



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

RAPHAEL ARLEGO DE ALCÂNTARA SANTANA

**AVALIAÇÃO DO USO DOS SUBPRODUTOS DA DESSULFURIZAÇÃO SEMI-SECA
DOS GASES DA COMBUSTÃO DA TERMELETRICA DO PECÉM COMO INSUMO
PARA A CONSTRUÇÃO CIVIL**

FORTALEZA

2018

RAPHAEL ARLEGO DE ALCÂNTARA SANTANA

AVALIAÇÃO DO USO DOS SUBPRODUTOS DA DESSULFURIZAÇÃO SEMI-SECA
DOS GASES DA COMBUSTÃO DA TERMELÉTRICA DO PECÉM COMO INSUMO
PARA A CONSTRUÇÃO CIVIL

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. Antônio Eduardo Bezerra Cabral.

FORTALEZA

2018

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

- S223a Santana, Raphael Arlego de Alcântara.
Avaliação do uso dos subprodutos da dessulfurização semi-seca dos gases da combustão da termelétrica do Pecém como insumo para a construção civil / Raphael Arlego de Alcântara Santana. – 2018.
120 f. : il. color.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Estruturas e Construção Civil, Fortaleza, 2018.
Orientação: Prof. Dr. Antônio Eduardo Bezerra Cabral.
1. Construção civil. 2. Resíduos de termelétrica. 3. Cinza volante. 4. Flue gas desulphurization (FGD). 5. Spray dryer ash (SDA). I. Título.

CDD 624.1

RAPHAEL ARLEGO DE ALCÂNTARA SANTANA

AVALIAÇÃO DO USO DOS SUBPRODUTOS DA DESSULFURIZAÇÃO SEMI-SECA
DOS GASES DA COMBUSTÃO DA TERMELÉTRICA DO PECÉM COMO INSUMO
PARA A CONSTRUÇÃO CIVIL

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: 19/11/2018.

BANCA EXAMINADORA

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

Prof. Dr. Lucas Feitosa de Albuquerque Lima Babadopulos
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof.^a. Dr.^a Denise Carpena Coitinho Dal Molin
Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)

AGRADECIMENTOS

À minha família, por todo o incentivo, especialmente aos meus pais, Edmar e Sandra, por terem moldado, ao longo de todos esses anos, a pessoa que sou hoje.

À Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico (Funcap), pelo apoio financeiro com a manutenção da bolsa de auxílio.

À Energia Pecém, pela visita cedida para conhecimento do processo produtivo e ao Convênio N° 01/2017 entre a EDP e a UFC, com a interveniência da FUNDAÇÃO ASTEF, pelo financiamento da pesquisa e pelo fornecimento do material em estudo.

Ao Prof. Dr. Antônio Eduardo Bezerra Cabral, pela orientação.

Aos professores participantes da banca examinadora Prof. Dr. Lucas Feitosa de Albuquerque Lima Babadopulos e Prof.^a. Dr.^a Denise Carpena Coitinho Dal Molin pelo tempo e pelas colaborações e sugestões fornecidas.

Aos colegas da turma de mestrado, pelas críticas e sugestões recebidas neste trabalho, além do companheirismo, sempre presente durante todo o curso. Um agradecimento especial aos colegas Davi, Lílian e Ada, pela ajuda na parte braçal laboratorial.

À Central Analítica-UFC / CT-INFRA / MCTI-SISNANO / Pró-Equipamentos CAPES, por realizar o MEV da SDA em estudo.

Ao Laboratório de Raios X da UFC e ao CNPq (Processo: 402561/2007-4), Edital MCT/CNPq n° 10/2007, por ter feito a análise de FRX e DRX da SDA.

Ao Labosan (UFC), por realizar os ensaios de lixiviação e solubilização do resíduo em estudo e à Apodi, por realizar os ensaios de granulometria a laser.

Ao NUTEC, por emprestar as células de cargas para a realização dos ensaios de reologia nas argamassas.

Aos funcionários do laboratório de materiais de construção civil da UFC, Moisés e Manoel, por ajudar sempre que requisitados. Ao técnico Helano, por toda a ajuda durante os ensaios, desde o recebimento dos materiais até a aquisição dos dados, e por aguentar meus picos de estresse no laboratório quando os ensaios tinham que ser refeitos. E ao técnico Maurício, por me auxiliar na montagem e operação dos equipamentos necessários.

“O sucesso nasce do querer, da determinação e persistência em se chegar a um objetivo. Mesmo não atingindo o alvo, quem busca e vence obstáculos, no mínimo fará coisas admiráveis. ” (José de Alencar).

“Ao vencer sem obstáculos se triunfa sem glória. ” (Pierre Corneille).

RESUMO

Usinas termelétricas contribuem para diminuir a forte dependência nacional das hidrelétricas, permitindo a melhora da qualidade da distribuição de energia e a independência com relação à distância entre a fonte geradora e os centros urbanos. No entanto, os gases do efeito estufa que tais usinas podem liberar, além de variados resíduos sólidos que podem comprometer fontes subterrâneas e superficiais de água, motivam diversas pesquisas científicas, especialmente sua aplicação em concreto e argamassa, que são dois insumos muito usados na construção civil. Estudos anteriores indicam que alguns desses resíduos sólidos melhoram as propriedades mecânicas e aspectos de durabilidade desses compósitos cimentícios, sendo uma possível alternativa para uma diminuição do passivo ambiental e contribuição para um desenvolvimento mais sustentável. Na usina termelétrica Pecém I (UTE Pecém I), ao contrário do que é feito na maioria das usinas da China e da Europa, onde há uma pré-coleta das cinzas volantes, permitindo sua separação dos resíduos sulfurosos, o sistema de dessulfurização dos gases da combustão (FGD) semi-seca foi instalado antes dos coletores de cinzas, à semelhança das usinas dos Estados Unidos, gerando um resíduo chamado de *Spray Dryer Ash* (SDA). Este trabalho visa avaliar o uso, dentro da construção civil, da SDA da UTE Pecém I. Para isso, a SDA da usina em questão foi caracterizada física e quimicamente e classificada ambientalmente segundo a ABNT NBR 10004:2004. Em seguida, foi avaliado o uso desse resíduo como adição mineral em concretos ao fazer traços de f_{ck} de 25 MPa com 0% (referência), 5%, 10% e 20% de SDA com relação à massa de cimento, realizando ensaios físicos, químicos e mecânicos em corpos de prova dos concretos produzidos. Por fim, foi avaliado o uso da SDA como substituição da cal em argamassas mistas de revestimento externo ao fazer um traço de referência (0% de SDA) e com substituições de 33%, 67% e 100%, em volume. Foram feitos ensaios no estado fresco, uma análise reológica pelo método do *squeeze-flow*, e ensaios no estado endurecido. Os resultados mostraram que a SDA da UTE Pecém I é um resíduo não perigoso e não inerte (classe II-A), que não pode ser classificado como pozolana classe C, dentre outros motivos, por apresentar elevado teor de enxofre. As resistências mecânicas dos traços de concreto, ou não sofreram influência ou aumentaram com o aumento do teor de SDA. O mesmo ocorreu com as resistências dos traços de argamassa com SDA. Um destaque pode ser dado para o traço de argamassa com 67% de SDA, que apresentou resistências superiores aos demais, um aumento do módulo de elasticidade e da absorção de água por capilaridade, bem como uma diminuição do teor de ar incorporado. Conclui-se que o uso da SDA como adição mineral em concreto, conforme os ensaios realizados, não possui restrição técnica. Em argamassas é possível fazer a substituição de cal por SDA, mas com ressalvas, pois algumas das propriedades tendem a piorar com o aumento do teor de SDA, tendo que ser controladas para não terem efeitos deletérios ao ser usado na construção civil.

Palavras-chave: Construção civil. Resíduos de termelétrica. Cinza volante. *Flue gas desulphurization* (FGD). *Spray dryer ash* (SDA).

