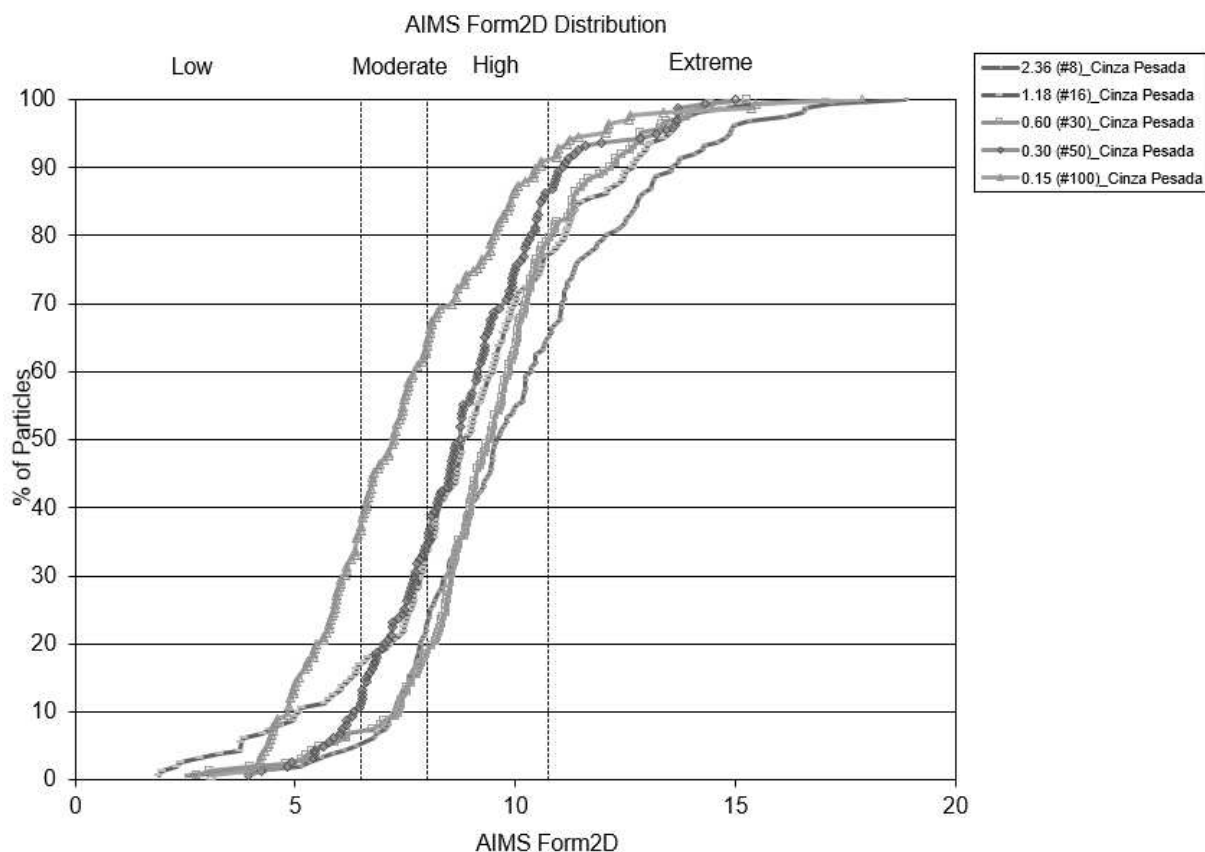
Fonte: Autoria própria (2018).

A Figura 18 mostra que, para os agregados convencionais, existe uma maior quantidade de partículas com valores de Forma 2D entre 8 e 10,5 (31,8% semialongado – high), no entanto, o limite de 6,5 a 8 (30,7% semicircular – moderate) encontra-se muito próximo, reafirmando a classificação de acordo com Al Rousan (2004).

Abaixo, na Figura 19, percebe-se que, para a cinza pesada, existe uma maior quantidade de partículas com valores de Forma 2D entre 8 e 10,5 (44,9% semialongado – high), corroborando com a classificação do autor supracitado. Logo, mesmo considerando os desvios padrão, a classificação exposta na Tabela 9 é considerada válida.

Visualiza-se na Tabela 9 que o desvio padrão obtido para a cinza pesada foi maior do que para os agregados convencionais. Este fato também pode ser visto nas Figuras 18 e 19, onde a distribuição de cada peneira encontra-se mais próxima para os agregados convencionais e mais afastada para a cinza pesada. O motivo dessa diferença é a maior heterogeneidade da cinza em relação aos agregados.

Figura 19 – Distribuição da propriedade de Forma 2D da cinza pesada



Fonte: Autoria própria (2018).

Apesar da cinza pesada e dos agregados convencionais terem classificações diferentes quanto à Forma 2D, pode-se afirmar que estes não têm grandes disparidades quando analisados os desvios padrão e as distribuições de cada um individualmente.

4.1.8.2 Esfericidade

Neste caso, para os agregados graúdos, quanto mais próximo de 1,0 for o valor da esfericidade, mais próximo do formato de uma esfera será o agregado (Tabela 10).

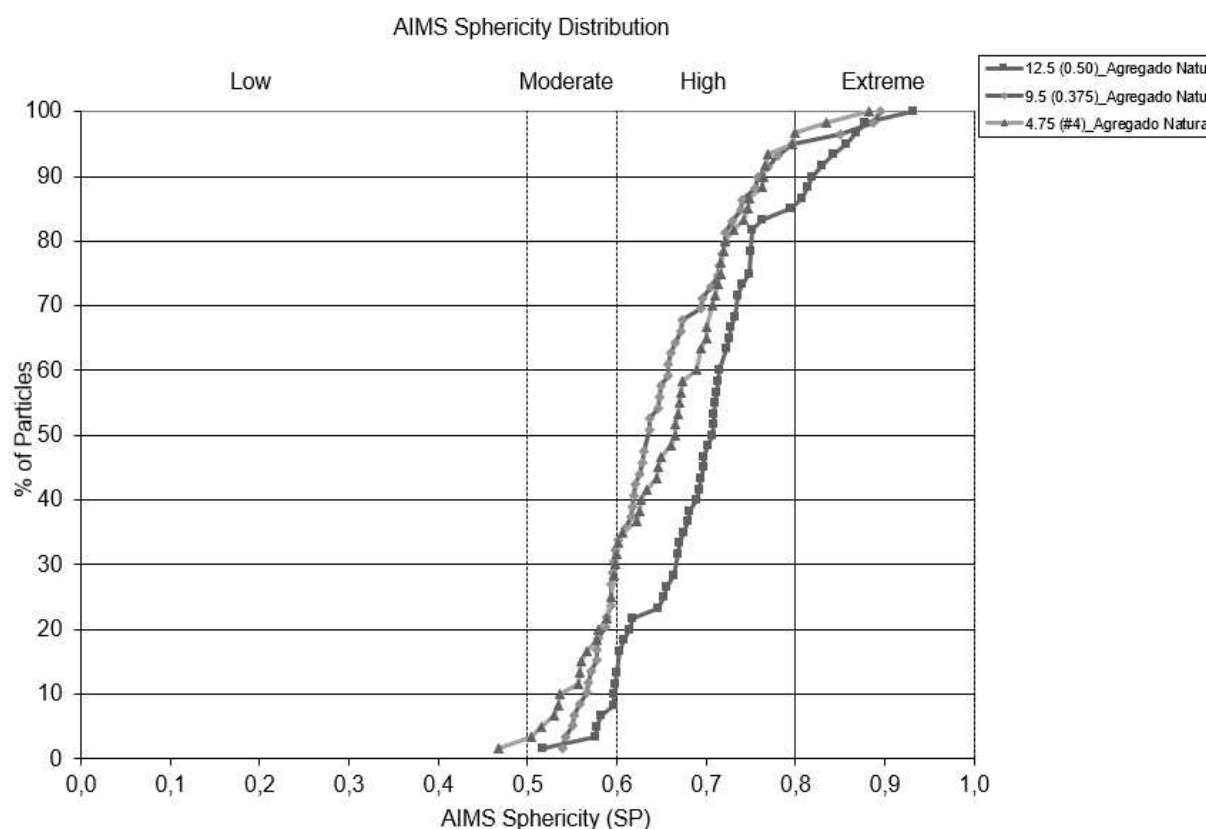
Tabela 10 – Resultados de esfericidade a partir do AIMS

Limite de Al Rousan (2004)		Agregados convencionais		Cinza pesada	
Valor	Classificação	Valor	Classificação	Valor	Classificação
< 0,6	Achatado/Alongado	0,673 ± 0,087	Baixa esferi- cidade	0,636 ± 0,120	Baixa esferi- cidade
0,6 a 0,7	Baixa esfericidade				
0,7 a 0,8	Esfericidade moderada				
> 0,8	Alta esfericidade				

Fonte: Autoria própria (2018) e adaptado de Al Rousan (2004).

Com relação à esfericidade, de acordo com a Tabela 10, não houveram variações entre a classificação dos agregados convencionais e da cinza pesada, sendo ambos considerados de baixa esfericidade. As Figuras 20 e 21 trazem a distribuição dos valores de esfericidade para os agregados convencionais e para a cinza pesada, respectivamente.

Figura 20 – Distribuição dos valores de esfericidade dos agregados convencionais

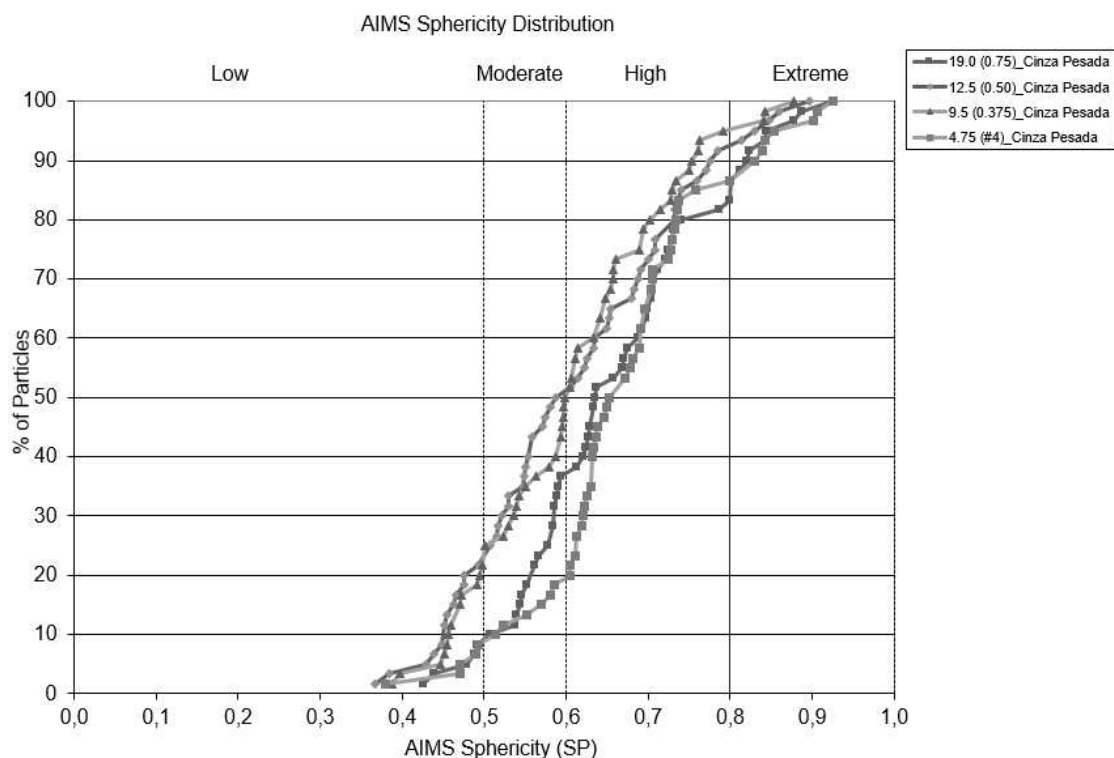


Fonte: Autoria própria (2018).

Na Figura 20, observa-se que 66,5% das partículas do agregado convencional apresentaram-se com esfericidade moderada – high. Dessa forma, a média não é um indicador satisfatório dos resultados.

Nota-se também que os limites adotados pelo equipamento AIMS e por Rousan (2004), no caso da esfericidade, são distintos. Segundo o autor, “high” (0,6 a 0,8) poderia ser classificado tanto como de baixa esfericidade quanto de esfericidade moderada. Todavia, ambos utilizam 4 tipos de classificação e, por isso, “high” foi atribuído a “esfericidade moderada”, sendo esta última o resultado considerado para os agregados convencionais desta pesquisa.

Figura 21 – Distribuição dos valores de esfericidade da cinza pesada



Fonte: Autoria própria (2018).

Assim como ocorreu com os agregados convencionais, a Figura 21 mostra que a cinza pesada apresentou a maioria das partículas (50,4%) com esfericidade moderada – high. Entretanto, apesar de terem diferido na classificação de acordo com Rousan (2004) e com os limites do equipamento AIMS, os agregados convencionais e a cinza pesada obtiveram a mesma classificação entre si nas duas situações.

4.1.8.3 Angularidade

A angularidade é dada para as duas frações de agregado, em conjunto (Tabela 11).

Tabela 11 – Resultados de angularidade a partir do AIMS

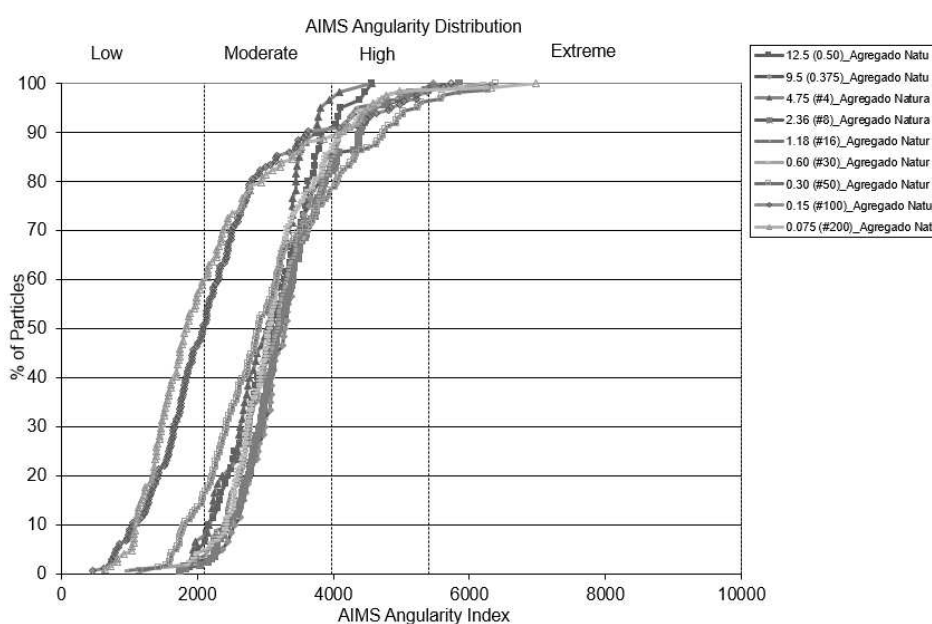
Limite de Al Rousan (2004)		Agregados convencionais		Cinza pesada	
Valor	Classificação	Valor	Classificação	Valor	Classificação
< 2100	Arredondado	2955,1 ± 1001,7	Subarredondado	4502,2 ± 1516,0	Subangular
2100 a 4000	Subarredondado				
4000 a 5400	Subangular				
> 5400	Angular				

Fonte: Autoria própria (2018) e adaptado de Al Rousan (2004).

Percebe-se na Tabela 11 que há divergências quanto à angularidade dos agregados convencionais e da cinza pesada, sendo o primeiro subarredondado e a segunda subangular.

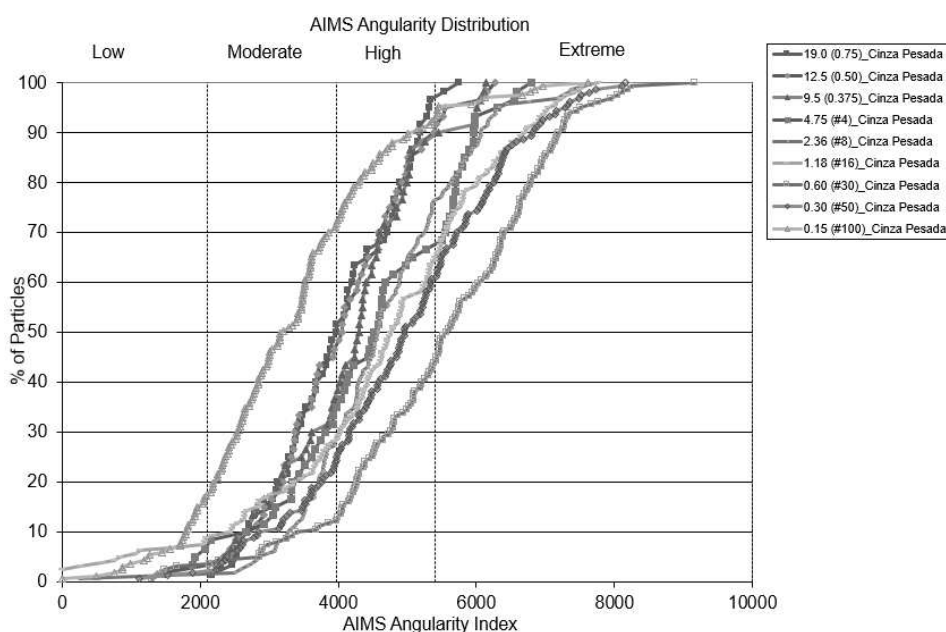
Esta classificação se confirma nas Figuras 22 e 23, onde percebe-se que 67,1% das partículas de agregados convencionais classificaram-se como moderate – subarredondado e 36,6% das partículas de cinza pesada como high – subangular.

Figura 22 – Distribuição dos valores de angularidade dos agregados convencionais



Fonte: Autoria própria (2018).

Figura 23 – Distribuição dos valores de angularidade da cinza pesada



Fonte: Autoria própria (2018).

Agregados mais arredondados conferem melhor trabalhabilidade no estado fresco do concreto, no entanto, podem colaborar com uma zona frágil na interface com a pasta de cimento, comprometendo, assim, a aderência entre estes e a resistência mecânica do composto. Pode-se dizer que o inverso ocorre em agregados mais angulares: características pioradas no estado fresco e melhoradas no estado endurecido.

4.1.8.4 Textura superficial

A textura superficial se refere à rugosidade da superfície das partículas do agregado graúdo, também sendo um parâmetro inerente à aderência entre este e a argamassa de cimento citada anteriormente.

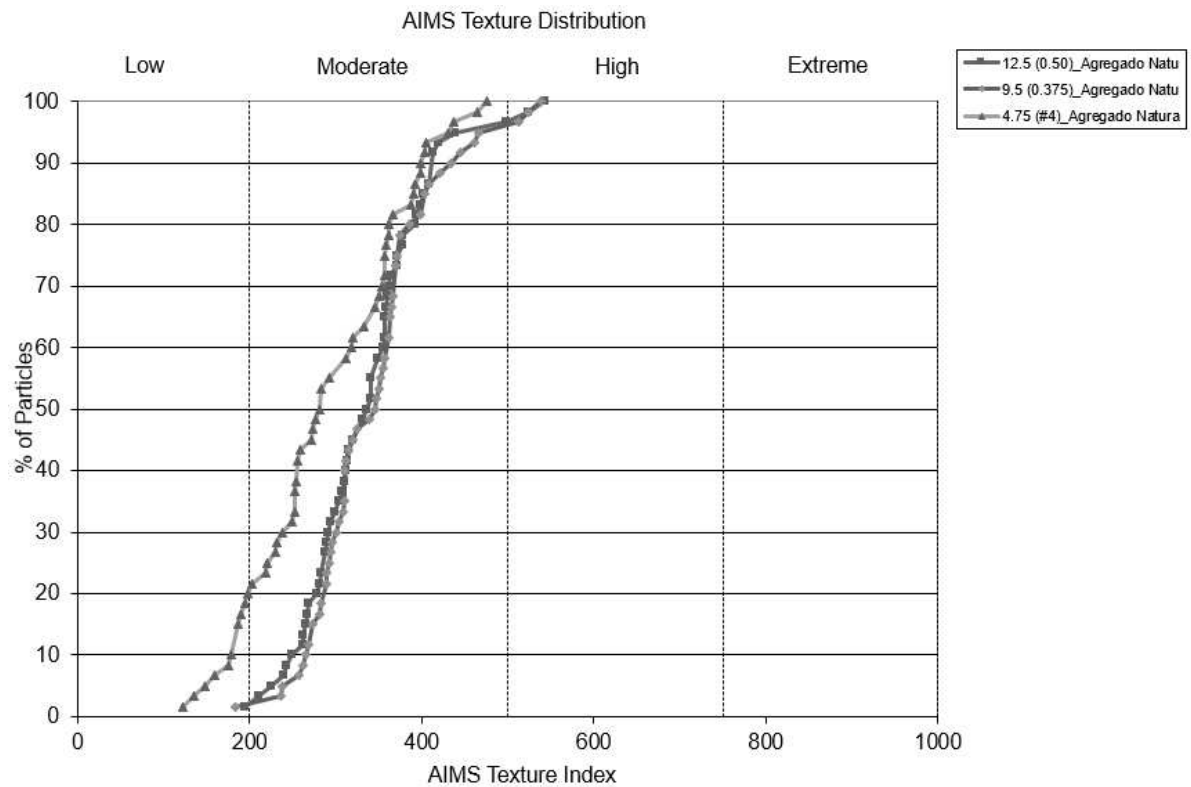
Tabela 12 – Resultados de textura superficial a partir do AIMS

Limite de Al Rousan (2004)		Agregados convencionais		Cinza pesada	
Valor	Classificação	Valor	Classificação	Valor	Classificação
< 165	Polido	324,2 ± 79,6	Baixa rugosidade	756,5 ± 162,6	Alta rugosidade
165 a 275	Macio				
275 a 350	Baixa rugosidade				
350 a 460	Rugosidade moderada				
> 460	Alta rugosidade				

Fonte: Autoria própria (2018) e adaptado de Al Rousan (2004).

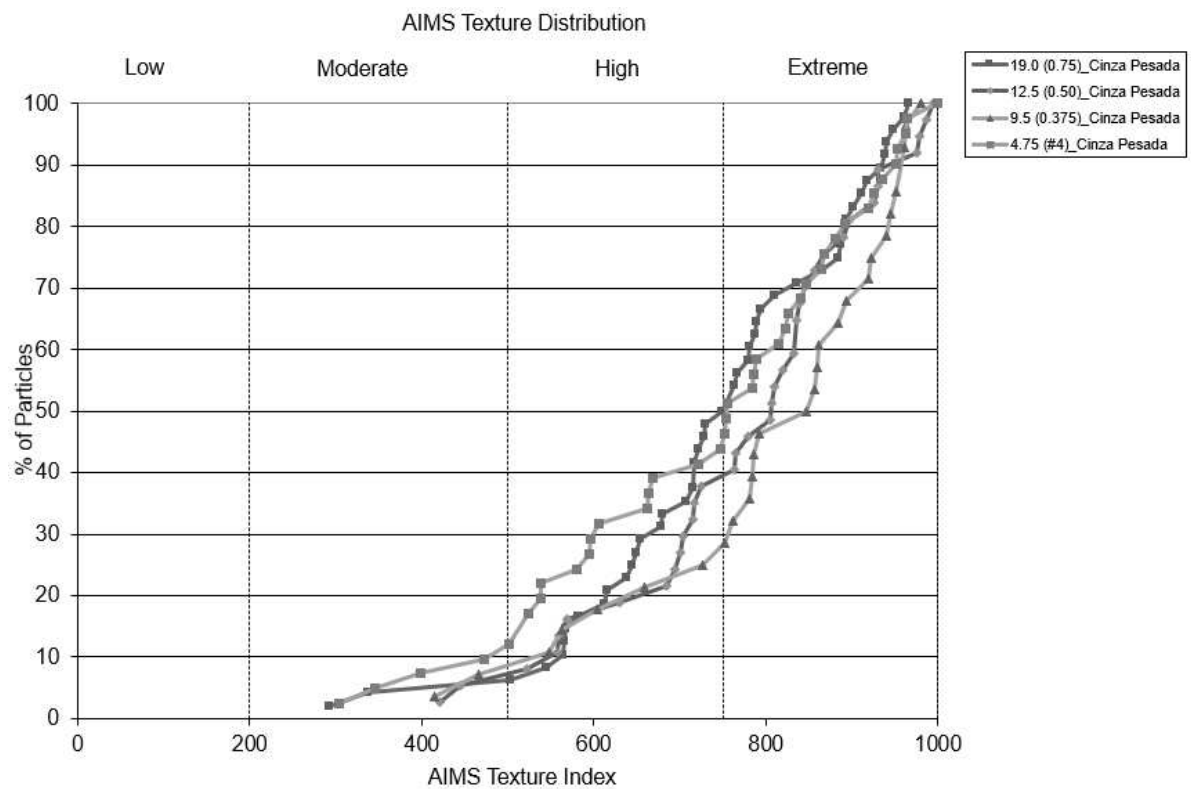
A Tabela 12 mostra que a textura superficial dos agregados convencionais e da cinza pesada foi divergente, fato que pôde ser comprovado nas distribuições da propriedade de textura superficial (Figura 24 e Figura 25). No entanto, a quantidade de parâmetros e os limites são distintos para as duas situações: na classificação do equipamento AIMS, “moderate” abrange os valores de 200 a 500, podendo ser classificado como qualquer um dos termos traços por Al Rousan (2004), exceto “polido”; no AIMS, “extreme” compreende os valores entre 750 e 1000, parâmetros não adotados por Al Rousan (2004); também, o autor apresenta cinco classificações, contra quatro do equipamento AIMS, dificultando a correlação entre eles. Acredita-se que Al Rousan (2004) adotou valores de classificação mais comumente encontrados para agregados. Porém, a distinção entre os materiais é confirmada na classificação do equipamento: 89,4% das partículas dos agregados naturais situaram-se em “moderate” e 59,1% das partículas de cinza pesada como “extreme”.

Figura 24 – Distribuição da propriedade de textura superficial dos agregados convencionais



Fonte: Autoria própria (2018).

Figura 25 – Distribuição da propriedade de textura superficial da cinza pesada



Fonte: Autoria própria (2018).

4.1.8.5 Lamelaridade

A lamelaridade é dada para os agregados graúdos e correlaciona os valores de menor e de maior dimensão de cada partícula, sendo os valores obtidos para os agregados convencionais e para a cinza pesada expostos na Tabela 13. Esta propriedade não foi classificada por Al Rousan (2004).

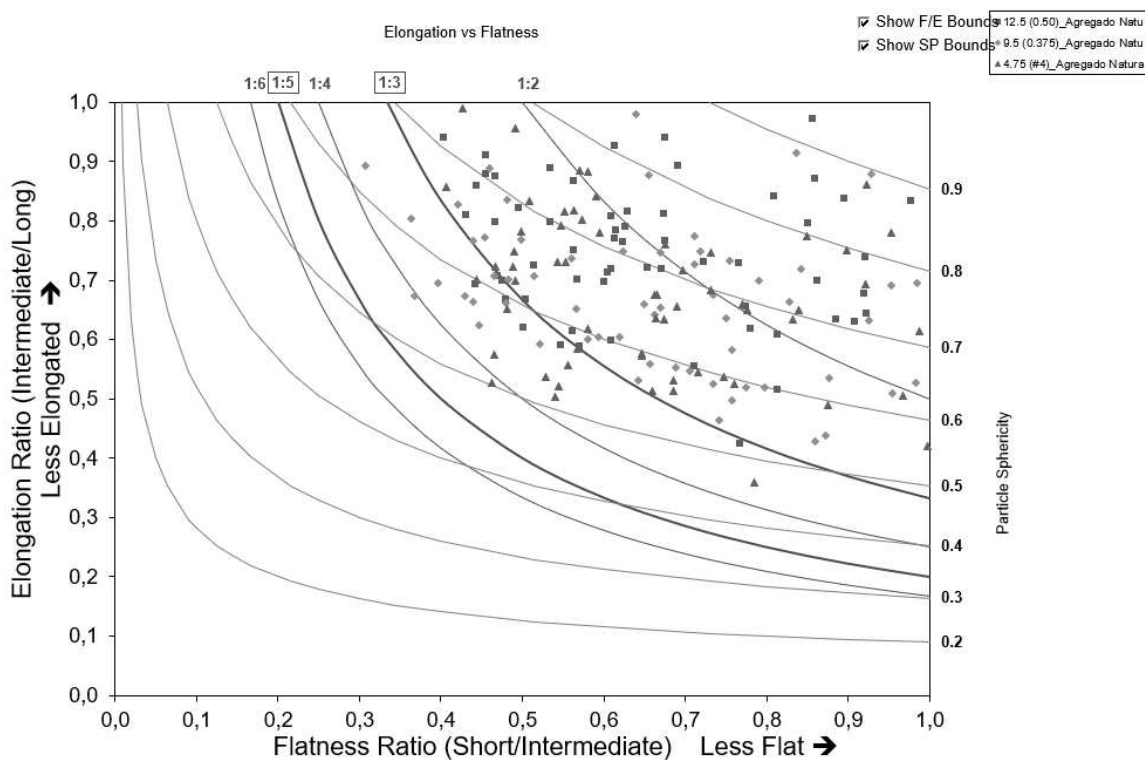
Tabela 13 – Resultados de lamelaridade a partir do AIMS

Agregados convencionais	Cinza pesada
$2,380 \pm 0,609$	$2,565 \pm 0,962$

Fonte: Autoria própria (2018).

Nas Figuras 26 e 27, que trazem as razões entre as dimensões dos agregados convencionais e da cinza pesada, respectivamente, o eixo das abscissas representa a razão de achatamento (espessura/largura) e o eixo das ordenadas, a razão de alongamento (largura/comprimento), assim como as linhas que limitam as razões de lamelaridade (razão entre a menor e a maior dimensão de um agregado).