ABSTRACT

Thermoelectric power plants contribute to reduce the strong national dependence on hydroelectric power dams, allowing the improvement of quality of energy distribution and the independence with respect to distance between generating source and urban centers. However, greenhouse gases that such plants release, as well as various solid wastes that may compromise underground and surface water sources, motivate several scientific research works, especially its application in concrete and mortar, which are two major materials used in civil construction. Previous works indicate that some of these solid wastes improve the mechanical properties and aspects of durability of these cementitious composites, being a possible alternative for a reduction of environmental liabilities and contributing to a more sustainable development. In Pecém I thermoelectric power plant (UTE Pecém I), contrarily to what is done in most of the plants in China and Europe, where there is a pre-collector of fly ash, allowing its separation from sulfurous residues, the flue gas desulphurization system (FGD) was installed before the ash collectors, similarly to United States plants, generating a residue called Spray Dryer Ash (SDA). The objective of this work is to evaluate, within civil construction, the use of SDA from UTE Pecém I. For this, the SDA of the plant in question was physically and chemically characterized and was classified according to ABNT NBR 10004: 2004. Then, the use of this waste as a mineral addition in concretes was evaluated by preparing mixtures with fck of 25 MPa with 0% (reference), 5%, 10% and 20% SDA relative to the cement mass, performing physical, chemical and mechanical properties characterization. Finally, the use of SDA was evaluated as a substitution of lime in external rendering mortars when making a reference mixture (0% SDA) and with substitutions of 33%, 67% and 100%, by volume. Fresh state tests, rheological analysis by squeeze-flow method, and hardened state tests were performed. The results showed that the SDA from UTE Pecém I is a non-hazardous non-inert waste (class II-A), which cannot be classified as class C pozzolan, among other reasons, because it has a high sulfur content. The mechanical strengths of the concrete mixtures were either not influenced or increased with increasing SDA content. The same occurred with the resistance of the mixtures of mortar with SDA. A highlight can be given to the mortar mixtures with 67% SDA, which presented superior resistance to the others, increased elasticity modulus and water absorption by capillarity, as well as a reduction of the entrained air content. It is concluded that the use of SDA as a mineral addition in concrete, according to the tests performed, has no technical restriction. In mortars it is possible to replace lime by SDA, but with caveats, since some of the properties tend to worsen with increase in the content of SDA, having to be controlled not to have deleterious effects when being used in civil construction.

Keywords: Civil construction. Thermoelectric wastes. Fly ash. Flue gas desulphurization (FGD). Spray dryer ash (SDA).

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
1.1	Justificativa	11
1.2	Objetivos	14
1.2.1	Objetivo Geral.....	14
1.2.2	Objetivos Específicos.....	14
1.3	Estrutura da dissertação	14
1.4	Limitantes da pesquisa	14
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1	Funcionamento de uma termelétrica	15
2.1.1	Processos de FGD	16
2.1.2	Resíduos de uma termelétrica	20
2.1.3	Aproveitamento dos resíduos de uma termelétrica	22
2.2	<i>Spray Dryer Ash (SDA)</i>	24
2.2.1	Definição e propriedades	24
2.2.2	Utilização da SDA	26
2.2.3	Restrições quanto ao uso da SDA na construção civil.....	33
2.2.4	Preocupações ambientais	35
2.3	A influência da SDA no concreto	36
2.4	A influência da SDA na argamassa	37
3	MATERIAIS E MÉTODO	40
3.1	Materiais	41
3.2	Método de pesquisa	45
3.2.1	Caracterização física e química da SDA.....	45
3.2.2	Avaliação da SDA como adição mineral em concreto	47
3.2.3	Avaliação da SDA como substituição da cal em argamassa	50
3.3	Método de análise dos resultados	58
4	APRESENTAÇÃO, ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	60
4.1	Caracterização física e química da SDA	60
4.2	Resultados da avaliação da SDA como adição mineral em concreto	64
4.2.1	Análise dos resultados de resistência à compressão	64
4.2.2	Resistividade elétrica superficial	66
4.2.3	Velocidade de propagação de onda ultrassônica.....	67

4.2.4	Absorção de água	68
4.2.5	Índice de vazios e massa específica	69
4.2.6	Expansão por sulfato	70
4.3	Resultados da avaliação da SDA como substituição da cal e m argamassa.....	71
4.3.1	Resultados no estado fresco	71
4.3.2	Resultados no estado endurecido	74
4.3.3	Resultados dos ensaios de durabilidade	80
4.4	Resumo dos resultados.....	84
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	86
5.1	Conclusões.....	86
5.2	Sugestões de trabalhos futuros.....	88
	REFERÊNCIAS	89
	APÊNDICE A – ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS	102
	APÊNDICE B – DADOS BRUTOS DOS ENSAIOS REALIZADOS	111
	ANEXO A – TERMOS USADOS NA LITERATURA PARA REPRESENTAR A SDA	120

1 INTRODUÇÃO

O Brasil possui uma matriz energética predominantemente hidrotérmica, uma vez que, segundo dados do Banco de Informações de Geração (BIG), da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2017), a energia oriunda de hidrelétricas representa cerca de 60% do total gerado, enquanto que a energia termelétrica tem sua participação na matriz elétrica nacional correspondente a cerca de 30%, dos quais em torno de 2% são obtidos pela queima de carvão mineral. Já no Ceará, a representação das termelétricas na matriz energética é de 56,5%, seguida pela energia eólica, com 43,4%. Com bem menos de 1%, as energias solar e hídrica são praticamente irrelevantes para geração de energia elétrica no estado (ANEEL, 2017).

Uma usina termelétrica (UTE) é uma instalação industrial que tem como função a geração de energia elétrica por intermédio da movimentação de uma turbina pela passagem de vapor d'água gerado nas tubulações da caldeira pela energia liberada do calor de combustão, que pode fazer uso de combustíveis renováveis ou não renováveis, sendo seu funcionamento semelhante, independentemente do combustível utilizado (ROSSI et al., 2013). As usinas termelétricas contribuem para diminuir a forte dependência nacional das hidrelétricas. Com seu uso, é possível reduzir o risco de racionamento de energia quando houver escassez de água e diminuir as perdas da transmissão, uma vez que podem ser construídas mais próximas aos grandes centros urbanos, melhorando a qualidade do fornecimento de energia (TERMOPE, 2016).

No entanto, Santos (2014) chama atenção para a mudança climática e para o aquecimento global que os gases de efeito estufa liberados pela queima do carvão mineral podem provocar. Levandowski e Kalkreuth (2009) alertam para o fato de que as cinzas geradas por esse tipo de usina termelétrica são um dos resíduos sólidos mais significativos do Brasil. Embora haja uso desses resíduos como matéria-prima industrial, Leandro (2005) afirma que esse uso tem sido bem menor que sua produção, ficando o excedente depositado a céu aberto em grandes bacias de sedimentação, que têm altos custos de implantação. Somado a isso, a disposição inadequada das cinzas geradas, bem como a de outros resíduos, pode contaminar fontes subterrâneas e superficiais de água, contribuindo para a destruição do habitat aquático, tornando mais difícil e custosa a recuperação dessas áreas (FUNGARO e IZIDORO, 2006).

A fim de tentar mitigar os efeitos desse passivo ambiental, com relação aos gases emitidos ao final do processo, são dispostos sistemas de dessulfurização dos gases da

combustão (*flue gas desulphurization* – FGD) nas plantas das usinas termelétricas, pois, segundo Stamm (2003), esses gases contêm muito enxofre e causam problemas ambientais. Esses sistemas são divididos em três categorias, a depender da técnica usada, para remover os gases sulfurosos, que são a seca, a semi-seca e a úmida. Na seca, um absorvente sólido é adicionado dentro da própria câmara de combustão, o que diminui a eficiência da remoção. Na semi-seca, uma solução aquosa é atomizada em um vaso de absorção instalado na linha dos gases de combustão. Já na úmida, o fluxo gasoso passa por um absorvente líquido, que pode coletar gases e/ou partículas, a depender de como foi projetado (CASTELLAN, CHAZAN, D'ÁVILA, 2003). Cada sistema gera resíduos específicos.

Já com relação à destinação das cinzas das termelétricas, há, entre outros, estudos como os de Leandro (2005), que busca aplicar as cinzas em pavimentos; como os de Fungaro e Izidoro (2006), que procuraram fabricar zeólitas para remoção de íons da água a partir das cinzas; ou como os de Chousidis et al. (2016), que verificam como concretos feitos com adições de cinzas leves se comportam quanto à corrosão das armaduras, à resistência à compressão e à difusão térmica. Mas, segundo Thomas (2007), desde 1914, com o estudo de Anon¹, o potencial das cinzas como suplemento cimentício já é explorado, sendo usado em concreto desde o estudo de Davis et al. (1937)².

Utilizando as cinzas da usina termelétrica do Pecém, fruto dos projetos de pesquisa “Caracterização das Cinzas da Combustão do Carvão Mineral e Avaliação da sua Aplicabilidade na Construção Civil e na Indústria Cerâmica” e “Utilização da Cinza de Carvão Mineral na Construção Civil, Pavimentação, e Aplicações Geotécnicas e Ambientais”, sendo realizados pela Universidade Federal do Ceará (UFC), no âmbito da cooperação entre a ENEVA, a Energia Pecém e a UFC, pode-se citar os estudos de Teixeira (2013), Araújo (2016), Silva (2017) e Sampaio (2017), que avaliaram seu comportamento no concreto e argamassa, além do trabalho de Cirino (2016), que aplicou as cinzas em pastas para cimentação de poços de petróleo. Pinheiro (2010) fez uso das cinzas do Pecém para produção de materiais cerâmicos, enquanto Xavier (2016) as utilizou em misturas asfálticas e Barros (2015), em camadas granulares de pavimentos.

O presente trabalho dá continuidade a esses estudos, desta vez com a cooperação entre a Energias de Portugal (EDP), a Energia Pecém e a UFC, por meio do Termo de Cooperação N° 01/2017, intervindo pela FUNDAÇÃO ASTEF, sendo inserido na pesquisa

¹ Anon. An Investigation of the Pozzolanic Nature of Coal Ashes. *Engineering News*, v. 71, n. 24, 1914, p. 1334-1335.