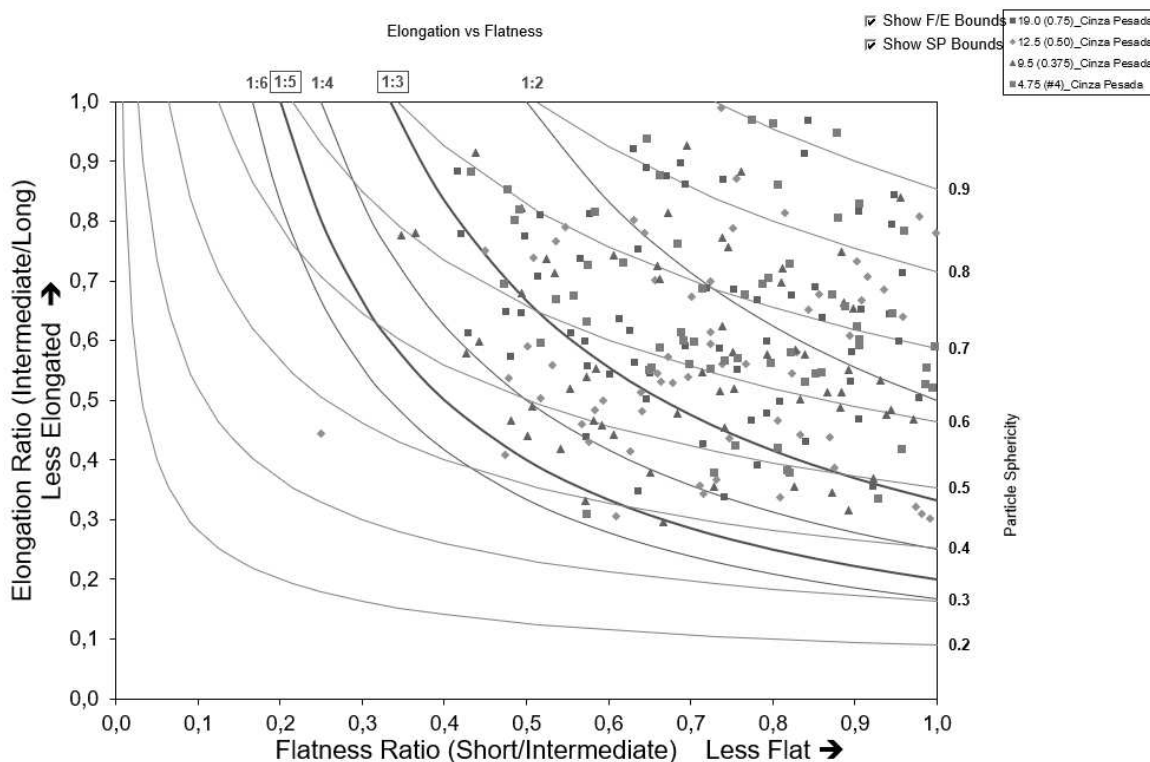
Figura 26 – Razões entre as dimensões dos agregados convencionais



Fonte: Autoria própria (2018).

A Figura 26 mostra uma concentração maior de partículas de agregado convencional situadas entre as razões de lamelaridade 1:2 e 1:3, confirmando o valor de 2,38 exposto na Tabela 13.

Figura 27 – Razões entre as dimensões da cinza pesada



Fonte: Autoria própria (2018).

Já na Figura 27, nota-se que a cinza pesada tem uma distribuição bem mais heterogênea do que os agregados convencionais, havendo até partículas na razão 1:6, enquanto que para os agregados o máximo foi 1:4. Apesar da média entre os resultados dos dois materiais apresentarem-se próximas, de acordo com a Tabela 13, a Figura 27 mostra que a cinza pesada possui diversas razões distribuídas entre suas partículas.

4.1.9 Reatividade álcali-agregado

O resultado do ensaio de reatividade álcali-agregado da cinza pesada está disposto na Tabela 14. Apesar do agregado miúdo convencional também ter sido submetido a este teste, o resultado não será apresentado por ter sido igual a zero em todas as idades, ou seja, sendo potencialmente inócuo com grau R0, de acordo com a NBR 15577-1 (ABNT, 2018a).

Tabela 14 – Resultados dos ensaios de reatividade álcali-agregado da cinza pesada

<i>Expansão na idade de</i>								
1 dia	4 dias	8 dias	12 dias	16 dias	20 dias	24 dias	28 dias	30 dias
0,000%	0,000%	0,017%	0,105%	0,187%	0,343%	0,353%	0,433%	0,476%

Fonte: Autoria própria (2018).

Para uma expansão das barras de argamassa aos 30 dias entre 0,41% e 0,60%, a NBR 15577-1 (ABNT, 2018a) classifica a reatividade do agregado como potencialmente reativo grau R2. Para essa classe de reatividade, o grau de risco de ocorrência de reação álcali-agregado é mínimo, considerando as dimensões e condições de exposição dos elementos estruturais de concreto como “não maciço em ambiente seco”.

Alvenarias de vedação são exemplos das estruturas Classe C, onde, frente às consequências da reação álcali-agregado, suas consequências são julgadas significativas, do ponto de vista econômico, ambiental e de segurança mesmo se ocorrer pequena deterioração.

Considerando a estrutura de classe C e o risco de ocorrência mínimo, o grau de intensidade da medida preventiva é MP 1, que traz algumas opções de medidas de mitigação da expansão, destacando-se a utilização de cimentos CP II-E, CP II-Z, CP III ou CP IV. É necessária, portanto, a investigação da capacidade de mitigação destes outros tipos de cimento na reação álcali-agregado. De acordo com a NBR 15577-1 (ABNT, 2018a), mitigação é: “abrandamento, redução ou atenuação dos efeitos da reação álcali-agregado”.

4.1.10 Material pulverulento

O resultado do ensaio de material pulverulento encontra-se na Tabela 15, bem como a especificação da NBR 7211 (ABNT, 2009d).

Tabela 15 – Resultados do ensaio de material pulverulento

Agregado graúdo convencional	Agregado miúdo convencional	Areia fina	Cinza Pesada	Especificação NBR 7211 (ABNT, 2009d)		
1,3%	3,8%	10,6%	1,6%	Miúdo	Concreto submetido ao desgaste superficial	3,0%
					Concreto protegido do desgaste superficial	5,0%
				Graúdo	Rochas com absorção de água inferior a 1%	2,0%

Fonte: Autoria própria (2018).

Nota-se, pela Tabela 15, que, caso o concreto esteja protegido do desgaste superficial, apenas a areia fina não se enquadrar na especificação da NBR 7211 (ABNT, 2009d). Para os blocos de vedação, onde há pouco consumo de cimento, a presença de material pulverulento não é tão deletéria ao bloco, podendo até ajudar na compactação da mistura, sendo este o intuito da inserção da areia fina. Entretanto, no caso dos blocos estruturais, este material fino em grandes quantidades acaba prejudicando a ação do cimento e comprometendo a resistência final do bloco. Por esse motivo, seu teor foi limitado a 15% na mistura.

O teor de material pulverulento da cinza pesada foi 57,9% menor em relação ao agregado miúdo convencional, apesar de, após beneficiamento da cinza, as suas distribuições granulométricas serem idênticas. Isto ocorreu pelo fato da peneira com abertura de malha #75 μm não ser considerada no ensaio de granulometria.

4.1.11 Massa unitária solta

O resultado do ensaio de massa unitária solta está disposto na Tabela 16.

Tabela 16 – Resultados do ensaio de massa unitária solta

Agregado gráúdo con- vencional	Agregado miúdo con- vencional	Areia fina	Cinza Pe- sada
1329 kg/m ³	1505 kg/m ³	1304 kg/m ³	680 kg/m ³

Fonte: Autoria própria (2018).

Pela Tabela 16, observa-se que, para o ensaio de massa unitária solta, a cinza pesada é 54,8% mais leve do que o agregado miúdo convencional. Na seção 4.1.1 foi visto que em relação à massa específica, essa diferença foi de 38,7%. Logo, demonstra-se que a diferença na forma dos grãos da cinza pesada e do agregado miúdo convencional provoca uma variação ainda maior em relação à densidade aparente e que, mesmo igualando as curvas granulométricas, o empacotamento entre os agregados convencionais e modificados pode ser diferente.

4.1.12 Índice de forma

O resultado do ensaio de índice de forma para o agregado graúdo convencional e a especificação da NBR 7211 (ABNT, 2009d) estão na Tabela 17. Este ensaio é realizado apenas em agregados graúdos, por isso não consta o resultado da cinza pesada.

Tabela 17 – Resultados do ensaio de índice de forma

Agregado graúdo convencional	Especificação NBR 7211 (ABNT, 2009d)
2,4	≤ 3

Fonte: Autoria própria (2018).

De acordo com a Tabela 17, observa-se que o agregado graúdo convencional atende ao limite especificado pela NBR 7211 (ABNT, 2009d). Além disso, este valor ficou praticamente idêntico ao obtido pelo equipamento AIMS, que apresentou razão de lamelaridade igual a 2,38.

4.1.13 Índice de desgaste por abrasão “Los Angeles”

O resultado do ensaio de índice de desgaste por abrasão “Los Angeles” está disposto na Tabela 18. Este ensaio foi realizado por

Tabela 18 – Resultados do ensaio de índice de desgaste por abrasão “Los Angeles”

Agregado graúdo convencional	Cinza Pesada*	Especificação NBR 7211 (ABNT, 2009d)
17%	79%	< 50%

* Da maneira que foi coletada na termelétrica.

Fonte: Autoria própria (2018).

Percebe-se, na Tabela 18, que o agregado graúdo convencional atendeu ao limite estabelecido na NBR 7211 (ABNT, 2009d), sendo que o mesmo não ocorreu para a cinza pesada coletada. Este foi um dos motivos para usar apenas a fração miúda da cinza nesta pesquisa.

4.1.14 Cloretos, Sulfatos e Sais solúveis

O resultado do teor de cloretos, sulfatos e sais solúveis encontra-se na Tabela 19.

Tabela 19 – Resultados do teor de cloretos, sulfatos e sais solúveis

<i>Material Composto</i>	Agregado miúdo con- vencional	Cinza pesada	Especificação NBR 7211 (ABNT, 2009d)	
<i>Cloretos</i>	< 0,01%	< 0,01%	Concreto simples	< 0,2%
			Concreto armado	< 0,1%
			Concreto protendido	< 0,01%
<i>Sulfatos</i>	< 0,01%	< 0,01%	< 0,1%	
<i>Sais solúveis</i>	0,16%	0,20%	-	

Fonte: Autoria própria (2018).

Tanto o agregado miúdo convencional quanto a cinza pesada enquadraram-se nos limites estabelecidos para cloretos e sulfatos pela NBR 7211 (ABNT, 2009d), de acordo com a Tabela 19. A referida norma não traz limites para o teor de sais solúveis, mas percebe-se na mesma Tabela que praticamente não houve diferença neste dado para a cinza pesada e para o agregado miúdo convencional.

4.2 Estado fresco do concreto seco

O estado fresco do concreto seco, considerando as mesmas condições de preparo dos blocos de concreto, ditará o quão compactas as misturas ficarão após o processo de vibro prensagem. Ao contrário do que acontece com o concreto plástico, a adição de água para obtenção de uma melhor trabalhabilidade pode aumentar a resistência final do bloco. Porém, como se propôs a analisar a influência das substituições parciais dos agregados convencionais pela cinza pesada e do cimento Portland pela cinza volante tanto no estado fresco quanto no estado endurecido das misturas produzidas, mantiveram-se as quantidades de água e de aditivo da mistura referencial e mediu-se a consistência no estado fresco com o auxílio do consistômetro de Vebe.

4.2.1 Consistômetro de Vebe

Os resultados obtidos com o consistômetro de Vebe estão expostos na Tabela 20 e, para uma melhor visualização, na Figura 28. A Tabela 21 traz a análise de variância destes resultados e as Figuras 29 e 30 a representação gráfica do teste de Tukey. Lembra-se que o mesmo operador realizou o ensaio para todos os traços produzidos.

Tabela 20 – Resultados do ensaio com o consistômetro de Vebe

REF	5P	10P	15P	10V	20V	30V	5P10V	10P20V	15P30V
16 s	19 s	20 s	22 s	18 s	20 s	20 s	19 s	19 s	22 s

Onde: REF – traço referencial; 5P – traço com substituição de 5% do agregado miúdo convencional pela cinza pesada beneficiada; 10P – traço com substituição de 10% do agregado miúdo convencional pela cinza pesada beneficiada; 15P – traço com substituição de 15% do agregado miúdo convencional pela cinza pesada beneficiada; 10V – traço com substituição de 10% do cimento Portland pela cinza volante; 20V – traço com substituição de 20% do cimento Portland pela cinza volante; 30V – traço com substituição de 30% do cimento Portland pela cinza volante; 5P10V – traço com substituição conjunta de 5% do agregado miúdo convencional pela cinza pesada beneficiada e de 10% do cimento Portland pela cinza volante; 10P20V – traço com substituição conjunta de 10% do agregado miúdo convencional pela cinza pesada beneficiada e de 20% do cimento Portland pela cinza volante; 15P30V – traço com substituição conjunta de 15% do agregado miúdo convencional pela cinza pesada beneficiada e de 30% do cimento Portland pela cinza volante.

Fonte: Autoria própria (2018).

A Tabela 20 mostra que todos os traços modificados apresentaram um acréscimo no tempo Vebe. Em termos percentuais, para os traços com substituição parcial do agregado miúdo convencional pela cinza pesada beneficiada: 18,75% para o 5P, 25% para o 10P e 37,5% para o 15P; para os traços com substituição parcial do cimento Portland pela cinza volante: 12,5% para o 10V e 25% para os 20V e 30V; para os traços com substituições parciais conjuntas do agregado miúdo convencional pela cinza pesada e do cimento Portland pela cinza volante: 18,75% para os 5P10V e 10P20V e 37,5% para o 15P30V.

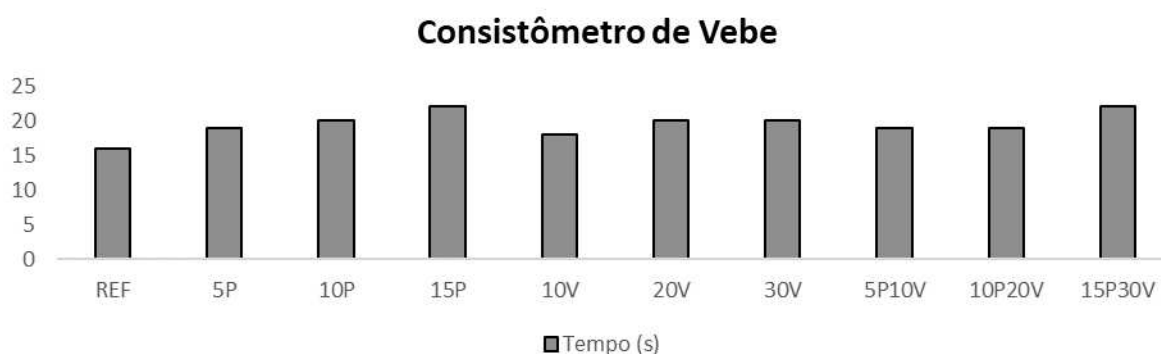
Analisando cada caso separadamente, nota-se que quanto maior o incremento de cinza pesada na mistura, maior o tempo Vebe obtido, ou seja, mais seco e menos trabalhável o concreto. Isso pode ter ocorrido graças às propriedades de textura superficial, com baixa rugosidade para os agregados convencionais e com alta rugosidade para a cinza pesada; e angularidade, sendo os agregados convencionais considerados subarredondados e a cinza pesada, subangular. Quanto mais arredondados e menos rugosos os agregados, melhores são as características no estado fresco do concreto, porém, no estado endurecido, essas mesmas propriedades podem diminuir a aderência entre os agregados e a pasta de cimento, comprometendo os valores de resistência mecânica.

Já para a cinza volante, os incrementos são menores em relação à cinza pesada. A

forma arredondada da cinza volante confere uma certa manutenção das características no estado fresco do concreto, podendo até melhorá-las. Nota-se que não houveram diferenças entre as substituições de 20 e 30%, mantendo o tempo Vebe do teor de 10% de cinza pesada.

Para a mistura das duas cinzas, a cinza volante praticamente não influenciou, sendo o resultado igual à substituição isolada de cinza pesada nos traços 5P10V e 15P30V. No caso do traço 10P20V, em que as substituições isoladas apresentaram o mesmo tempo Vebe, houve uma sensível diminuição deste tempo. A interação entre as cinzas pode ter proporcionado esta mudança, porém, ressalta-se que foi praticamente irrisória.