² Davis, R.E., Carlson, R.W., Kelly, J.W. and Davis, H.E. Properties of Cements and Concretes Containing Fly Ash. *Journal of the American Concrete Institute*, v. 33, 1937, p. 577-611.

intitulada “Caracterização do Carvão Mineral e suas Cinzas de Combustão, com Aplicações na Construção Civil e na Pavimentação”.

1.1 Justificativa

No município de São Gonçalo do Amarante (CE), situadas no Complexo Industrial e Portuário do Pecém (CIPP), estão a UTE Pecém I, composta por duas usinas com capacidade instalada de 360 MW cada, e a UTE Pecém II, com 365 MW. Juntas, portanto, formam a Energia Pecém, com uma capacidade instalada total de 1085 MW (ENEVA, 2016; EDP, 2017). A Figura 1 mostra a visão geral do complexo.

Figura 1 – Visão geral da UTE do Pecém



a) Pátio de Carvão Bruto; b) UTE Pecém II; c) UTE Pecém I; d) Setor administrativo; e) Pátios de cinzas.

Fonte: Google Earth (2017).

Depois que o carvão importado chega ao Porto do Pecém, é transportado por meio de doze quilômetros de esteiras até o pátio de carvão (item (a) da Figura 1). Em seguida, é levado para as usinas (itens (b) e (c) da Figura 1), onde serão pulverizados nos moinhos e levados por meio das tubulações para as caldeiras. Vapor d’água é produzido nas tubulações com a queima do carvão, e movimenta uma turbina para gerar energia elétrica. Os resíduos sólidos da queima mais grosseiros são coletados na parte de baixo da caldeira e armazenados nos pátios de cinzas (item (e) da Figura 1), enquanto que os resíduos sólidos mais leves são levados juntamente com os gases da combustão para um sistema de dessulfurização e

posteriormente para um filtro tipo manga, sendo inicialmente armazenados em silos para depois serem dispostos nos pátios de cinzas. Apenas parte desses resíduos consegue ser vendido, por motivos técnico-econômicos, para ser aproveitado, por exemplo, em concreteiras e fábricas de cimento. O restante é armazenado nos três pátios de cinza disponíveis, estando o primeiro (item (e1) da Figura 1) já com cinzas até a sua capacidade máxima, contendo uma mistura de todas as cinzas produzidas no início da operação das usinas. No segundo (item (e2) da Figura 1), atualmente em uso, é feita uma divisão em setores para que cada tipo de resíduo sólido seja armazenado separadamente. O terceiro (item (e3) da Figura 1) ainda não está sendo utilizado (informação verbal)³.

Conforme a EDP (2017), a UTE Pecém I, além do financiamento pelo Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES), possui um financiamento do Banco Interamericano de Desenvolvimento (BID). Por essa razão, a usina em questão teve que atender a padrões internacionais de emissões, os quais são mais exigentes que os brasileiros. Portanto, para atender as maiores exigências, a usina faz uso de um sistema de dessulfurização semi-seco dos gases de exaustão oriundos da combustão do carvão mineral pulverizado, que retira deles o dióxido de enxofre – SO_2 – (ENEVA, 2016). Segundo Rigotto (2009), o SO_2 contribui para geração de chuvas ácidas.

No processo de remoção, usa-se, em torres de absorção, o leite de cal, que é uma espécie de lama de cal hidratada – $\text{Ca}(\text{OH})_2$ – com água, fazendo uso de atomizadores ou bicos de pulverização. Os gases, ao entrarem em contato com essas gotículas finamente divididas, são adsorvidos e reagem para a formação de sais sólidos, uma vez que a temperatura dos gases é suficiente para fazer a água restante evaporar, sendo liberada pela torre juntamente com o restante dos gases livres de óxidos de enxofre.

Esses sais sólidos gerados são sulfitos de cálcio (CaSO_3), que podem ser forçados a se oxidar em presença de água para formar o sulfato de cálcio hidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$), que é um dos componentes do gesso comercial, fazendo com que seu aproveitamento para fins comerciais na construção civil possa vir a compensar parte dos custos com a manutenção da termelétrica. Disney e Vinson (2005) já mostraram que é possível, por meio da técnica de oxidação forçada, converter os resíduos de uma dessulfurização semi-seca em um produto similar ao gesso comercial.

Zaremba et al. (2008) comentam que os subprodutos de uma dessulfurização do tipo úmida⁴ já possuem uma demanda no mercado e podem substituir gradualmente o gesso natural. No entanto, os subprodutos do método semi-seco (que é, depois do úmido, o método

³ Informações fornecidas em abril de 2017 por Guilherme Lacerda Batista de Oliveira, engenheiro mecânico responsável pela operação das usinas da UTE Pecém I.

⁴ Os subprodutos estão mais detalhadamente especificados na Tabela 2, página 20.

mais usado em termelétricas por ser mais barato, demandar menos espaço e gastar menos água) ainda não são utilizados, tendo que ser estocados, o que não é uma solução das mais ecologicamente corretas. Segundo os autores, as propriedades desse resíduo mostram indícios de que podem ser utilizados da construção civil.

No entanto, na UTE Pecém I, o sistema de dessulfurização foi instalado antes dos filtros para coleta de cinzas, gerando um resíduo que é uma mistura de cinzas volantes com os sais sólidos resultantes da dessulfurização. Esse subproduto resultante, segundo o EPRI (2007), é comumente chamado de *Spray Dryer Ash (SDA)*, *dry FGD material*, ou quaisquer dos termos contidos no ANEXO A, ainda sem tradução para o português. Essa cinza possui um valor comercial bastante baixo, gerando um acúmulo excessivo desse material nos pátios da UTE do Pecém e, posteriormente, nos aterros industriais. O sistema de dessulfurização dos gases da combustão (FGD), a depender da qualidade do carvão usado, pode não ser utilizado, gerando apenas cinzas volantes comerciais. No entanto, se houver qualquer mudança nas emissões de gases sulfurosos, que podem ser medidos graças ao centro de controle da UTE, de forma que exceda os padrões normativos, o sistema de FGD será acionado, aumentando ainda mais a quantidade de SDA, resíduo em questão (informação verbal)⁵.

Uma possível alternativa para uma diminuição do passivo ambiental e contribuição para um desenvolvimento mais sustentável é o uso de resíduos e subprodutos industriais na construção civil (BETAT; PEREIRA; VERNEY, 2009). Concreto e argamassa são dois materiais comumente usados no setor.

Mesmo com pouco tempo após sua invenção, o concreto ganhou destaque como principal material de construção, sendo o mais fabricado pelo homem e o segundo mais consumido, com cerca de duas toneladas por habitante por ano, ficando atrás apenas do consumo de água (PEDROSO, 2009; REBMANN, 2011). No Brasil, é comum o uso de paredes de alvenaria revestidas com argamassa, tanto como vedação interna como externa em edifícios, o que implica um elevado consumo deste insumo (SANTOS, 2008).

Estudos anteriores, inserindo cinzas da UTE do Pecém em traços de concretos (ARAÚJO, 2016; SILVA, 2017) e argamassas (SAMPAIO, 2017), mostraram resultados satisfatórios tanto nas propriedades mecânicas quanto nos aspectos de durabilidade. Dessa forma, puderam ser desenvolvidos materiais com melhores desempenhos e que contribuem para a preservação do meio ambiente. No entanto, não foram desenvolvidas muitas pesquisas com a SDA da UTE Pecém I. Então, haja vista o que foi exposto, nota-se a importância do desenvolvimento de estudos para aproveitamento dos resíduos gerados na FGD da termelétrica do Pecém para diversas aplicações na construção civil.

⁵ Informações fornecidas em abril de 2017 por Guilherme Lacerda Batista de Oliveira, engenheiro mecânico responsável pela operação das usinas da UTE Pecém I.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é avaliar a viabilidade da utilização do subproduto da dessulfurização dos gases resultantes da combustão (FGD) da usina termelétrica Pecém I, executada pelo método semi-seco (SDA), como insumo para a construção civil.

1.2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos gerais deste trabalho são:

- a) caracterizar física e quimicamente a *Spray Dryer Ash* (SDA) oriunda da dessulfurização semi-seca dos gases da combustão da UTE Pecém I;
- b) avaliar o uso do concreto com *Spray Dryer Ash* (SDA) como adição mineral;
- c) avaliar o uso de argamassas para revestimento externo com *Spray Dryer Ash* (SDA) como substituição da cal.

1.3 Estrutura da dissertação

O presente trabalho está dividido em cinco capítulos. O capítulo 1 contém a introdução do trabalho, onde é feita a contextualização do problema, sua justificativa, juntamente com seus objetivos, sendo finalizada com a estrutura e as limitações da pesquisa. No capítulo 2 é apresentada uma revisão da bibliografia sobre o funcionamento das termelétricas e seus resíduos. É dada uma ênfase no resíduo chamado *spray dryer ash* (SDA), onde são exploradas suas aplicações, principalmente em concreto e argamassa. No capítulo 3 são apresentados os materiais e o método de pesquisa. Um fluxograma abre o capítulo, permitindo uma rápida visualização de todo o processo. No capítulo 4 os resultados são apresentados, analisados e discutidos. Já no capítulo 5 constam as conclusões resultantes da pesquisa, bem como sugestões para trabalhos futuros. Por fim, são apresentadas as referências bibliográficas citadas no trabalho, além de anexos e apêndices com informações que não puderam ser colocadas no corpo do texto do trabalho.

1.4 Limitantes da pesquisa

A pesquisa apresentou um limitante importante quanto ao quesito representatividade da amostra de SDA coletada. Todo o trabalho foi realizado com o material coletado uma única vez na UTE Pecém I. Não há garantias de que o resíduo gerado sempre apresentará as mesmas propriedades, sendo necessário um estudo posterior para verificar a relevância da variabilidade das características dos resíduos ao longo do tempo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

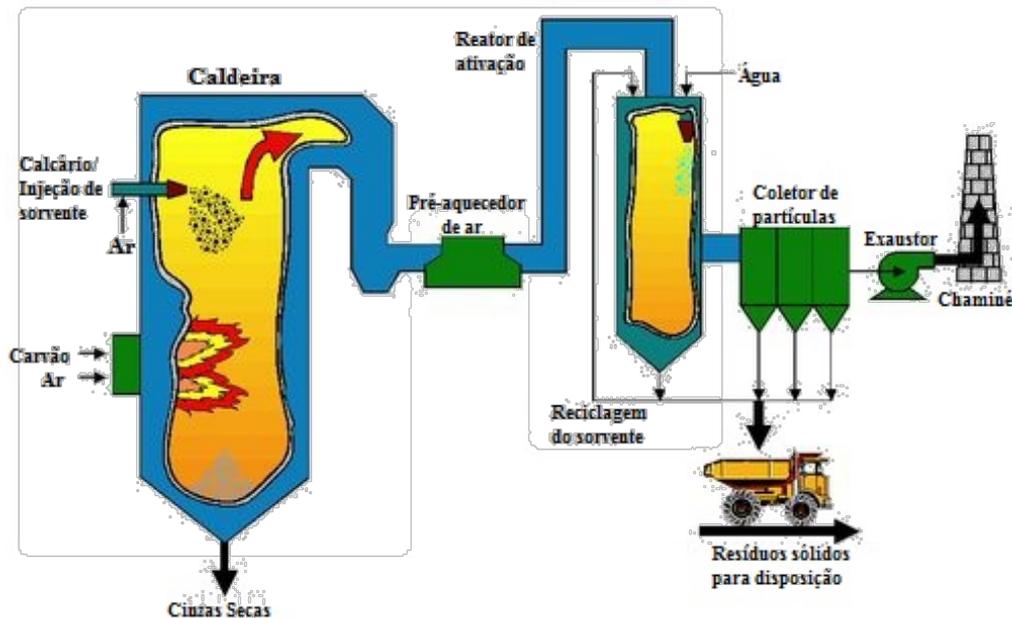
2.1 Funcionamento de uma termelétrica

Independentemente do combustível usado, o funcionamento de uma termelétrica é semelhante. O combustível é enviado dos parques ou depósitos adjacentes até a usina para ser queimado na caldeira. Essa queima gera vapor a partir da água que circula pelas tubulações que revestem as paredes da caldeira. Tal vapor é o que movimenta as pás de uma turbina, cujo rotor gira em conjunto com um gerador que produz a energia elétrica. Em seguida, o vapor passa por um condensador para voltar ao estado líquido e retornar para ser reaproveitado nas tubulações da caldeira, iniciando um novo ciclo. O calor durante a condensação é liberado para a atmosfera em grandes e características estruturas chamadas torres de refrigeração. Uma chaminé de grande altura e alguns precipitadores são usados nas centrais termelétricas para mitigar os efeitos contaminantes da combustão. Por fim, a energia gerada é levada por meio de cabos ou barras condutoras do terminal do gerador para um transformador elevador, para que a tensão seja elevada e permita uma adequada condução pelas linhas de transmissão até a subestação mais próxima dos centros urbanos, onde a tensão é novamente abaixada para que possa ser distribuída aos consumidores finais (ROSSI et al., 2013). A Figura 2 ilustra esquematicamente o funcionamento de uma usina termelétrica que usa o carvão mineral como combustível.

Stamm (2003) comenta que, após a combustão, os gases a serem liberados na atmosfera estão repletos de enxofre. Quando as emissões desse elemento ultrapassam os níveis tolerados pela legislação ambiental, um sistema de dessulfurização desses gases (FGD) deve ser instalado. No entanto, outras alternativas para a retirada do enxofre devem ser exploradas antes da decisão da instalação desse tipo de sistema, pois é muito oneroso e pode inviabilizar a implantação de uma usina.



Figura 3 - Esquema de FGD seco.



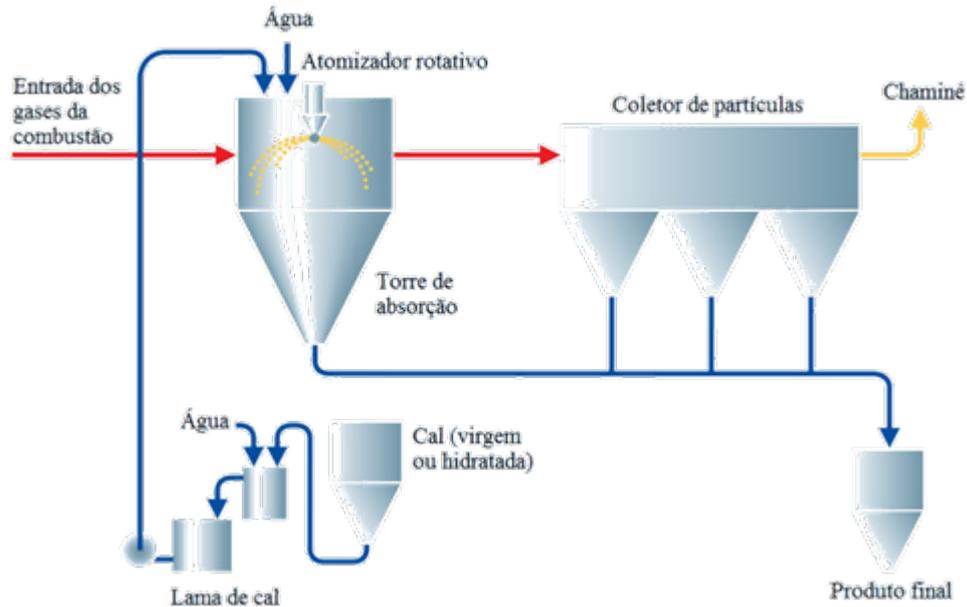
Fonte: Adaptado de Thurlow (2012)

No sistema semi-seco (Figura 4), os gases da combustão são introduzidos em torres absorventes, onde entram em contato com uma lama alcalina finamente atomizada, normalmente composta por sorvente⁶ com base no cálcio como cal hidratada ou cal virgem. Os gases ácidos são adsorvidos pelas gotículas da lama alcalina e reagem para formar sais sólidos. O próprio calor dos gases de combustão é responsável pela evaporação das gotículas de água, fazendo com que um gás não saturado, ou seja, seco, deixe a torre de absorção. O fato de umidificar e resfriar a corrente de gases quentes faz com que a eficiência da remoção dos gases ácidos seja maior do que a simples injeção seca do processo supracitado. As reações fundamentais envolvidas no processo semi-seco com leite de cal ocorrem segundo as equações (4) e (5), que ocorrem na torre de absorção (Figura 4).

⁶ Sorventes são materiais sólidos que, à semelhança dos solventes, que são líquidos, são usadas para fazer extrações de substâncias, mas que usam o princípio da adsorção ou absorção em vez da dissolução (DUTRA, 2014).



Figura 4 - Esquema de FGD semi-seco.