Figura 28 – Representação gráfica dos resultados do ensaio com o consistômetro de Vebe



Onde: REF – traço referencial; 5P – traço com substituição de 5% do agregado miúdo convencional pela cinza pesada beneficiada; 10P – traço com substituição de 10% do agregado miúdo convencional pela cinza pesada beneficiada; 15P – traço com substituição de 15% do agregado miúdo convencional pela cinza pesada beneficiada; 10V – traço com substituição de 10% do cimento Portland pela cinza volante; 20V – traço com substituição de 20% do cimento Portland pela cinza volante; 30V – traço com substituição de 30% do cimento Portland pela cinza volante; 5P10V – traço com substituição conjunta de 5% do agregado miúdo convencional pela cinza pesada beneficiada e de 10% do cimento Portland pela cinza volante; 10P20V – traço com substituição conjunta de 10% do agregado miúdo convencional pela cinza pesada beneficiada e de 20% do cimento Portland pela cinza volante; 15P30V – traço com substituição conjunta de 15% do agregado miúdo convencional pela cinza pesada beneficiada e de 30% do cimento Portland pela cinza volante.

Fonte: Autoria própria (2018).

A Figura 28 confirma que as mudanças de comportamento no estado fresco dos traços modificados são maiores para a cinza pesada do que para a cinza volante, apesar de que ambas influenciaram nesta característica.

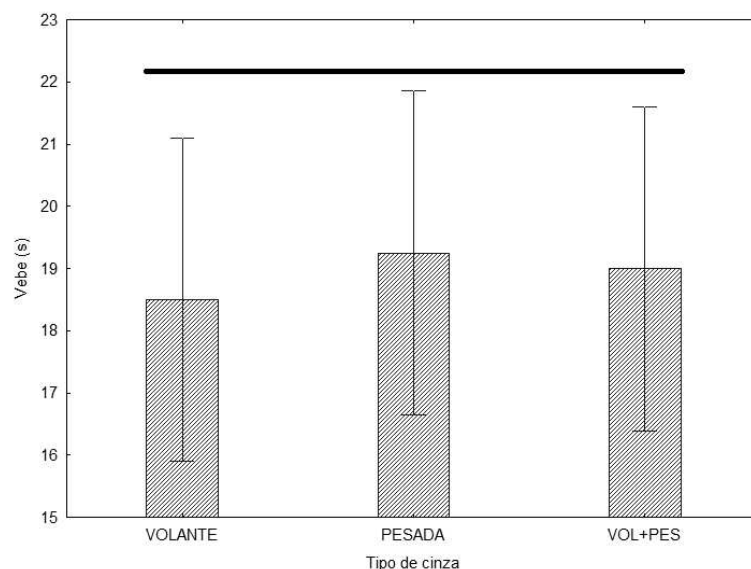
Tabela 21 – Análise de variância dos resultados do ensaio com o consistômetro de Vebe

Parâmetro	F	Valor-P	Influência
Tipo de cinza	0,1099	0,897066	Não
Teor de cinza	29,944	0,000106	Sim

Fonte: Autoria própria (2018).

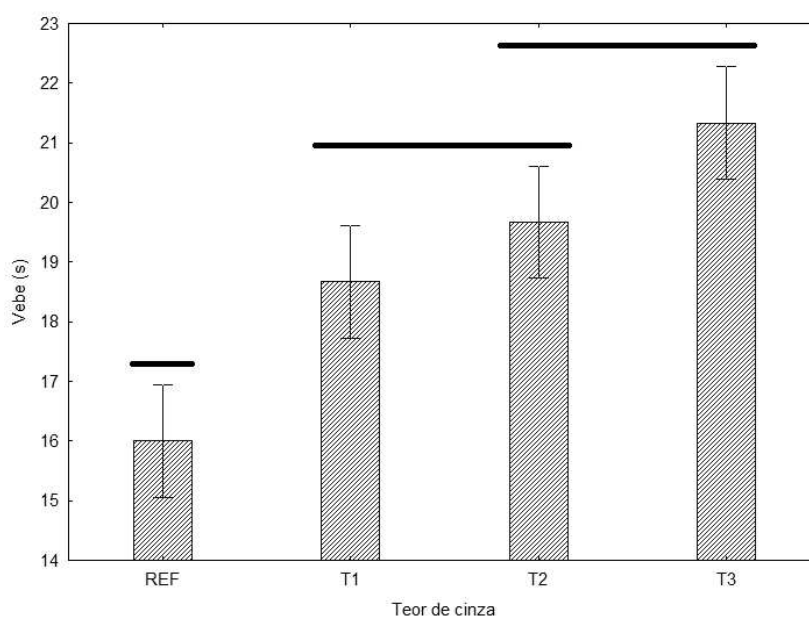
O tipo de cinza, de acordo com a análise de variância apresentada na Tabela 21, não exerceu influência nos resultados do ensaio com o consistômetro de Vebe, já a análise para o teor de cinza mostrou influência neste resultado. O teste de Tukey foi realizado nos dois parâmetros e sua representação gráfica está exposta nas Figuras 29 e 30.

Figura 29 – Representação gráfica do teste de Tukey para o tipo de cinza no ensaio com o consistômetro de Vebe



Fonte: Autoria própria (2018).

Figura 30 – Representação gráfica do teste de Tukey para o teor de cinza no ensaio com o consistômetro de Vebe



Onde: REF – traço referencial; T1: 5P – traço com substituição de 5% do agregado miúdo convencional pela cinza pesada beneficiada, 10V – traço com substituição de 10% do cimento Portland pela cinza volante e 5P10V – traço com substituição conjunta de 5% do agregado miúdo convencional pela cinza pesada beneficiada e de

10% do cimento Portland pela cinza volante; T2: 10P – traço com substituição de 10% do agregado miúdo convencional pela cinza pesada beneficiada, 20V – traço com substituição de 20% do cimento Portland pela cinza volante e 10P20V – traço com substituição conjunta de 10% do agregado miúdo convencional pela cinza pesada beneficiada e de 20% do cimento Portland pela cinza volante; T3: 15P – traço com substituição de 15% do agregado miúdo convencional pela cinza pesada beneficiada, 30V – traço com substituição de 30% do cimento Portland pela cinza volante e 15P30V – traço com substituição conjunta de 15% do agregado miúdo convencional pela cinza pesada beneficiada e de 30% do cimento Portland pela cinza volante.

Fonte: Autoria própria (2018).

Todos os teores de cinza apresentaram diferenças significativas com o traço referencial, de acordo com o teste de Tukey. Porém, como o ensaio foi realizado apenas uma vez para cada traço, não é possível identificar no software quais traços dentro de T1, T2 e T3 exerceram essa diferença. Dentre os traços modificados, T1 só não tem diferença significativa com T2 e este só não tem diferença significativa com T3.

4.3 Caracterização dos blocos

Nesta seção, analisar-se-á os resultados de caracterização dos blocos de concreto para alvenaria produzidos nesta pesquisa, verificando sua aceitação de acordo com os limites estabelecidos na NBR 6136 (ABNT, 2016a) e comparando os traços modificados com o referencial. A análise estatística, para o teor de cinza e para o tipo de cinza, será inserida nas características apresentadas abaixo. Para estas análises, os valores individuais obtidos para cada bloco foram inseridos no *software* Statistica.

4.3.1 Resistência à compressão axial

A Tabela 22 traz os valores estimados de resistência característica à compressão axial dos blocos, calculados conforme a NBR 6136 (ABNT, 2016a) e obtidos aos 7 e 28 dias de produção. A Figura 31 expõe a representação gráfica dos valores obtidos.

Tabela 22 – Valores estimados de resistência característica à compressão axial dos blocos

Traço Idade	REF	5P	10P	15P	10V	20V	30V	5P10V	10P20V	15P30V
7 dias (MPa)	4,50	2,30	3,60	2,31	3,89	3,30	1,80	3,00	2,85	1,41
28 dias (MPa)	5,45	2,85	3,60	2,93	5,50	3,90	2,54	3,16	4,10	1,60

Onde: REF – traço referencial; 5P – traço com substituição de 5% do agregado miúdo convencional pela cinza pesada beneficiada; 10P – traço com substituição de 10% do agregado miúdo convencional pela cinza pesada beneficiada; 15P – traço com substituição de 15% do agregado miúdo convencional pela cinza pesada beneficiada; 10V – traço com substituição de 10% do cimento Portland pela cinza volante; 20V – traço com

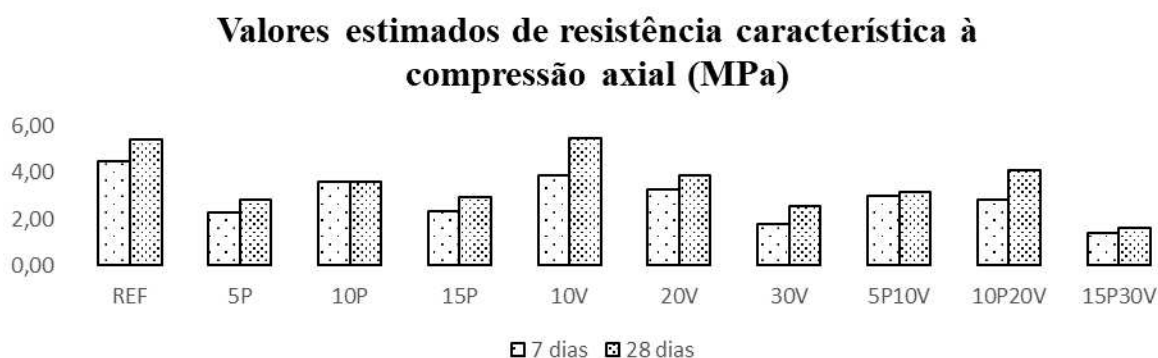
substituição de 20% do cimento Portland pela cinza volante; 30V – traço com substituição de 30% do cimento Portland pela cinza volante; 5P10V – traço com substituição conjunta de 5% do agregado miúdo convencional pela cinza pesada beneficiada e de 10% do cimento Portland pela cinza volante; 10P20V – traço com substituição conjunta de 10% do agregado miúdo convencional pela cinza pesada beneficiada e de 20% do cimento Portland pela cinza volante; 15P30V – traço com substituição conjunta de 15% do agregado miúdo convencional pela cinza pesada beneficiada e de 30% do cimento Portland pela cinza volante.

Fonte: Autoria própria (2018).

Percebe-se na Tabela 22 que a incorporação das cinzas acarretou mudanças nos valores estimados de resistência característica à compressão axial dos blocos. Percentualmente, aos 7 dias, as diminuições em relação ao traço de referência foram de 48,9% para o 5P, 20% para o 10P, 48,7% para o 15P, 13,5% para o 10V, 26,7% para o 20V, 60% para o 30V, 33,3% para o 5P10V, 36,7% para o 10P20V e 68,7% para o 15P30V. Logo, para a substituição isolada de cinza pesada, o melhor teor de substituição foi o de 10%, e os teores de 5% e 15% ficaram praticamente idênticos; para a substituição isolada de cinza volante, o melhor teor foi o de 10% e para os demais teores a resistência diminuiu conforme o incremento de cinza aumentou; para as substituições conjuntas, no 5P10V a cinza volante aparentou compensar a diminuição da resistência causada pela cinza pesada, já nos traços 10P20V e 15P30V os resultados foram inferiores aos das substituições isoladas.

Aos 28 dias, o traço 10V apresentou um leve incremento em relação ao traço referencial (0,9%) e os demais traços diminuíram: 47,7% para o 5P, 33,9% para o 10P, 46,2% para o 15P, 28,4% para o 20V, 53,3% para o 30V, 42% para o 5P10V, 24,8% para o 10P20V e 70,6% para o 15P30V.

Figura 31 – Representação gráfica dos valores estimados de resistência característica à compressão axial dos blocos



Onde: REF – traço referencial; 5P – traço com substituição de 5% do agregado miúdo convencional pela cinza pesada beneficiada; 10P – traço com substituição de 10% do agregado miúdo convencional pela cinza pesada beneficiada; 15P – traço com substituição de 15% do agregado miúdo convencional pela cinza pesada beneficiada; 10V – traço com substituição de 10% do cimento Portland pela cinza volante; 20V – traço com substituição de 20% do cimento Portland pela cinza volante; 30V – traço com substituição de 30% do cimento Portland pela cinza volante; 5P10V – traço com substituição conjunta de 5% do agregado miúdo convencional pela cinza pesada beneficiada e de 10% do cimento Portland pela cinza volante; 10P20V – traço com

substituição conjunta de 10% do agregado miúdo convencional pela cinza pesada beneficiada e de 20% do cimento Portland pela cinza volante; 15P30V – traço com substituição conjunta de 15% do agregado miúdo convencional pela cinza pesada beneficiada e de 30% do cimento Portland pela cinza volante.

Fonte: Autoria própria (2018).

De acordo com a Figura 31, o comportamento dos valores estimados de resistência característica à compressão dos blocos foi bem semelhante aos 7 e aos 28 dias. Além disso, observa-se que o aumento de resistência entre as idades foi bem sensível em todos os traços, provavelmente pela utilização do CP V ARI.

A NBR 6136 (ABNT, 2016a) determina que os blocos de classe C devem possuir valores de resistência característica à compressão maiores ou iguais a 3,0 MPa aos 28 dias. Assim, além do traço referencial, os traços 10P, 10V, 20V, 5P10V e 10P20V atenderam a este requisito.

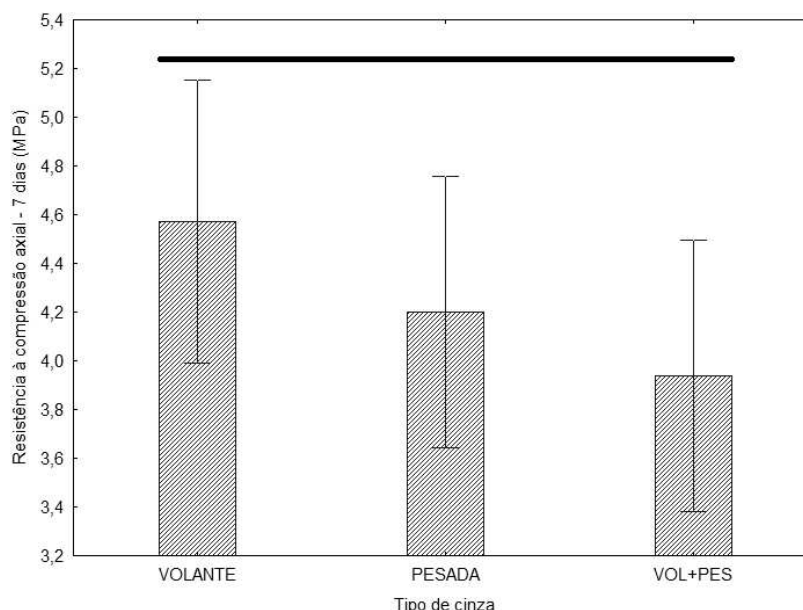
A Tabela 23 apresenta a análise de variância (ANOVA) dos resultados, as Figuras 32 e 33 mostram a significância das substituições em relação ao traço referencial aos 7 dias e as Figuras 34 e 35, aos 28 dias, de acordo com o teste de Tukey.