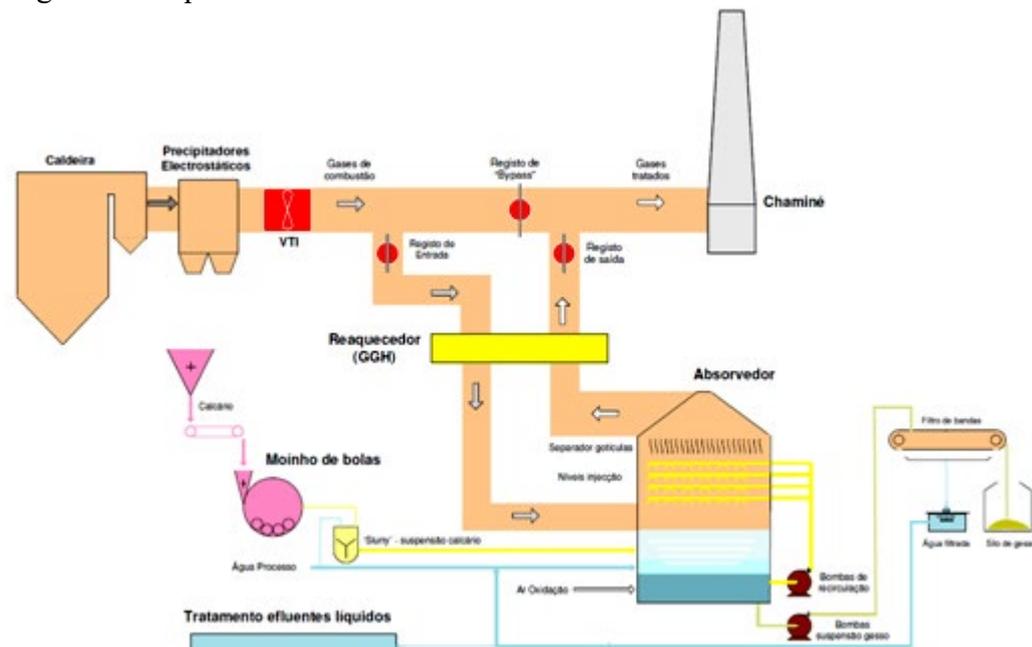
Fonte: Adaptado de GEA (2017)

No sistema úmido (Figura 5), os gases contendo enxofre são postos em contato com um líquido de purificação. As reações parciais de absorção e oxidação do dióxido de enxofre em um sistema úmido com calcário podem ser representadas pelas equações (6), (7) e (8).



O sistema deve ser projetado de acordo com as condições do processo industrial e da natureza dos poluentes aéreos envolvidos. Tais sistemas podem ser concebidos para a remoção de partículas e/ou de gases poluentes pela captura das partículas em pequenas gotas do líquido de purificação ou pela dissolução dos gases poluentes dentro do líquido (HAMON, 2018; CASTELLAN; CHAZAN; D'ÁVILA, 2003).

Figura 5 - Esquema de FGD úmido.



Fonte: EDP (2006)

Castellan, Chazan e D'Ávila (2003) ainda dissertam sobre a existência de outros dois tipos de sistemas menos comuns, que são o sistema combinado, onde se removem concomitantemente gases sulfurosos e os óxidos de nitrogênio, mas não são indicados no Brasil, onde a maioria dos carvões usados nacionalmente têm baixo poder calorífico, acarretando em produções diminutas de óxidos de nitrogênio, não valendo o investimento da remoção simultânea; e os sistemas regeneráveis, que têm elevados custos e são mais adequados para locais de alta densidade demográfica, onde é inviável a circulação de grandes quantidades de matéria-prima, locais com alta demanda para os produtos secundários ou locais onde os custos com a disposição dos resíduos é tão alto que inviabiliza outros sistemas.

A Tabela 1 apresenta as características típicas dos sistemas de dessulfurização. A Tabela 2 apresenta a classificação desses sistemas, juntamente com os subprodutos gerados por cada sistema.

Tabela 1 - Características típicas dos sistemas de dessulfurização

Características	Sistema			
	Úmido	Semi-Seco	Seco	Regenerável
Eficiência de remoção de SO _x (%)	90-98	75-90	50-60*	85-98
Investimento (US\$/KWe**)	150-280	140-190	60-120*	190-380
Consumo de E. Elétrica (%)	1-3	0,5-1	<0,5	<5
Subproduto Vendável	Elevado	Baixo	Baixo	Elevado
Espaço para Instalação	Alto	Moderado	Baixo	Alto
Consumo de Absorvente	Baixo	Moderado	Alto	Muito baixo

(*) Processo Híbrido e de Leito Fluidizado Circulante apresentam eficiências de até 75% e 90%, respectivamente.

(**) Kilowatt-electric (kWe): mil watts de capacidade elétrica produzida

Fonte: Adaptado de Castellan, Chazan e D'Ávila (2003).

Tabela 2 - Classificação dos sistemas de dessulfurização

Processo	Material Absorvente	Subproduto
ÚMIDO		
Cal/Calcário	CaCO ₃ (calcário)/Ca(OH) ₂ , CaO (cal)	CaSO ₄ ·2H ₂ O (gesso) ou CaSO ₃ / CaSO ₄
Sódio	Na ₂ CO ₃ (soda barrilha) , NaOH	Na ₂ SO ₃
Água do mar	Água do mar + Ca(OH) ₂	Retorno ao mar
Amônia	NH ₃ (amônia)	(NH ₄) ₂ SO ₄
Duplo álcali	Na ₂ CO ₃ + CaCO ₃ (ou CaO)	Gesso, CaSO ₃ / CaSO ₄
SEMI-SECO	Ca(OH) ₂ (lama de cal)	CaSO ₃ / CaSO ₄
SECO		
Injeção na fornalha	CaCO ₃ , Ca(OH) ₂ , CaCO ₃ .MgCO ₃	CaSO ₃ / CaSO ₄
Injeção na linha de gás	Ca(OH) ₂ , CaO	CaSO ₃ / CaSO ₄
Híbrido	CaCO ₃ , Ca(OH) ₂	CaSO ₃ / CaSO ₄
Leito fluidizado	Ca(OH) ₂	CaSO ₃ / CaSO ₄
REGENERÁVEL	Na ₂ SO ₃ / MgO / Aminas	SO ₂ , S , H ₂ SO ₄
COMBINADO		
NO _x /SO _x	NH ₃	(NH ₄) ₂ SO ₄ , NH ₄ NO ₃

Fonte: Adaptado de Castellan, Chazan e D'Ávila (2003).

2.1.2 Resíduos de uma termelétrica

Segundo Rigotto (2009), a carga poluidora de uma usina hidrelétrica está associada às emissões de contaminantes atmosféricos, aos efluentes líquidos e aos resíduos sólidos. Stamm (2003) também inclui o ruído como fonte poluidora. Ainda segundo a primeira autora, os resíduos sólidos da produção de energia elétrica pela queima de carvão mineral podem conter elementos metálicos tóxicos, que têm a possibilidade de serem absorvidos pela vegetação ou drenados para lençóis aquíferos ou rios, podendo atingir comunidades.

Conforme mostrado anteriormente, as matérias primas para o processo de obtenção de energia elétrica a partir de uma usina termelétrica a carvão são basicamente o combustível (no caso, o carvão), o ar, a água e alguns produtos químicos. Esse processo gera um produto, a energia elétrica e alguns subprodutos que podem agredir o meio ambiente (as cinzas, por exemplo). A Figura 2, mostrada no item 2.1, apresenta um esquema de uma usina com os locais onde cada subproduto é gerado.

Os tipos de resíduos variam conforme a tecnologia usada na combustão (a saber, em leito fixo, em suspensão ou em leito fluidizado), a composição química e o tipo do carvão utilizado, dos equipamentos presentes na usina, entre outros. A grande heterogeneidade do combustível torna a previsão dos produtos finais extremamente complicada. Antes mesmo do

processamento na usina termelétrica, grandes impactos ambientais já foram causados pelas minas de carvão, que afetam predominantemente os recursos hídricos, o solo e o relevo das áreas ao redor das minas (STAMM, 2003).

A maior parte dos efluentes líquidos gerados em usinas hidrelétricas a carvão é gerada devido ao uso da água como meio de transporte para resíduos sólidos, como na drenagem dos pátios de carvão, a descarga de fundo do lodo dos floccodcantadores dos sistemas de pré-tratamento de água, águas de arraste da extração das cinzas, entre outros.

Os resíduos aéreos são a emissão de gases, gotículas, névoa e material particulado na atmosfera, que são nocivos ao meio ambiente e devem atender certos limites preconizados pela legislação ambiental. São lançados nas chaminés e torres de resfriamento. A qualidade do ar nos arredores vai depender, além da concentração desses poluentes, das condições meteorológicas que garantam a diluição desses resíduos.

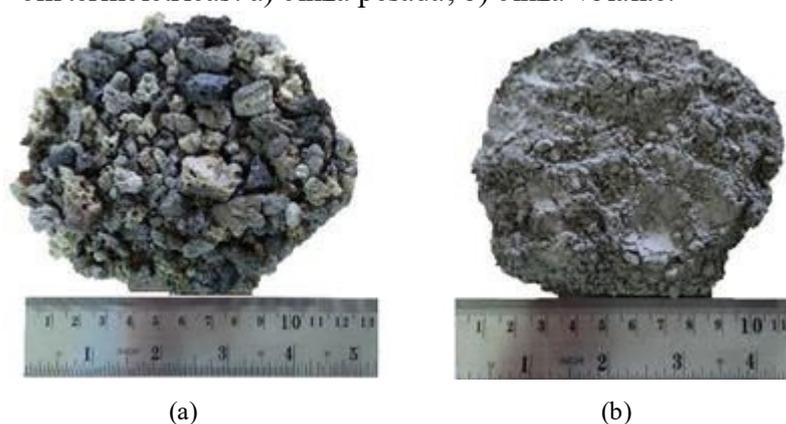
Já os resíduos sólidos principais são as cinzas oriundas da combustão do carvão mineral, mas há também o lodo proveniente do sistema de tratamento de água, borras oleaginosas, sucata e líquidos com particularidades que tornem inviável sua disposição em corpos de água ou na rede pública de esgotos (STAMM, 2003).