Tabela 23 – Análise de variância dos resultados de resistência à compressão axial dos blocos

Idade	Parâmetro	F	Valor-P	Influência
7 dias	Tipo de cinza	1,2367	0,296893	Não
	Teor de cinza	38,639	0,000000	Sim
28 dias	Tipo de cinza	1,0350	0,360678	Não
	Teor de cinza	58,978	0,000000	Sim

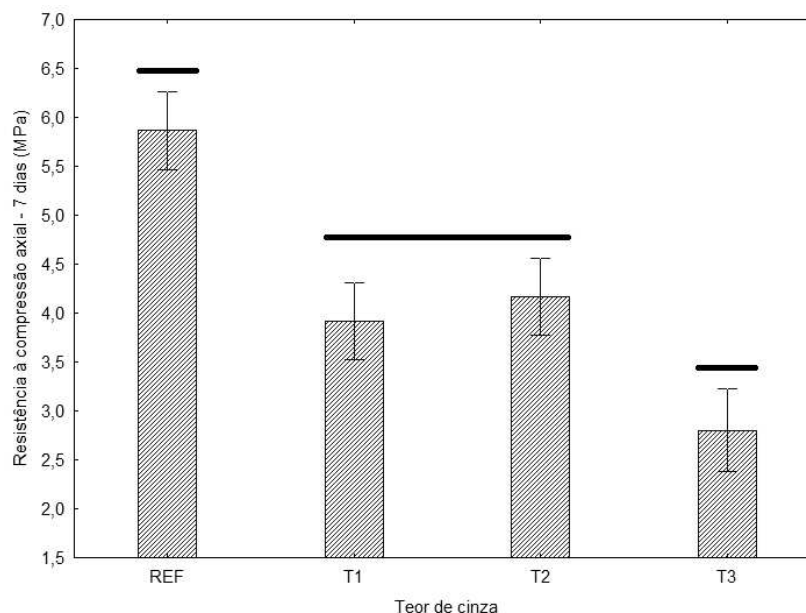
Fonte: Autoria própria (2018).

Figura 32 – Representação gráfica do teste de Tukey para o tipo de cinza na resistência à compressão axial dos blocos aos 7 dias



Fonte: Autoria própria (2018).

Figura 33 – Representação gráfica do teste de Tukey para o teor de cinza na resistência à compressão axial dos blocos aos 7 dias



Onde: REF – traço referencial; T1: 5P – traço com substituição de 5% do agregado miúdo convencional pela cinza pesada beneficiada, 10V – traço com substituição de 10% do cimento Portland pela cinza volante e 5P10V – traço com substituição conjunta de 5% do agregado miúdo convencional pela cinza pesada beneficiada e de 10% do cimento Portland pela cinza volante; T2: 10P – traço com substituição de 10% do agregado miúdo convencional pela cinza pesada beneficiada, 20V – traço com substituição de 20% do cimento Portland pela cinza volante e 10P20V – traço com substituição conjunta de 10% do agregado miúdo convencional pela cinza pesada beneficiada e de 20% do cimento Portland pela cinza volante; T3: 15P – traço com substituição de 15% do agregado miúdo convencional pela cinza pesada beneficiada, 30V – traço com substituição de 30% do cimento Portland pela cinza volante e 15P30V – traço com substituição conjunta de 15% do agregado miúdo convencional pela cinza pesada beneficiada e de 30% do cimento Portland pela cinza volante.

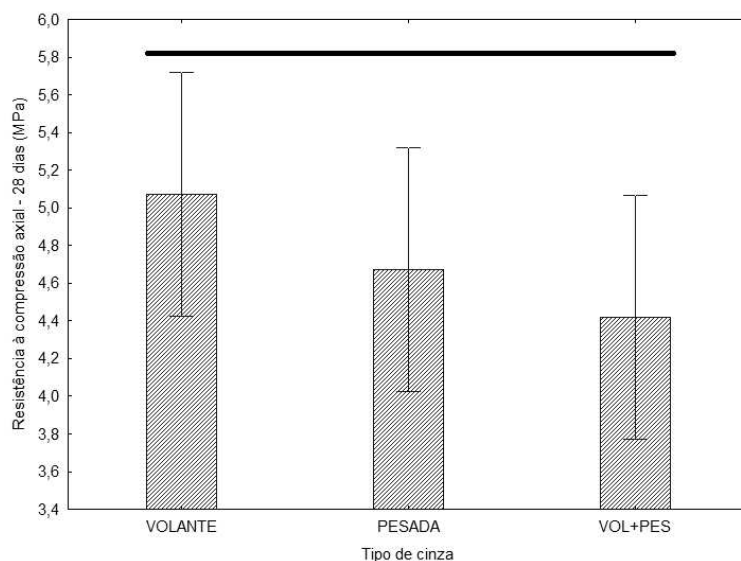
Fonte: Autoria própria (2018).

O teste de Tukey mostrou que todos os teores modificados apresentaram diferença significativa com o traço referencial para a resistência à compressão axial aos 7 dias. Além disso, T1 não tem diferença significativa com T2, porém, todos os outros teores diferiram significativamente entre si.

Para uma análise mais específica, estes teores foram detalhados um a um e submetidos novamente ao teste de Tukey. Como resultado, apenas o traço 10V não apresentou diferença significativa com REF.

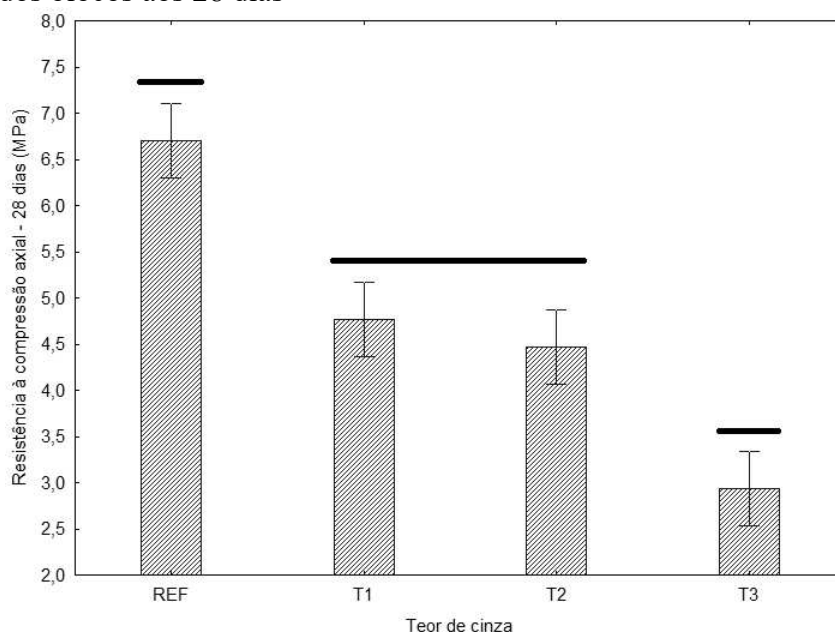
Em T1, 5P e 5P10V não diferiram significativamente e 10V não diferiu significativamente com REF. Os demais traços diferiram significativamente entre si. Em T2, todos os traços modificados apresentaram diferenças significativas com REF, porém, não diferiram significativamente entre si. Em T3, apenas 30V não diferiu significativamente com 15P30V, todos os outros traços diferiram significativamente entre si.

Figura 34 – Representação gráfica do teste de Tukey para o tipo de cinza na resistência à compressão axial dos blocos aos 28 dias



Fonte: Autoria própria (2018).

Figura 35 – Representação gráfica do teste de Tukey para o teor de cinza na resistência à compressão axial dos blocos aos 28 dias



Onde: REF – traço referencial; T1: 5P – traço com substituição de 5% do agregado miúdo convencional pela cinza pesada beneficiada, 10V – traço com substituição de 10% do cimento Portland pela cinza volante e 5P10V – traço com substituição conjunta de 5% do agregado miúdo convencional pela cinza pesada beneficiada e de 10% do cimento Portland pela cinza volante; T2: 10P – traço com substituição de 10% do agregado miúdo convencional pela cinza pesada beneficiada, 20V – traço com substituição de 20% do cimento Portland pela cinza volante e 10P20V – traço com substituição conjunta de 10% do agregado miúdo convencional pela cinza pesada beneficiada e de 20% do cimento Portland pela cinza volante; T3: 15P – traço com substituição de 15% do agregado miúdo convencional pela cinza pesada beneficiada, 30V – traço com substituição de 30% do cimento Portland pela cinza volante e 15P30V – traço com substituição conjunta de 15% do agregado miúdo convencional pela cinza pesada beneficiada e de 30% do cimento Portland pela cinza volante.

Fonte: Autoria própria (2018).

O comportamento dos resultados aos 28 dias é análogo aos resultados de 7 dias. Novamente, apenas T1 não tem diferença significativa com T2, enquanto todos os outros traços diferem significativamente entre si. O desempenho individual dos traços também se manteve praticamente idêntico em relação aos 7 dias, a única diferença foi para T3, onde 30V também não diferiu significativamente com 15P.

Portanto, para o resultado de resistência à compressão axial em ambas as idades, o tipo de cinza não influenciou e o teor de cinza só não influenciou significativamente para o traço 10V. Em todos os casos, a incorporação de cinza volante juntamente com a cinza pesada não influenciou significativamente nos resultados.

Os teores T1 e T2 não apresentaram diferenças significativas entre si nas idades analisadas, logo, para um maior incremento de cinza pesada e da junção das duas cinzas, o teor T2 mostra-se mais favorável à aplicação. Para a substituição isolada de cinza volante, T1, ou seja, 10V, não apresentou diferenças significativas com o traço referencial e, por isso, mos-

tra-se mais conveniente à aplicação. O teor T3 foi o que obteve menor desempenho, não sendo aconselhado para aplicação.

Mesmo influenciando negativamente na maioria dos resultados de resistência à compressão axial, a utilização das cinzas nos traços 10P, 10V, 20V, 5P10V e 10P20V mostraram-se dentro dos limites impostos em norma para os valores estimados de resistência característica à compressão dos blocos. Caso as médias aritméticas dos 6 blocos ensaiados em cada idade fossem consideradas, os traços 5P e 15P também teriam resultados acima de 3,0 MPa aos 28 dias.

Acredita-se que a baixa dureza da cinza pesada, mostrada indiretamente pelo ensaio de índice de desgaste por abrasão “Los Angeles”, culminou na diminuição da resistência final do bloco. Por já possuir consumos de cimento baixos, os blocos também se mostraram suscetíveis às substituições parciais deste pela cinza volante.

4.3.2 Absorção de água

A Tabela 24 mostra os resultados do ensaio de absorção de água e área líquida do bloco e, assim como foi explicado anteriormente, os resultados de massa específica e volume real dos blocos, todos aos 28 dias. A representação gráfica da absorção de água e do volume real dos blocos encontra-se nas Figuras 36 e 37, já as Tabelas 25 e 26 apresentam as análises de variância (ANOVA) destes resultados. As Figuras 38 e 39 expõem a significância das substituições em relação ao traço referencial para o tipo de cinza e as Figuras 40 e 41 para o teor de cinza, de acordo com o teste de Tukey.

Tabela 24 – Resultados do ensaio de absorção de água e área líquida dos blocos

Traço Dado	REF	5P	10P	15P	10V	20V	30V	5P10V	10P20V	15P30V
<i>Absorção de água (%)</i>	7,18	7,37	8,08	9,59	6,52	7,24	7,41	7,11	7,84	8,72
<i>Área líquida (mm²)</i>	25577	25321	25868	25170	25068	25382	25412	25925	24940	24830
<i>Massa específica (g/cm³)</i>	2,29	2,29	2,28	2,28	2,29	2,31	2,33	2,29	2,28	2,27
<i>Volume(cm³)</i>	4173	4117	4152	3925	4143	4132	4118	4236	4041	3939

Onde: REF – traço referencial; 5P – traço com substituição de 5% do agregado miúdo convencional pela cinza pesada beneficiada; 10P – traço com substituição de 10% do agregado miúdo convencional pela cinza pesada beneficiada; 15P – traço com substituição de 15% do agregado miúdo convencional pela cinza pesada beneficiada; 10V – traço com substituição de 10% do cimento Portland pela cinza volante; 20V – traço com

substituição de 20% do cimento Portland pela cinza volante; 30V – traço com substituição de 30% do cimento Portland pela cinza volante; 5P10V – traço com substituição conjunta de 5% do agregado miúdo convencional pela cinza pesada beneficiada e de 10% do cimento Portland pela cinza volante; 10P20V – traço com substituição conjunta de 10% do agregado miúdo convencional pela cinza pesada beneficiada e de 20% do cimento Portland pela cinza volante; 15P30V – traço com substituição conjunta de 15% do agregado miúdo convencional pela cinza pesada beneficiada e de 30% do cimento Portland pela cinza volante.

Fonte: Autoria própria (2018).

Sobre a absorção de água, em relação ao traço referencial, o traço 10V mostrou uma diminuição de 9,2% e o traço 5P10V de aproximadamente 1%. Os demais traços aumentaram os valores desta propriedade, também em relação ao traço referencial: 2,6% para o 5P, 12,5% para o 10P, 33,6% para o 15P, 0,8% para o 20V, 3,2% para o 30V, 9,2% para o 10P20V e 21,4% para o 15P30V. Logo, a cinza pesada exerce uma influência negativa nesta característica, enquanto a cinza volante melhora ou a mantém para até 20% de substituição, com sensível aumento para o teor de 30%. A cinza volante parece compensar o efeito negativo da cinza pesada para este ensaio nos traços com substituição conjunta, diminuindo suas diferenças percentuais em relação ao traço referencial. Estas afirmações podem ser visualizadas na representação gráfica dos resultados do ensaio de absorção de água nos blocos, mostrada na Figura 36.

Figura 36 – Representação gráfica dos resultados do ensaio de absorção de água dos blocos



Onde: REF – traço referencial; 5P – traço com substituição de 5% do agregado miúdo convencional pela cinza pesada beneficiada; 10P – traço com substituição de 10% do agregado miúdo convencional pela cinza pesada beneficiada; 15P – traço com substituição de 15% do agregado miúdo convencional pela cinza pesada beneficiada; 10V – traço com substituição de 10% do cimento Portland pela cinza volante; 20V – traço com substituição de 20% do cimento Portland pela cinza volante; 30V – traço com substituição de 30% do cimento Portland pela cinza volante; 5P10V – traço com substituição conjunta de 5% do agregado miúdo convencional pela cinza pesada beneficiada e de 10% do cimento Portland pela cinza volante; 10P20V – traço com substituição conjunta de 10% do agregado miúdo convencional pela cinza pesada beneficiada e de 20% do cimento Portland pela cinza volante; 15P30V – traço com substituição conjunta de 15% do agregado miúdo convencional pela cinza pesada beneficiada e de 30% do cimento Portland pela cinza volante.

Fonte: Autoria própria (2018).

Tabela 25 – Análise de variância dos resultados de absorção de água dos blocos

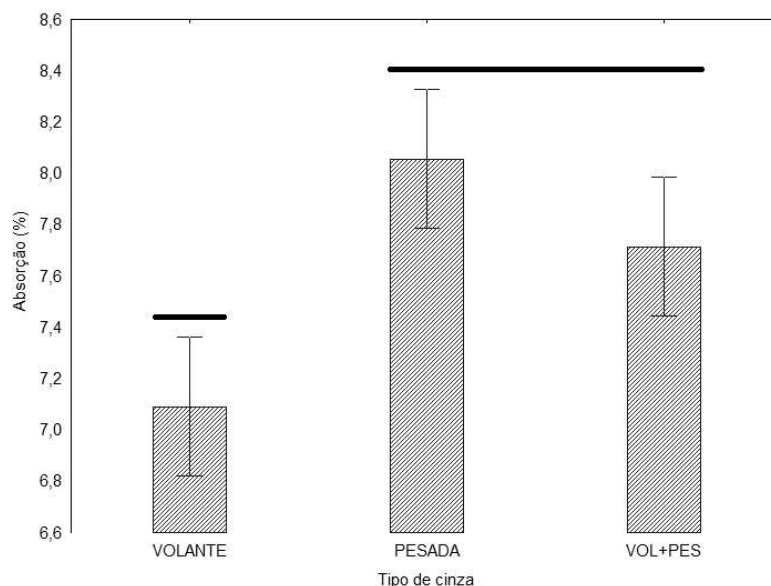
Parâmetro	F	Valor-P	Influência
Tipo de cinza	4,825	0,014516	Sim
Teor de cinza	11,861	0,000022	Sim

Fonte: Autoria própria (2018).