Rohde (2013) comenta que as cinzas oriundas da combustão do carvão mineral são geralmente tratadas como um resíduo sólido do processo de geração de energia nas usinas termelétricas, no entanto, esse tipo de postura é mais apropriada em países onde as cinzas restantes do processo termelétrico são da ordem de 6% a 15% e mesmo desses países esse viés está começando a ser questionado. A realidade brasileira, no entanto, é bastante diferente. Cerca de 50% de todo o carvão mineral usado para gerar energia é transformado em cinza. Então há a necessidade de deixar de focar as cinzas como um mero subproduto para dar-lhe uma visão mais importante, como um minério não metálico que tem a possibilidade de ser usado como material alternativo com inúmeras aplicações em potencial. Com a chegada de carvões importados da Colômbia, de Moçambique e da África do Sul, por exemplo, cinzas com novas características estão sendo produzidas, abrindo caminho para mais pesquisas e aplicações.

Segundo Rohde (2013), praticamente toda a cinza de fundo (Figura 6-a), coletada abaixo da caldeira, é descartada e as cinzas volantes (Figura 6-b), coletada após a caldeira, nos precipitadores eletrostáticos e/ou filtros de manga, parte nobre desses subprodutos, não é totalmente aproveitada. De acordo com a classificação da ABNT NBR 10004: 04 (ABNT, 2004a), o autor comenta que, pela experiência brasileira com cinzas de carvão mineral, a maior parte das cinzas deve ser classificada como resíduo Classe II A – não perigoso e não

inerte. Com isso, a disposição desse tipo de resíduo no solo só é possível quando colocadas em um aterro industrial. A incineração não surtiria qualquer efeito nesse tipo de resíduo devido ao fato de sua produção se dar por um processo semelhante.

Figura 6 - Resíduos sólidos da combustão do carvão mineral em termelétricas: a) cinza pesada; b) cinza volante.



Fonte: Kim, Dang e Do (2016).

Outro tipo de resíduo importante, conforme já mencionado no item 2.1.1 deste trabalho, são os subprodutos da dessulfurização dos gases oriundos da combustão do carvão mineral. Zaremba et al. (2008) comentam que tanto nos padrões europeus quanto nos americanos, tais resíduos são considerados não perigosos. A composição desse tipo de resíduo, como pôde ser visto na Tabela 2, varia bastante de acordo com a tecnologia utilizada. Tais subprodutos têm um potencial para serem aproveitados comercialmente e, conforme Castellan, Chazan e D'Ávila (2003), pode aumentar ainda mais com técnicas como a oxidação forçada, que transforma parte dos resíduos em um dos componentes do gesso comercial.

2.1.3 Aproveitamento dos resíduos de uma termelétrica

Segundo Rohde (2013), o aproveitamento das cinzas oriundas da queima do carvão mineral como um subproduto gera vários benefícios como a diminuição da área a ser destinada para aterros sanitários, a conservação de recursos naturais, um ambiente mais limpo e seguro, um incentivo para o desenvolvimento econômico e uma redução nos custos totais de geração de eletricidade, acarretando diminuição do custo para os usuários finais. Ainda segundo o autor, as cinzas oriundas da queima do carvão pulverizado no Brasil são de excelente qualidade e têm elevado valor comercial, podendo ser usadas para aplicações mais exigentes como a formação de zeólitas (AMONI et al., 2018). Para cinzas de fundo, o autor

comenta que já há estudos para sua utilização como material de construção em substituição parcial da areia natural, sendo uma das variedades da areia artificial. Para as cinzas volantes, o autor aponta o já costumeiro aproveitamento pelas indústrias cimenteiras. Uma preocupação para o uso das cinzas de fundo como substituição da areia é sua elevada reatividade álcali-agregado, como foi verificada no estudo de Brasileiro (2018), que encontrou o valor de 0,476% para a expansão, sendo classificada como potencialmente reativa grau R2 segundo a ABNT NBR 15577-1 (ABNT, 2018b).

Segundo Brandão, Rodrigues e da Silva (2013), apenas 30% das cinzas produzidas em usinas termelétricas a carvão mineral são aproveitadas pela indústria cimenteira, sendo todo o resto descartado. Mallmann e Oleg (2013) mostram como a combinação das cinzas de fundo e volantes podem ser usadas em um concreto compactado a rolo, que é um material bastante utilizado para a construção de barragens e de pavimentos rígidos. Para sua pesquisa, eles procuraram substituir o cimento Portland por cinza volante com a adição de cal hidratada e substituir a areia, que é um agregado miúdo, por cinzas de fundo. Os autores ainda citam outras pesquisas como o emprego de cinzas volantes e de fundo para a confecção de artefatos de alvenaria e como o emprego de cinzas volantes misturadas com cal hidratada e solos finos para aplicar em bases e sub-bases de pavimentos.

De acordo com Sweet (2001), os resíduos de FGD nos Estados Unidos, chamados pela autora de gesso sintético, são usados para a fabricação de placas de gesso acartonado (*dry wall*) por não se apresentarem características perigosas. Isso contribui para a diminuição dos gastos de capital investido na abertura ou expansão de minas de gesso. Wang, H., Wang, F. e Zhang (2004) utilizaram o resíduo de FGD para fabricação de tijolos, obtendo 15% de diminuição nos custos, enquanto Li et al. (2013) buscaram usar esse resíduo e as cinzas para fabricar painéis resistentes ao fogo. Lee et al. (2011) quantificaram os benefícios do gesso sintético de FGD para uma produção sustentável de placas de gesso acartonado. Para isso, os autores fizeram uso de uma análise do ciclo de vida, verificando que o uso desses resíduos contribuiu para uma redução energética e diminuição dos custos envolvidos na produção, além de reduzir a área que seria utilizada nos aterros sanitários para fazer sua disposição.

Su et al. (2013) estudaram como se poderiam utilizar os subprodutos de um FGD do tipo seco como insumo para a construção civil na China. Apesar das variações na composição desse resíduo, os autores comentam que sua maior parte sempre é de sulfato de cálcio hemi-hidratado ($\text{CaSO}_3 \cdot \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}$). Os componentes fabricados incluem blocos autoclavados, concreto aerado autoclavado, argamassas e outros. Wu et al. (2013), ao analisar resíduos do FGD do tipo seco da China e dos Estados Unidos, procuraram entender as

características e a perspectiva internacional do uso desse tipo de resíduo, que, ao contrário do gesso sintético produzido pelo método úmido, deve passar por uma oxidação forçada, antes de ser utilizado como insumo.

Watts e Torbert (2011) fizeram uso do gesso sintético de FGD do tipo úmido para melhoramento de solo para pastos. Na mesma linha, Kercher, Day K. e Day E. (2015) mostraram que esse resíduo pode ser transformado, em apenas seis minutos, em esferas para serem utilizados como fertilizantes.

Já para o resíduo de FGD oriundo do método semi-seco, além da fabricação de blocos estudada por Wang, H., Wang, F. e Zhang (2004), Liu e Yao (2014) os utilizaram, após uma devida oxidação, para a preparação de um eco-cimento que, quando analisado por um microscópio de varredura eletrônica, mostrou boas propriedades de hidratação, além de testes que mostraram bom comportamento mecânico. Além disso, Fu, Guan e Wu (2015) verificaram que é possível utilizar o resíduo de FGD semi-seco para produzir o hemidrato alfa do sulfato de cálcio, ou seja, um aglomerante semelhante ao gesso comum, mas que tem sua estrutura cristalina mais organizada e compacta, o que o torna mais resistente.

2.2 *Spray Dryer Ash* (SDA)

2.2.1 Definição e propriedades

A *American Coal Ash Association* (ACAA, 2016) define SDA como sendo um material em pó que é coletado em filtros juntamente com as cinzas volantes e consiste de uma mistura de sulfitos, sulfatos e cinza volante. Já segundo Heebink et al. (2007), a SDA pode ser descrita como predominantemente cristalina, com pH variando entre 9 e 13, com granulometria mais fina que a das cinzas volantes, e como uma combinação de partículas esféricas vítreas de cinzas volantes cobertas e intercaladas com finos cristais de produtos de reações de cálcio e enxofre. O ERPI (2007) ressalta ainda que a SDA contém variados teores de cal que não reagiu, podendo ser realimentada nas torres de absorção do FGD semi-seco.

Segundo Heebink et al. (2007), em 2007, um estudo foi iniciado, em conjunto pela *University of North Dakota Energy* e pelo *Environmental Research Center* para avaliar o estado atual do conhecimento sobre a SDA. Os termos mais comuns para esse material são *Spray Dryer Ash* (SDA) e *Dry FGD material*, segundo o EPRI (2007), mas, na extensa revisão da literatura feita pelo instituto, foram também encontrados para representar o material os termos contidos no ANEXO A deste trabalho.