A partir da análise de variância dos resultados de absorção de água dos blocos, apontada na Tabela 25, nota-se que tanto o tipo de cinza quanto o teor de cinza exercem influência nestes resultados, sendo que o teor de cinza influencia mais do que o tipo de cinza, visto que o valor-P ficou ainda mais inferior a 0,05.

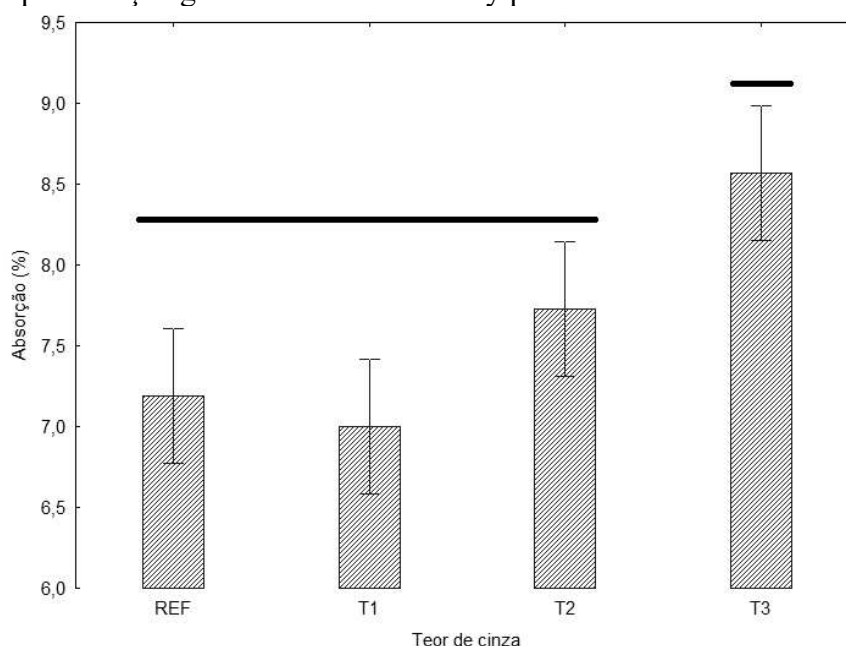
O teste de Tukey mostrou que o tipo de cinza tem diferença significativa no resultado de absorção de água dos blocos, porém, a utilização das cinzas em conjunto não tem diferença significativa em relação à utilização de apenas cinza pesada, conforme pode ser visualizado na Figura 37. Sobre o teor de cinza, T3 (que simboliza os traços 15P, 30V e 15P30V) apresentou diferença significativa com os outros traços, sendo que estes não apresentaram diferença significativa entre si. Essa afirmação está representada graficamente na Figura 38. Outro teste de Tukey foi realizado nos traços inerentes a T3, a fim de verificar qual deles diferiu significativamente com o traço referencial.

Figura 37 – Representação gráfica do teste de Tukey para o tipo de cinza na absorção de água



Fonte: Autoria própria (2018).

Figura 38 – Representação gráfica do teste de Tukey para o teor de cinza na absorção de água



Onde: REF – traço referencial; T1: 5P – traço com substituição de 5% do agregado miúdo convencional pela cinza pesada beneficiada, 10V – traço com substituição de 10% do cimento Portland pela cinza volante e 5P10V – traço com substituição conjunta de 5% do agregado miúdo convencional pela cinza pesada beneficiada e de 10% do cimento Portland pela cinza volante; T2: 10P – traço com substituição de 10% do agregado miúdo convencional pela cinza pesada beneficiada, 20V – traço com substituição de 20% do cimento Portland pela cinza volante e 10P20V – traço com substituição conjunta de 10% do agregado miúdo convencional pela cinza pesada beneficiada e de 20% do cimento Portland pela cinza volante; T3: 15P – traço com substituição de 15% do agregado miúdo convencional pela cinza pesada beneficiada, 30V – traço com substituição de 30% do cimento Portland pela cinza volante e 15P30V – traço com substituição conjunta de 15% do agregado miúdo convencional pela cinza pesada beneficiada e de 30% do cimento Portland pela cinza volante.

Fonte: Autoria própria (2018).

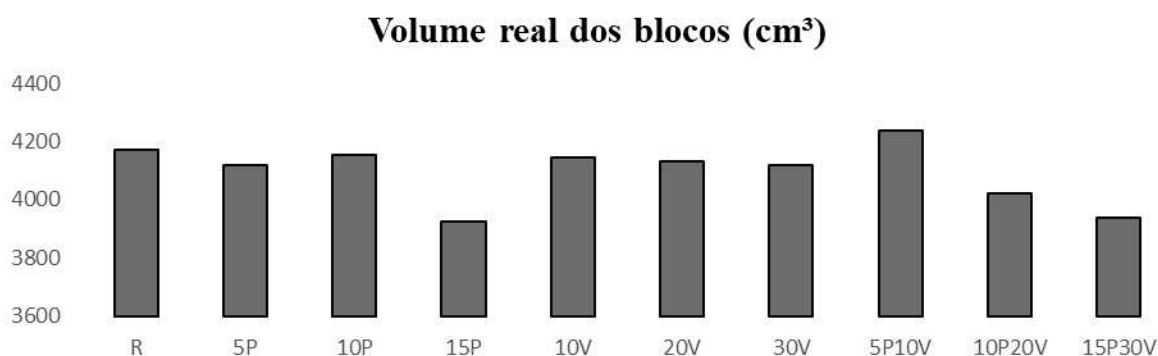
O resultado deste teste de Tukey adicional mostrou que apenas 30V não tem diferença significativa com REF. No entanto, 30V tem diferença significativa com 15P e 15P30V, enquanto estes não tem diferença significativa entre si. Ou seja, para o resultado de absorção de água, a cinza volante não exerceu uma diferença significativa quando adicionada juntamente com a cinza pesada e os traços 5P, 10P, 10V, 20V, 30V, 5P10V e 10P20V não tem diferença significativa com o traço referencial.

A NBR 6136 (ABNT, 2016a) determina que os blocos de classe C devem possuir valores de absorção de água menores ou iguais a 11% nos resultados individuais e a 10% na média aritmética entre eles. Então, todos os traços enquadraram-se nesta exigência.

Área líquida, de acordo com a NBR 6136 (ABNT, 2016a), é a área média da seção perpendicular ao eixo dos furos, descontadas as áreas médias dos vazios. Este resultado foi exposto na Tabela 24, mas não foi considerado relevante a comentários. Como as cinzas são mais leves do que o cimento e os agregados convencionais, a massa específica dos blocos

manteve-se praticamente constante em todos os traços, visto que a sua massa diminui quase que juntamente ao seu volume real. Propôs-se, então, comentar e analisar o volume real dos blocos, representado graficamente na Figura 39.

Figura 39 – Representação gráfica dos resultados de volume real dos blocos



Onde: REF – traço referencial; 5P – traço com substituição de 5% do agregado miúdo convencional pela cinza pesada beneficiada; 10P – traço com substituição de 10% do agregado miúdo convencional pela cinza pesada beneficiada; 15P – traço com substituição de 15% do agregado miúdo convencional pela cinza pesada beneficiada; 10V – traço com substituição de 10% do cimento Portland pela cinza volante; 20V – traço com substituição de 20% do cimento Portland pela cinza volante; 30V – traço com substituição de 30% do cimento Portland pela cinza volante; 5P10V – traço com substituição conjunta de 5% do agregado miúdo convencional pela cinza pesada beneficiada e de 10% do cimento Portland pela cinza volante; 10P20V – traço com substituição conjunta de 10% do agregado miúdo convencional pela cinza pesada beneficiada e de 20% do cimento Portland pela cinza volante; 15P30V – traço com substituição conjunta de 15% do agregado miúdo convencional pela cinza pesada beneficiada e de 30% do cimento Portland pela cinza volante.

Fonte: Autoria própria (2018).

Acerca do volume real dos blocos, em relação ao traço referencial, houve um pequeno aumento de 1,5% para o traço 5P10V, enquanto os demais diminuíram: 1,3% para o 5P, 0,5% para o 10P, 5,9% para o 15P, 0,7% para o 10V, 1% para o 20V, 1,3% para o 30V, 3,2% para o 10P20V e 5,6% para o 15P30V.

A Figura 39 ilustra o fato de que o volume real dos blocos manteve-se praticamente constante em todos os traços, destacando-se apenas o 15P e o 15P30V. Este menor volume pode ter colaborado com a diminuição da resistência à compressão axial e com o aumento da absorção de água para estes traços.

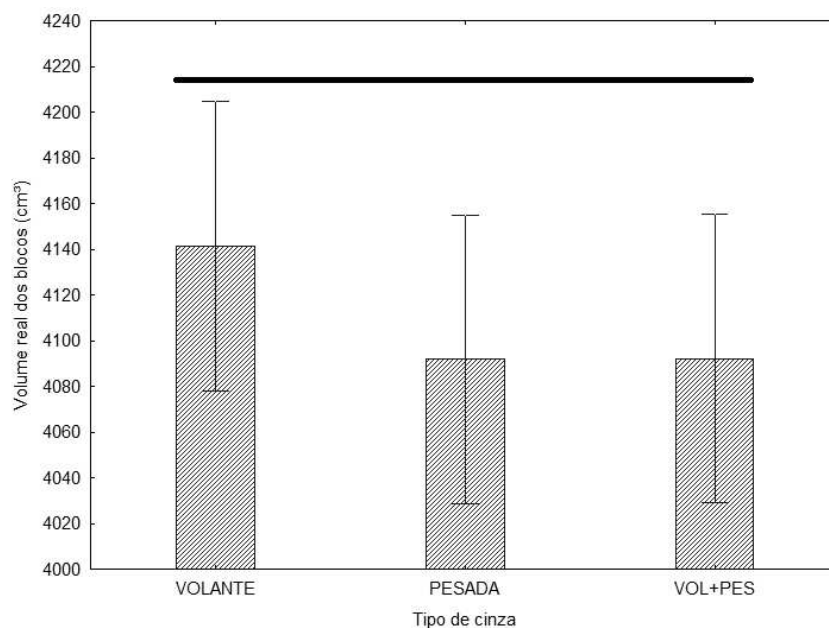
Tabela 26 – Análise de variância dos resultados de volume real dos blocos

Parâmetro	F	Valor-P	Influência
Tipo de cinza	0,84	0,438860	Não
Teor de cinza	9,14	0,000162	Sim

Fonte: Autoria própria (2018).

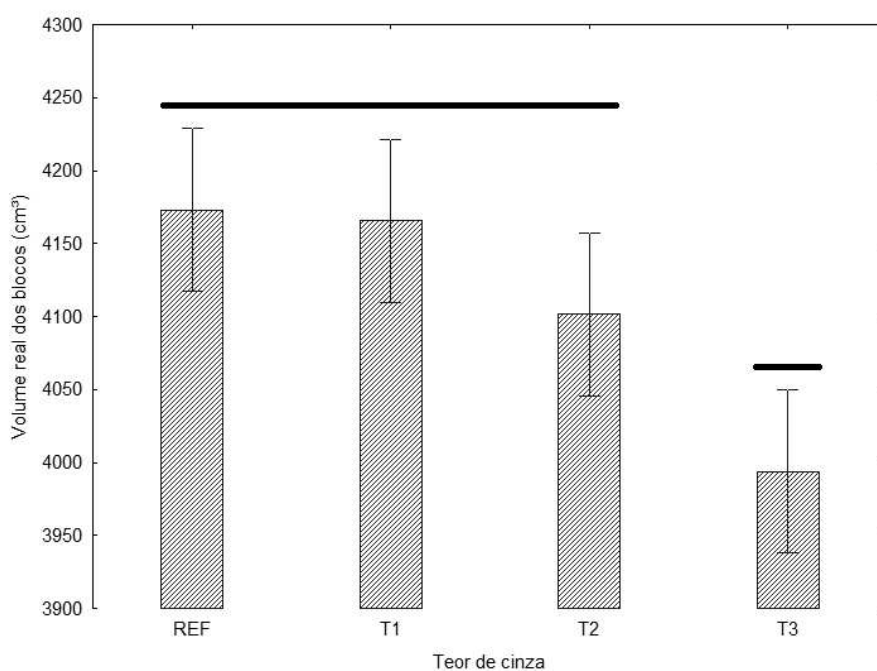
A análise de variância contida na Tabela 26 mostra que o tipo de cinza não tem influência no resultado de volume real dos blocos, no entanto, o teor de cinza sim. O teste de Tukey foi realizado no tipo de cinza apenas para ilustração e confirmou que não há diferenças significativas neste parâmetro para o resultado de volume real dos blocos (Figura 40).

Figura 40 – Representação gráfica do teste de Tukey para o tipo de cinza no volume real dos blocos



Fonte: Autoria própria (2018).

Figura 41 – Representação gráfica do teste de Tukey para o teor de cinza no volume real dos blocos



Onde: REF – traço referencial; T1: 5P – traço com substituição de 5% do agregado miúdo convencional pela cinza pesada beneficiada, 10V – traço com substituição de 10% do cimento Portland pela cinza volante e 5P10V – traço com substituição conjunta de 5% do agregado miúdo convencional pela cinza pesada beneficiada e de 10% do cimento Portland pela cinza volante; T2: 10P – traço com substituição de 10% do agregado miúdo convencional pela cinza pesada beneficiada, 20V – traço com substituição de 20% do cimento Portland pela cinza volante e 10P20V – traço com substituição conjunta de 10% do agregado miúdo convencional pela cinza pesada beneficiada e de 20% do cimento Portland pela cinza volante; T3: 15P – traço com substituição de 15% do agregado miúdo convencional pela cinza pesada beneficiada, 30V – traço com substituição de 30% do cimento Portland pela cinza volante e 15P30V – traço com substituição conjunta de 15% do agregado miúdo convencional pela cinza pesada beneficiada e de 30% do cimento Portland pela cinza volante.

Fonte: Autoria própria (2018).

O teste de Tukey realizado para o teor de cinza, representado graficamente na Figura 41, mostrou que, mais uma vez, T3 (15P, 30V e 15P30V) mostrou ter diferenças significativas com os demais teores, enquanto estes não apresentaram diferenças significativas entre si. Então, outro teste de Tukey foi realizado com o traço referencial e estes três traços de T3, mostrando que REF não tem diferença significativa com 30V, mas tem com 15P e 15P30V. Além disso, 30V não tem diferença significativa com os demais traços e 15P e 15P30V só tem diferença significativa com REF.

Então, para o resultado de volume real dos blocos, o tipo de cinza não implicou em diferenças significativas, contudo, os traços 15P e 15P30V, sim. Os demais teores não tem diferença significativa entre si. Estes dois traços citados anteriormente foram os que apresentaram maior tempo Vebe, ou seja, no estado fresco, o concreto mais seco dentre os estudados. Essa consistência pode ter influenciado na compacidade final dos blocos, alterando tanto os resultados de volume real destes, quanto o de absorção de água e resistência à compressão axial.

4.3.3 Módulo de elasticidade

A Tabela 27 explicita os resultados do ensaio de módulo de elasticidade realizado nos blocos aos 28 dias de produção. A representação gráfica destes resultados é mostrada na Figura 42 e a Tabela 28 traz a sua análise de variância (ANOVA). A Figura 43 expõe a significância das substituições, de acordo com o teste de Tukey.

Tabela 27 – Resultados do ensaio de módulo de elasticidade dos blocos

REF (GPa)	5P (GPa)	10P (GPa)	15P (GPa)	10V (GPa)	20V (GPa)	30V (GPa)	5P10V (GPa)	10P20V (GPa)	15P30V (GPa)
6,38	12,44	6,13	6,30	6,76	4,73	3,19	10,84	8,12	2,05

Onde: REF – traço referencial; 5P – traço com substituição de 5% do agregado miúdo convencional pela cinza

pesada beneficiada; 10P – traço com substituição de 10% do agregado miúdo convencional pela cinza pesada beneficiada; 15P – traço com substituição de 15% do agregado miúdo convencional pela cinza pesada beneficiada; 10V – traço com substituição de 10% do cimento Portland pela cinza volante; 20V – traço com substituição de 20% do cimento Portland pela cinza volante; 30V – traço com substituição de 30% do cimento Portland pela cinza volante; 5P10V – traço com substituição conjunta de 5% do agregado miúdo convencional pela cinza pesada beneficiada e de 10% do cimento Portland pela cinza volante; 10P20V – traço com substituição conjunta de 10% do agregado miúdo convencional pela cinza pesada beneficiada e de 20% do cimento Portland pela cinza volante; 15P30V – traço com substituição conjunta de 15% do agregado miúdo convencional pela cinza pesada beneficiada e de 30% do cimento Portland pela cinza volante.

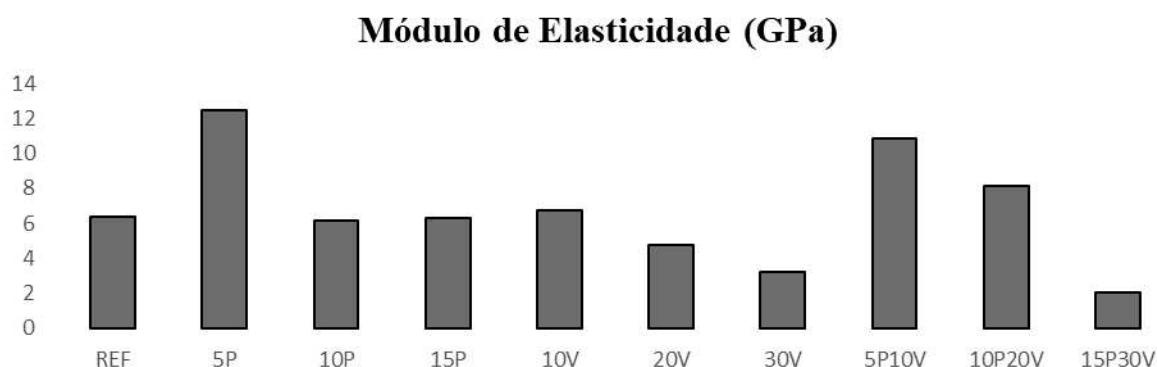
Fonte: Autoria própria (2018).

Sobre os resultados do ensaio de módulo de elasticidade dos blocos, em relação ao traço referencial, houve aumentos e diminuições. Acerca dos incrementos: 95% para o 5P, 6% para o 10V, 70% para o 5P10V e 27% para o 10P20V. A respeito das minorações: 4% para o 10P, 1,3% para o 15P, 26% para o 20V, 50% para o 30V e 68% para o 15P30V.

O módulo de elasticidade é a relação entre a tensão e a deformação de um corpo. As alterações nestes resultados podem ter ocorrido por variações na tensão e/ou na deformação. Como os resultados de resistência à compressão axial são conhecidos, pode-se analisar a deformação dos blocos a partir do resultado do ensaio de módulo de elasticidade.

Sabendo que o resultado deste ensaio é diretamente influenciado pelos agregados utilizados na mistura, entende-se o motivo das maiores alterações terem sido para os traços contendo cinza pesada (5P, 5P10V e 10P20V). Esta conferiu uma maior deformação aos blocos, em relação ao que continham apenas agregados convencionais.

Figura 42 – Representação gráfica dos resultados de módulo de elasticidade dos blocos



Onde: REF – traço referencial; 5P – traço com substituição de 5% do agregado miúdo convencional pela cinza pesada beneficiada; 10P – traço com substituição de 10% do agregado miúdo convencional pela cinza pesada beneficiada; 15P – traço com substituição de 15% do agregado miúdo convencional pela cinza pesada beneficiada; 10V – traço com substituição de 10% do cimento Portland pela cinza volante; 20V – traço com substituição de 20% do cimento Portland pela cinza volante; 30V – traço com substituição de 30% do cimento Portland pela cinza volante; 5P10V – traço com substituição conjunta de 5% do agregado miúdo convencional pela cinza pesada beneficiada e de 10% do cimento Portland pela cinza volante; 10P20V – traço com substituição conjunta de 10% do agregado miúdo convencional pela cinza pesada beneficiada e de 20% do cimento Portland pela cinza volante; 15P30V – traço com substituição conjunta de 15% do agregado miúdo

convencional pela cinza pesada beneficiada e de 30% do cimento Portland pela cinza volante.

Fonte: Autoria própria (2018).

Pela Figura 42 percebe-se que o traço 5P e o 30V foram os mais influentes nos resultados de módulo de elasticidade, o primeiro incrementando e o segundo minorando. As combinações contendo estes teores também se comportaram de forma semelhante. A minoração do traço 30V é atribuída a uma menor resistência à compressão axial, ou seja, uma menor tensão.

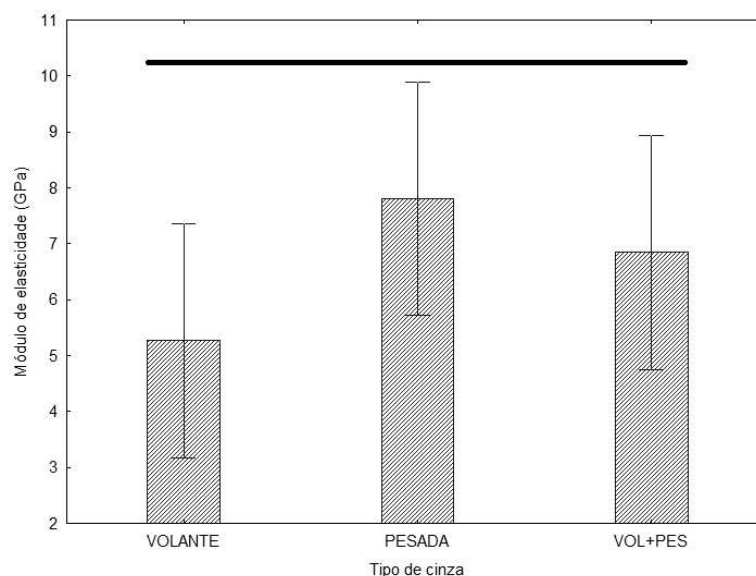
Tabela 28 – Análise de variância dos resultados de módulo de elasticidade dos blocos

Parâmetro	F	Valor-P	Influência
Tipo de cinza	1,6368	0,218473	Não
Teor de cinza	9,6747	0,000375	Sim

Fonte: Autoria própria (2018).

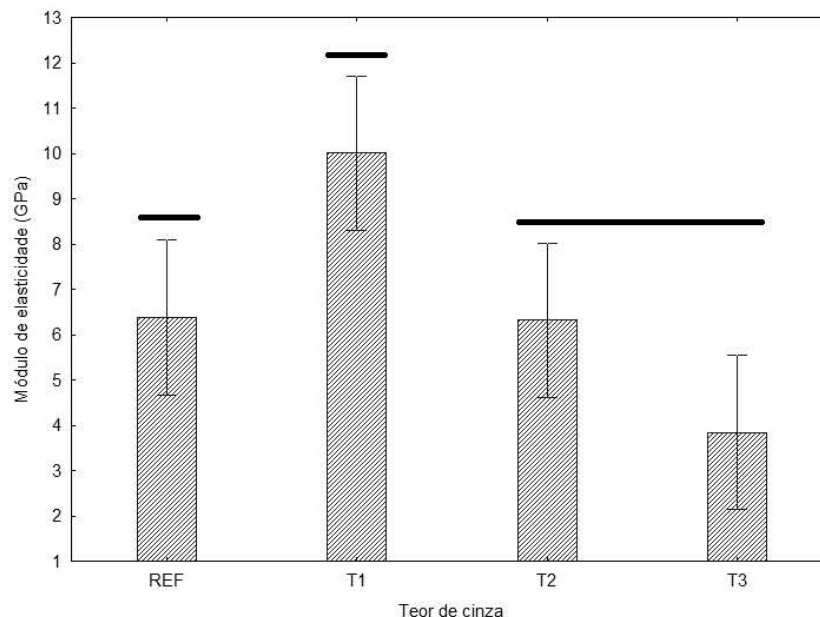
A Tabela 28, que traz a análise de variância dos resultados de módulo de elasticidade dos blocos, expõe que o tipo de cinza não influencia nestes resultados, ao contrário do teor de cinza. O teste de Tukey foi realizado nestes dois parâmetros, sendo apenas para confirmação no tipo de cinza, e está representado graficamente nas Figuras 43 e 44.

Figura 43 – Representação gráfica do teste de Tukey para o tipo de cinza no módulo de elasticidade dos blocos



Fonte: Autoria própria (2018).

Figura 44 – Representação gráfica do teste de Tukey para o teor de cinza no módulo de elasticidade dos blocos



Onde: REF – traço referencial; T1: 5P – traço com substituição de 5% do agregado miúdo convencional pela cinza pesada beneficiada, 10V – traço com substituição de 10% do cimento Portland pela cinza volante e 5P10V – traço com substituição conjunta de 5% do agregado miúdo convencional pela cinza pesada beneficiada e de 10% do cimento Portland pela cinza volante; T2: 10P – traço com substituição de 10% do agregado miúdo convencional pela cinza pesada beneficiada, 20V – traço com substituição de 20% do cimento Portland pela cinza volante e 10P20V – traço com substituição conjunta de 10% do agregado miúdo convencional pela cinza pesada beneficiada e de 20% do cimento Portland pela cinza volante; T3: 15P – traço com substituição de 15% do agregado miúdo convencional pela cinza pesada beneficiada, 30V – traço com substituição de 30% do cimento Portland pela cinza volante e 15P30V – traço com substituição conjunta de 15% do agregado miúdo convencional pela cinza pesada beneficiada e de 30% do cimento Portland pela cinza volante.

Fonte: Autoria própria (2018).

Analisando o teor de cinza, que apresentou influência nos resultados de módulo de elasticidade dos blocos, o teste de Tukey mostrou que apenas T1 (5P, 10V e 5P10V) tem diferença significativa com os demais teores. Outro teste foi realizando dentro de T1 e apenas 5P mostrou diferenças significativas com o traço referencial. Além disso, 10V tem diferença significativa apenas com 5P, enquanto este não tem diferença significativa apenas com 5P10V.

Logo, o tipo de cinza não influenciou nos resultados de módulo de elasticidade, mas o teor de cinza influenciou para o traço 5P. Nesse caso, o incremento de cinza volante (traço 5P10V) se mostrou suficiente para retirar essa diferença com o traço referencial.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Mehta e Monteiro (2008) comentam que as usinas de energia elétrica e alto-fornos metalúrgicos são as principais causas da vasta geração de subprodutos industriais (parcela mais significativa dos resíduos sólidos gerados em larga escala no mundo) e que sua aplicação na produção do cimento, ou em substituição parcial deste, e como adição mineral é disseminada em vários países.

Martins (2014) adverte que o aproveitamento dos recursos (materiais ou energéticos) torna o vínculo entre energia, meio ambiente e consumo de matérias-primas mais correto e que uma das formas de cumprir esse objetivo é admitir que alguns materiais usualmente declarados como resíduos sejam reempregados nos processos produtivos.

Assim, foram estudados 2 dos 3 tipos de cinza geradas na Usina Termelétrica do Pecém e concluiu-se que estas são aplicáveis na confecção de blocos de concreto para alvenaria, visto que os produtos da dissertação foram considerados de boa qualidade, sem prejuízos à sua potencialidade de aplicação comercial, em certos teores.

Chies, Silva e Zwonok (2003) explicam que um produto é de boa qualidade quando corresponde às necessidades técnicas exigidas para sua aplicação: resistência, trabalhabilidade, durabilidade e conforto são algumas delas; sem esquecer-se dos requisitos econômicos que, sem dúvidas, também devem ser levados em consideração no momento da escolha de um material de construção; além da estética e da questão ambiental.

Acredita-se que agregar valor a um subproduto industrial abundantemente disponível na região de estudo incentiva seu reaproveitamento em grande escala e estimula a diminuição da exploração dos recursos naturais, além de possibilitar a redução do passivo ambiental da Usina Termelétrica do Pecém, que é da ordem de centenas de toneladas de cinzas por dia. Abaixo, encontram-se as conclusões da pesquisa e as sugestões para trabalhos futuros.

5.1 Conclusões

A partir das análises e discussões dos resultados de caracterização das cinzas, do estado fresco do concreto seco e da caracterização dos blocos, tem-se que:

- A distribuição granulométrica da cinza pesada, conforme coletada da usina, não permitiu a sua aplicação sem beneficiamento;

- A cinza pesada difere dos agregados convencionais em relação à forma 2D, angularidade, textura superficial e lamelaridade, sendo equivalente apenas em relação à esfericidade;
- No estado fresco do concreto seco, analisando os valores individuais, a cinza pesada parece influenciar mais no aumento do tempo Vebe do que a cinza volante, porém, a análise de variância mostrou que o tipo de cinza não influenciou no resultado de consistência, apenas o teor de cinza. Sobre este último parâmetro, o concreto referencial diferiu significativamente de todos os outros traços estudados, no entanto, T1 não diferiu significativamente de T2 e este não diferiu significativamente de T3;
- Na resistência à compressão axial, o teor mais indicado foi T2, visto que todos os traços inerentes a ele se enquadraram no valor mínimo exigido em norma;
- Sobre a absorção de água, todos os traços se enquadraram no valor máximo estabelecido em norma. Neste dado e no volume real dos blocos, T1 e T2 mostraram-se como os teores mais indicados por não diferirem significativamente do traço referencial;
- Para o módulo de elasticidade, T2 mostrou-se mais próximo dos resultados do traço referencial;
- Segundo as análises estatísticas, o tipo de cinza só influenciou nos resultados de absorção de água, porém, a adição de cinza volante junto com a cinza pesada não exerceu diferenças significativas em nenhum dos casos; além disso, o teor de cinza influenciou em todos os ensaios realizados.

Então, conclui-se que o teor mais favorável à substituição, dentre os estudados, foi T2, que compreende os traços 10P, 20V e 10P20V.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

Analisando os traços de cada cinza separadamente, percebe-se que, em relação ao traço referencial, 10V e 10P apresentaram-se como os mais favoráveis. Neste trabalho, a utilização das cinzas volante e pesada foram analisadas quanto às propriedades físico-mecânicas, sendo necessário um estudo mais aprofundado. Assim, sugere-se:

- Produzir blocos com 10% de substituição do cimento Portland pela cinza volante e 10% de substituição do agregado miúdo natural pela cinza pesada beneficiada, concomitantemente (10P10V);

- Verificar a influência das cinzas no isolamento térmico e acústico dos ambientes que os blocos de concreto venham a compor;
- Certificar a durabilidade dos blocos de concreto com cinzas;
- Realizar ensaios com prismas de alvenaria;
- Ajustar a consistência nos traços modificados para confecção dos blocos.