A SDA é um material abrasivo e com tendência de aglomeração. Sua elevada área superficial, devido ao tamanho das partículas, que se enquadram na mesma classe dos siltes (2 a 75 μm), garante uma maior ativação química, sendo sua distribuição do tamanho das partículas relativamente uniforme. A densidade aparente do material é menor que a das cinzas volantes, variando de 400 kg/m^3 a 1760 kg/m^3 , enquanto a massa específica, que considera somente os sólidos, varia de 2,09 g/cm^3 a 2,84 g/cm^3 , contra os valores da cinza volante, que variam de 1,5 g/cm^3 a 3,1 g/cm^3 (EPRI, 2007). Tsimas e Moutsatsou-Tsima (2005) notaram que algumas SDA, além de propriedades pozolânicas, apresentam propriedades de aglomerante hidráulico.

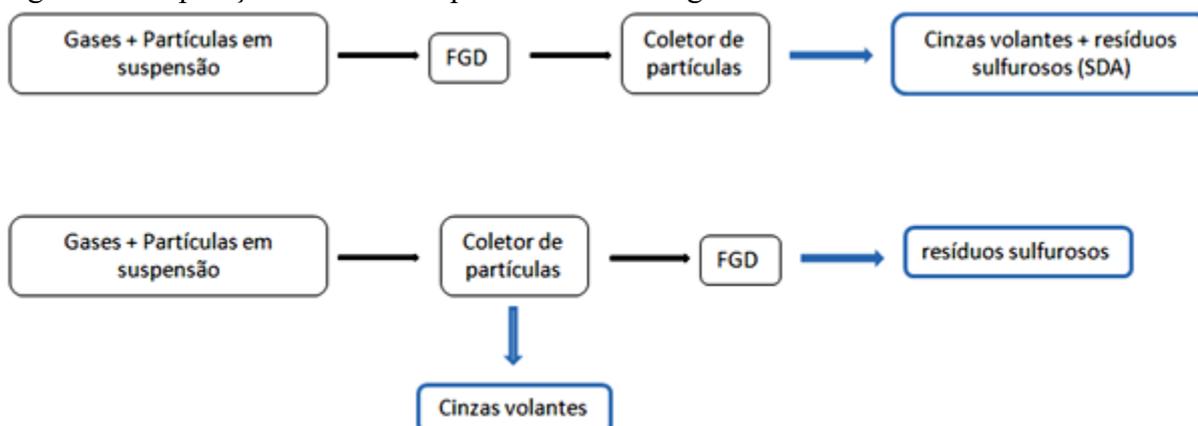
Segundo Jiang et al. (2011), os sistemas FGD semi-seco têm sido usados desde os anos 1970. Nos Estados Unidos, onde tal método representa 12% dos sistemas de FGD do país, segundo o ERPI (2007), a maior parte desses sistemas é instalada antes do sistema de coleta de partículas, como filtros de manga ou precipitadores eletrostáticos, portanto, sem uma pré-coleta de cinzas, fazendo com que o conteúdo de cinzas volantes represente de 40% a 75% do material, de forma que, em geral, as propriedades físicas e morfológicas, além do manuseio desse material, sejam semelhantes aos da cinza volante. Na UTE Pecém I é seguida essa mesma ordem de instalação, gerando, portanto, um resíduo com similaridades.

Já na Europa, os FGD são instalados após os coletores de partículas, de forma que é possível separar as cinzas volantes dos resíduos sulfurosos oriundos do FGD. Na China, segundo Wu et al. (2013), o FGD é instalado, à semelhança como é feito na Europa, depois dos removedores de partículas, fazendo uso da pré-coleta de cinzas volantes, no entanto com uma eficiência menor, deixando um teor de cinzas volantes mais elevado no resíduo de FGD.

Sendo assim, a depender da posição no processo onde o sistema FGD foi instalado com relação aos filtros de manga ou precipitadores eletrostáticos (Figura 7), poderão sair dois tipos de materiais. Quando o FGD é instalado à montante dos coletores, o material sairá uma mistura de cinzas volantes e resíduo de FGD semi-seco (SDA). Já quando o FGD é instalado à jusante dos coletores, sairá o resíduo de FGD puro, pó muito fino, quase branco, muito cáustico e com um calor de hidratação maior (EPRI, 2007).

As cinzas de FGD semi-seco consistem de diferentes compostos de cálcio, principalmente sulfato de cálcio e uma pequena porcentagem de sulfato, hidróxidos, carbonatos, bem como variados teores de cinza volante (SHEN et al., 2015). Ainda segundo os mesmos autores, quando comparada com as cinzas volantes, as cinzas de FGD semi-seco possuem uma maior porcentagem de óxido de cálcio e de óxido de enxofre e, segundo Heebink et al. (2007), uma menor concentração de ferro, silício e alumínio.

Figura 7 - Disposição do FGD nas plantas e resíduos gerados.



Fonte: Autor (2018).

De acordo com a ACAA, em 2015, nos Estados Unidos, das 1.311.947 toneladas de SDA produzidas, apenas 252.849 toneladas, ou seja, apenas 19,27%, foram aproveitadas (a maior parte foi usada para preencher vazios em minas), todo o restante teve que ser disposto em aterros industriais. Já segundo a ECOBA (*European Coal Combustion Products Association*), em 2010, das 413.000 toneladas produzidas do resíduo de FGD semi-seco, apenas 104.000 toneladas, ou seja, apenas 26%, foram dispostas em aterros industriais. Justamente pela existência da pré-coleta das cinzas, aumentando as possibilidades de uso comercial do resíduo de FGD puro.

2.2.2 Utilização da SDA

Cruz et al. (2016) comentam que quando um sistema FGD é adotado, as cinzas volantes são contaminadas com sulfito de cálcio (CaSO_3), pois muitos dos sistemas não utilizam um sistema de pré-coleta de cinzas, tendo que ser disposta em aterros sanitários, uma vez que sua aplicação comercial é desafiadora. Os autores avaliaram uma forma de oxidar o sulfito de cálcio com a instalação de um reator de leito fluidizado, de forma a enquadrar o resíduo resultante nos requisitos químicos da ABNT NBR 12653 (ABNT, 2014b) no que diz respeito ao teor de SO_3 , mas sem comprometer as emissões de gases ácidos, como o simples desligamento do FGD faria.

Boa parte das pesquisas sobre SDA se concentram na Europa, na China e nos Estados Unidos, não coincidentemente, países onde o FGD semi-seco é bastante utilizado. Jiang et al. (2011) comentam sobre a utilização desse resíduo nesses locais. Na Europa e nos Estados Unidos, são bastante usados em minas, para preencher vazios e para neutralizar a acidez do solo para reestabelecer a vegetação, na agricultura como fertilizante, como aditivos

no concreto, e na produção de agregados sintéticos. Já na China, os usos comuns, além dos já citados, são para fabricação de tijolos autoclavados, filer para construção de estradas, blocos de concreto aerado, misturas secas prontas para argamassa, e produção de cimentos de sulfoaluminatos de cálcio. As propriedades cimentícias dos resíduos de FGD são inerentes às cinzas volantes e ao teor de cal hidratada presente. Por essa razão, os resíduos de FGD dos Estados Unidos costumam ser usados diretamente, mas os resíduos da Europa e da China necessitam de adições de cinzas volantes para serem usados (WU et al., 2013; CLOUTIER, 2016).

Heebink et al. (2007) ressaltam que a ACAA não especifica as aplicações da SDA como a ECOBA, que cita aplicações como argamassas para estabilizar cavidades em minas, produção de cimento e de tijolos de solo-cal, fertilizante a base de enxofre, além de servirem como sorvente para FDG do tipo úmido. Os autores ainda citam usos como aglomerantes para revestimento isolante interior de gesso ou para pisos elevados, fundação de estradas, *flowable fills*, alvenaria, agente fixador de resíduos perigosos, produção de ácido sulfúrico, lã mineral, entre outros. Ao avaliar o mercado americano, o EPRI (2007) organizou variados usos para a SDA, encontrados na literatura, quanto ao seu potencial de aplicação, classificando-os como de alto, moderado e baixo potencial.

Na Figura 8 se encontra um esquema com as principais áreas de aplicação para a SDA, enquanto a Tabela 3 detalha essas aplicações encontradas na literatura, feitas entre 1984 e 2018, e mostra a lista dos autores das pesquisas. Os tópicos a seguir mostram exemplos de aplicação dentro de cada uma dessas áreas.

Figura 8 - Áreas de aplicação da SDA.



Fonte: Autor (2018).

Tabela 3 - Resumo das aplicações da SDA encontradas na literatura.