REFERÊNCIAS

- ADRIANO, D. C.; PAGE, A. L.; ELSEEWI, A. A.; CHANG, A. C.; STRAUGHAN, I. Utilization and disposal of fly ash and other residues in terrestrial ecosystems: a review. **Journal of Environmental Quality**, p. 333-344, 1980.
- AL ROUSAN, T. M. **Characterization of aggregate shape properties using a computer automated system**. 2004. 211f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - College Station, Texas, 2004.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE - ACI 211.3R-02 - **Guide for Selecting Proportions for No-Slump Concrete**, 2009.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM, C1170 - **Standard Test Methods for Determining Consistency and Density of Roller-Compacted Concrete Using a Vibrating Table**, 1998.
- ARENAS, C. G.; MARRERO, M.; LEIVA, C.; SOLÍS-GUZMÁN, J.; ARENAS, L. F. V. High fire resistance in blocks containing coal combustion fly ashes and bottom ash. **Waste Management**, v. 31, n. 8, p. 1783-1789, 2011.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Atlas de energia elétrica do Brasil**. 3. ed. Brasília: Aneel, 2008.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Fontes de Energia Elétrica no Brasil. **Infográficos**, 2016. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/documents/656877/15142444/Fontes+de+Energia+no+Brasil/2eb48f5c-cc7f-4f63-867e-b2a4f3603418?version=1.0>>. Acesso em: 11 maio 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004**: Resíduos sólidos – Classificação. Rio de Janeiro, 2004b.
- _____. **NBR 10005**: Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004a.
- _____. **NBR 10006**: Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004c.
- _____. **NBR 11579**: Cimento Portland - Determinação do índice de finura por meio da peneira 75 µm (nº 200). Rio de Janeiro, 2013.
- _____. **NBR 11582**: Cimento Portland - Determinação da expansibilidade Le Chatelier. Rio de Janeiro, 2016b.
- _____. **NBR 12118**: Blocos vazados de concreto simples para alvenaria - Métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2014a.
- _____. **NBR 12653**: Materiais pozolânicos - Requisitos. Rio de Janeiro, 2015a.
- _____. **NBR 12826**: Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação do índice de finura por meio de peneirador aerodinâmico. Rio de Janeiro, 2014c.

_____. **NBR 15287:** Informação e documentação: Projeto de pesquisa: Apresentação. Rio de Janeiro, 2011.

_____. **NBR 15577-1:** Agregados – Reatividade álcali-agregado - Parte 1: Guia para avaliação da reatividade potencial e medidas preventivas para uso de agregados em concreto. Rio de Janeiro, 2018a.

_____. **NBR 15577-4:** Agregados – Reatividade álcali-agregado - Parte 4: Determinação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado. Rio de Janeiro, 2018b.

_____. **NBR 16372:** Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de Blaine). Rio de Janeiro, 2015c.

_____. **NBR 16606:** Cimento Portland - Determinação da pasta de consistência normal. Rio de Janeiro, 2017a.

_____. **NBR 16607:** Cimento Portland - Determinação dos tempos de pega. Rio de Janeiro, 2017b.

_____. **NBR 16697:** Cimento Portland - Requisitos. Rio de Janeiro, 2018c.

_____. **NBR 5751:** Materiais pozolânicos - Determinação da atividade pozolânica com cal aos sete dias. Rio de Janeiro, 2015b.

_____. **NBR 5752:** Materiais pozolânicos - Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias. Rio de Janeiro, 2014b.

_____. **NBR 6136:** Blocos vazados de concreto simples para alvenaria - Requisitos. Rio de Janeiro, 2016a.

_____. **NBR 7211:** Agregados para concreto - Especificação. Rio de Janeiro, 2009d.

_____. **NBR 7215:** Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1997.

_____. **NBR 7809:** Agregado graúdo - Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro. Rio de Janeiro, 2008a.

_____. **NBR 8522:** Concreto - Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão. Rio de Janeiro, 2008b.

_____. **NBR 9917:** Agregados para concreto - Determinação de sais, cloretos e sulfatos solúveis. Rio de Janeiro, 2009c.

_____. **NBR NM 11-2:** Cimento Portland - Análise química - Determinação de óxidos principais por complexometria - Parte 2: Método ABNT. Rio de Janeiro, 2012b.

_____. **NBR NM 15:** Cimento Portland - Análise química - Determinação de resíduo insolúvel. Rio de Janeiro, 2012d.

_____. **NBR NM 16:** Cimento Portland - Análise química - Determinação de anidrido sulfúrico. Rio de Janeiro, 2012c.

_____. **NBR NM 18:** Cimento Portland - Análise química - Determinação da perda ao fogo. Rio de Janeiro, 2012a.

_____. **NBR NM 20:** Cimento Portland e suas matérias primas - Análise química - Determinação de dióxido de carbono por gasometria. Rio de Janeiro, 2012e.

_____. **NBR NM 23:** Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2001a.

_____. **NBR NM 30:** Agregado miúdo - Determinação da absorção de água. Rio de Janeiro, 2001b.

_____. **NBR NM 45:** Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.

_____. **NBR NM 46:** Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 µm, por lavagem. Rio de Janeiro, 2003b.

_____. **NBR NM 51:** Agregado graúdo - Ensaio de abrasão “Los Angeles”. Rio de Janeiro, 2001c.

_____. **NBR NM 52:** Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009a.

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

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

_____. **NBR NM 248:** Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003a.

BESSA, I. S. **Avaliação do processamento digital de imagens como ferramenta para caracterização de agregados e misturas asfálticas.** 2012. 154f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2012.

BILAR, M. M. **Análise do Ciclo de Vida de um Sistema Vertical de Vedação com Adição de Cinza Pesada.** 2016. 197 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.

BRANDÃO, M.C.; RODRIGUES, L. M.; SILVA, S. N. Desenvolvimento de revestimentos contendo adições de cinzas da combustão do carvão mineral geradas em UTE's. *In:* IV Congresso Brasileiro de Carvão Mineral, 2013, Gramado. **Anais.** Disponível em <http://www.portalsatc.com/site/conteudo/cursos/congresso_iv_carvao/pdf/anais_iv_cbcm_ago_2013.pdf>. Acesso em: 20 nov. 2016. p. 211-219.

BRASIL. Lei Federal Nº 4.771. **Código Florestal Brasileiro.** Brasília, 1965.

BROGNI, A. **Obtenção de Cermet por Tecnologia do Pó a partir da Utilização da Cinza Leve Proveniente da Queima do Carvão Mineral em Termoelétrica.** 2013. 84f.

Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

BROWN, M. T. **Caracterização Petrológica e Química dos Carvões utilizados em Usinas Termelétricas Brasileiras e as Cinzas Geradas no processo de Combustão.** 2011. 96f. Dissertação (Mestrado em Geociências) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

CARVALHO, H. D. S. **Análise da Retração por Secagem em Argamassas Autonivelantes Utilizando Adições Minerais Como Substitutos Parciais do Cimento Portland.** 2015. 138 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.

CHEN, C.; HABERT, G.; BOUZIDI, Y.; JULLIEN, A.; VENTURA, A. LCA allocation procedure used as an incitative method for waste recycling: An application to mineral additions in concrete. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 54, p. 1231-1240, 2010.

CHIES, F.; SILVA, N. I.; ZWONOK, O. Desenvolvimento de blocos e tijolos a partir de cinzas de fundo de carvão - CIPECAL. *In: Coletânea Habitare - vol. 4 - Utilização de Resíduos na Construção Habitacional.* Porto Alegre: Habitare, 2003.

CISESKI, T. M. B. **Influência da moagem da cinza pesada obtida da queima em termoeletrica no compósito cinza-20Fe.** 2013. 85 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e dos Materiais) - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

CONTE, R. L. **Alvenaria com blocos à base de cinzas pesadas da queima do carvão mineral: análise de desempenho.** 2014. 99f. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

DE PAULA, T. M. **Misturas de cinza volante e cal de carbureto: comportamento da resistência à compressão simples frente à moagem da cinza volante.** 2016. 192 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

FERNANDES, I. **Blocos e Pavers - Produção e Controle de Qualidade.** 7. ed. Ribeirão Preto: Treino Assessoria e Treinamentos Empresariais Ltda, 2016. 200 p.

FROENER, M. S. **Valorização de Cinza de Fundo por meio da Síntese de Ligantes Geopoliméricos: Otimização de Traços em Pasta e Avaliação dos Sistemas em Argamassas.** 2016. 134 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

IBRAHIM, M. H. W.; HAMZAH, A. F.; JAMALUDDIN, N.; RAMADHANSYAH, P. J.; FADZIL, A. M. Split Tensile Strength on Self-compacting Concrete Containing Coal Bottom Ash. **Procedia - Social and Behavioral Sciences**, v. 195, p. 2280-2289, 2015.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Energy Atlas.** Disponível em <<http://energyatlas.iea.org/?subject=2020991907>>. Acesso em: 8 out. 2016.

ISAIA, G. C. **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais.** 2. ed. São Paulo: IBRACON, 2007.

KIM, H. K.; LEE, H. K. Use of power plant bottom ash as fine and coarse aggregates in high-strength concrete. **Construction and Building Materials**, v. 25, p. 1115-1122, 2011.

KUMAR, B. M. V.; ANANTHAN, H.; BALAJI, K. V. A. Experimental studies on cement stabilized masonry blocks prepared from brick powder, fine recycled concrete aggregate and pozzolanic materials. **Journal of Building Engineering**, v. 10, p. 80-88, 2017.

LACERDA, L. V. **Síntese e caracterização de zeólita tipo sodalita obtida a partir de cinzas volantes de carvão mineral utilizado na usina termoeletrica de Candiota-RS**. 2015. 54 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais) - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

LIU, J.; QIU, Q.; CHEN, X.; WANG, X.; XING, F.; HAN, N.; HE, Y. Degradation of fly ash concrete under the coupled effect of carbonation and chloride aerosol ingress. **Corrosion Science**, v. 112, p. 364-372, 2016.

LIVI, C. N. **Desenvolvimento de pasta de geopolímeros a base de cinza volante e hidróxido de sódio**. 2013. 193 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.

MARTINS, G. J. M. **Caracterização térmica e mineralógica de materiais vitroceramicos obtidos a partir de cinza pesada de carvão mineral**. 2014. 154 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 2. ed. São Paulo: IBRACON, 2008.

MELO, C. P. **Influência de adição e substituição de cinza *in natura* de termelétrica na resistência à compressão do concreto**. 2017. 82 f. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2017.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Plano Nacional de Mineracao 2030. **Destaques do setor de energia**, 2011. Disponível em <http://www.mme.gov.br/documents/10584/1256594/PNM_2030.pdf/83c18ba2-8932-409d-9fc2-ce99acf6ccce>. Acesso em: 11 maio 2017.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. 5. ed. São Paulo: Bookman, 2016.

OLIVEIRA, A. L. **Contribuição para a dosagem e produção de peças de concreto para pavimentação**. 2004. 296f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

PACHECO-TORGAL, F.; JALALI, S. Earth construction: lessons from the past for future eco-efficient construction. **Construction and Building Materials**, v. 29, p. 512-519, 2012.

PARK, S. B.; JANG, Y. I.; LEE, J.; LEE, B. J. An experimental study on the hazard assessment and mechanical properties of porous concrete utilizing coal bottom ash coarse aggregate in Korea. **Journal of Hazardous Materials**, v. 166, p. 348-355, 2009.

PILAR, R. **Avaliação da Atividade Pozolânica da Cinza Pesada Moída em Pastas de Cimento Portland**. 2012. 118f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012.

PUTHIPAD, N.; OUCHI, M.; RATH, S.; ATTACHAIYAWUTH, A. Enhancement in self-compactability and stability in volume of entrained air in self-compacting concrete with high volume fly ash. **Construction and Building Materials**, v. 128, p. 349-360, 2016.

SALDANHA, R. B. **Misturas Cinza Volante e Cal de Carbureto: Comportamento da Resistência à Compressão Simples para Cura Acelerada**. 2014. 170 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

SALUM, P. L. **Efeito da elevação de temperatura sobre a resistência à compressão de concretos massa com diferentes teores de cinza volante**. 2016. 164 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.

SANI, M. S. H. M.; MUFTAH, F.; MUDA, Z. The Properties of Special Concrete Using Washed Bottom Ash (WBA) as Partial Sand Replacement. **International Journal of Sustainable Construction Engineering & Technology**, v. 1, n. 2, p. 65-76, 2010.

SILVA, D. A. A. **Avaliação das propriedades mecânicas e da durabilidade do concreto com cinzas da termoeletrônica do Pecém/CE**. 2017. 115 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2017.

SILVA, M. G. Cimento Portland com adições minerais. In: **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. 1. ed. São Paulo: Geraldo Isaia, 2007. p. 761-793.

SILVA, S. A. **Estudo dos produtos da combustão do carvão mineral e da borra branca de alumínio para aplicação na construção civil**. 2013. 81 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência de Materiais) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2013.

SILVEIRA, J. A. Aproveitamento de cinzas volantes e pesadas para a produção de concretos usinados e de blocos e pavimentos de concreto. **Relatório**. 2001.

SIMČIČ, T.; PEJOVNIK, S.; SCHUTTER, G.; BOKAN, V. B. Chloride ion penetration into fly ash modified concrete during wetting-drying cycles. **Construction and Building Materials**, v. 93, p. 1216-1223, 2015.

SINGH, M.; SIDDIQUE, R. Effect of coal bottom ash as partial replacement of sand on workability and strength properties of concrete. **Journal of Cleaner Production**, v. 112, p. 620-630, 2016.

SIQUEIRA, J. S. **Reciclagem de resíduos a partir da cinza de carvão mineral: Produção de argamassas**. 2011. 91 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal do Pará, Belém, 2011.

TAUIL, C. A. Pequeno histórico da alvenaria estrutural. *In*: FERNANDES, I. **Blocos e Pavers - Produção e Controle de Qualidade**. 7. ed. Ribeirão Preto: Treino Assessoria e Treinamentos Empresariais Ltda, 2016. 200 p.

TAYLOR, H. F. W. **Cement cheimstry**. 2 ed. Londres: Thomas Telford Publishing, 1997.

TEIXEIRA, J. M. C. **Utilização dos produtos da combustão do carvão mineral como aditivos na produção de argamassa para revestimento**. 2013. 97 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência de Materiais) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2013.

VIEIRA, F. M. C. **Gestão dos produtos da queima do carvão em centrais térmicas**. 2012. 70f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores) - Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2012.

WONGKEO, W.; THONGSANITGARN, P.; PIMRAKSA, K.; CHAIPANICH, A. Compressive strength, flexural strength and thermal conductivity of autoclaved concrete block made using bottom ash as cement replacement materials. **Materials & Design**, v. 35, p. 434-439, 2012.

YU, Y.; YU, J.; GE, Y. Water and chloride permeability research on ordinary cement mortar and concrete with compound admixture and fly ash. **Construction and Building Materials**, v. 127, p.556-564, 2016.

ZHAO, Y.; WANG, F. L. Experimental studies on behavior of fully grouted reinforced-concrete masonry shear walls. [Earthquake Engineering and Engineering Vibration](#), v. 14, p. 743-757, 2015.

ZUO, J.; ZHAO, Z-Y. Green building research-current status and future agenda: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 30, p. 271-281, 2014.