Tipo da aplicação	Aplicação	Autores
Aglomerantes	Aditivo retardante de pega	Jiang et al. (2011)
	Aglomerante para isolamento e pisos elevados	Heebink et al. (2007)
	Cimento de sulfoaluminato de cálcio	Ren et al. (2009); Jiang et al. (2011); Duvallet e Robl (2016)
	Cimento quimicamente ativado	Wu e Naik (2003)
	Geopolímeros no concreto	Boxley (2009); Boxley (2011)
	Produção de cimento	Heebink et al. (2007)
Agricultura	Corrigir solo e fertilizantes	Heebink et al. (2007); Jiang et al. (2011)
	Melhoramento de solos	EPRI (2007); Burgess-Conforti et al. (2016); Burgess-Conforti et al. (2017)
Ambiental	Agente fixador/reductor para resíduos perigosos	Heebink et al. (2007); Fang et al. (2018)
	Sequestro de CO ₂	Fauth, Soong e White (2002); Dilmore et al. (2009)
	Sorvente para FGD tipo úmido	Heebink et al. (2007)
Aplicações Marítimas	Quebra mar	Heebink et al. (2007)
	Recifes artificiais	Woodhead e Parker (1984)
Compósitos que replicam madeira	Painéis de parede com material reciclado	EPRI (2007)
	Substituto da madeira	Markevicius et al. (2009); Malhotra (2010)
Estradas e Construções	Concreto estrutural e estradas	Namagga, Atadero (2011)
	Filer, fundações, asfalto	Heebink et al. (2007); Jiang et al. (2011); Cloutier (2016)
	Pátio de alimentação	Chugh et al. (2006); Chugh, Patwardhan e Munish (2007)
Geotécnico	Estabilização e recuperação de minas	EPRI (2007); Heebink et al. (2007); Beeghly, Schrock (2010); Modi (2010); Jiang et al. (2011); Peters (2011); Cheng et al. (2016)
	Flowable fill	Butalia, Wolfe e Lee (2001); EPRI (2007); Gemperline e Durham (2013)
	Preenchimento estrutural e terraplanagem	Sahu, Brown e Lee (2002); EPRI (2007)
Materiais Cimentícios	Agregado sintético	Wu (2005) ; Tomer e Huber (2008); Jiang et al. (2011)
	Blocos e pré-moldados	Heebink et al. (2007); Litte(2008); Dryden e Malek (2011)
	Mistura seca pronta para argamassa	Jiang et al. (2011)
	Tijolo autoclavado, blocos de concreto aerado	Jiang et al. (2011)
	Tijolo de solo-cal	Heebink et al. (2007)
Substituição do Cimento	Argamassa e concreto com SDA e fibras	Riley et al. (2011)
	Concreto de alto desempenho	Yamei, Wei e Lianfei (1997)
	Performance sísmica	van de Lindt e Rechan (2011)
Outros	Fase-reforço em materiais cerâmicos	Pinheiro (2010)
	Produção de ácido sulfúrico	EPRI (2007)
	Exploração de recursos	Cordoba e Staicu (2018)
	Oxidação do sulfito de cálcio na SDA	Guo et al. (2018)
	Produção de lâ mineral	EPRI (2007)

Fonte: Autor (2018).

• Aglomerantes

Duvallet e Robl (2016) utilizaram grandes quantidades de SDA para produzir um cimento de sulfoaluminato de cálcio (CSA), que usa a etringita como principal responsável pela resistência inicial, atingindo até 80% da resistência final dentro de um dia. Nesse tipo de cimento, o elevado teor de SO₃ não é prejudicial, como limita as normas para cimento Portland. Tal cimento pode ser usado em conjunto com o cimento Portland com foco na durabilidade, mas normalmente é usado em aplicações específicas, como estruturas com elevada protensão, concretos impermeáveis ou simplesmente em pré-moldados. Ren et al. (2009) fizeram uma pesquisa semelhante na China, obtendo um cimento cujos principais constituintes eram o sulfoaluminato de cálcio e o silicato dicálcico.

Wu e Naik (2003) mostraram que é possível a fabricação de um cimento quimicamente ativado ao misturar cinzas volantes, SDA e cimento Portland tipo I com sulfato de sódio como ativador químico. A mistura se mostrou mais resistente a ataques por sulfato e a reações álcali-agregado e o ativador usado muito efetivo e econômico. A ativação estudada foi um meio de compensar a pouca resistência nas primeiras idades quando se usa pozolanas, que podem ser ativações térmicas (normalmente usadas em pré-moldados), mecânicas (moendo o cimento e outros aditivos) ou químicas, sendo o mais comum o cloreto de cálcio, mas não pode ser usado em concreto armado devido à corrosão das armaduras. Segundo os autores, uma grande quantidade de etringita foi formada nas primeiras idades, mas nenhuma etringita adicional foi produzida nas amostras, mesmo sendo expostas ao ataque por sulfatos.

Boxley (2009, 2011) deixou várias patentes sobre o uso de geopolímeros, produzidos usando SDA e ativadores químicos alcalinos, dentre eles, o uso como aditivo em concretos e a produção de concreto poroso sem o uso de cimento Portland para pavimentos ou pré-moldados. O autor percebeu que a SDA, quando misturada com cinza volante e água, gerava um pH suficiente para que ocorressem as reações de geopolimerização, podendo fazer concretos somente com materiais reciclados. Esses geopolímeros formam um tipo de aglomerante mais antigo do que os cimentos romanos. Segundo a teoria da década de 1980 de Joseph Davidovits, no livro *The Pyramids: An Enigma Solved*, citada por Barsoum, Ganguly e Hug (2006), grande parte dos blocos das pirâmides do Egito foram moldadas no local com geopolímeros feitos a partir de uma mistura de calcário, argila, cal e água, o que foi comprovado por análises feitas pelos mesmos autores e muitos outros depois deles, atestando a durabilidade de uma estrutura que sobrevive há 5000 anos.

- **Agricultura**

Burgess-Conforti et al. (2016) utilizaram a SDA para fazer a calagem⁷ de solos, verificando que é uma ótima opção para melhoramento de solos, no entanto, deve-se ter o cuidado de não aplicar em excesso, pois pode deixar o solo muito alcalino, atrapalhando o crescimento ótimo da plantação.

- **Ambiental**

Algumas aplicações da SDA, já comerciais na Europa, por exemplo, podem inclusive ajudar a mitigar os efeitos do passivo ambiental agindo como materiais

⁷ Calagem do solo é a correção do pH por meio da adição de calcário, elevando os teores de cálcio e magnésio, a fim de um desenvolvimento satisfatório de culturas (BARBOSA FILHO; FAGERIA; ZIMMERMANN, 2005).

estabilizadores, como o *Cefill*, que podem ser usados no fundo e topo de aterros para estabilizar resíduos perigosos ou como selo vertical para mitigar contaminação dos lençóis freáticos (EPRI, 2007). Na mesma linha de pesquisa, Fauth, Soong e White (2002) utilizaram a SDA em substituição de minerais naturais, para sequestro de CO₂ do ar. Da mesma forma fizeram Dilmore et al. (2009), mas com o auxílio da água do mar. Esse tipo de uso para a SDA diminui o teor de CO₂ antropogênico da atmosfera, ao mesmo tempo em que diminui a alcalinidade do resíduo resultante.

- **Aplicações marítimas**

Woodhead e Parker (1984), apenas seis anos depois do surgimento da tecnologia de FGD semi-seco, produziram blocos de concreto feitos com SDA para serem acomodados no oceano como recifes artificiais. Depois de um ano de exposição, a integridade estrutural e a porosidade foram mantidas, a resistência aumentou na água do mar e, de acordo com testes de lixiviação da agência de proteção ambiental, o material foi classificado como não tóxico e não perigoso, apresentando colonizações de comunidades biológicas sem comprometer o ambiente marinho. Sendo assim, tal aplicação mostrou-se uma opção viável.

Heebink et al. (2007) citam outra aplicação nessa área, que é a construção de um quebra-mar de concreto com SDA sem que impactasse o meio ambiente, nem perdesse sua integridade estrutural.

- **Compósitos que substituem madeira**

Markevicius et al. (2009) desenvolveram compósitos para tentar substituir comercialmente a madeira usando SDA e garrafas plásticas recicladas. Resíduos de celulose foram adicionados posteriormente, o que deixou os compósitos com uma aparência mais semelhante à da madeira. Foi notado que a resistência dos compósitos diminuiu com o aumento do teor de SDA, mas o menor valor ainda se manteve dentro do aceitável para compósitos de madeira na engenharia.

Pesquisa semelhante foi feita por Malhotra (2010), mas foi possível executar compósitos com desempenho muito superior, com resistências à flexão da ordem de 90 MPa, podendo ser usado como material estrutural, mas ainda assim podendo ser cortado facilmente com um serrote comum. No mesmo trabalho foi notado que a adição de fibras pode diminuir a rigidez do material e dar mais ductibilidade.

- **Estradas e construções**

Namagga e Atadero (2010, 2011) estudaram a viabilidade técnica da utilização do SDA como substituição parcial do cimento em aplicações estruturais e em infraestrutura de transportes. Os teores de substituição variaram de 0% a 50% e foram feitos testes de resistência à compressão, aderência das barras de aço (*pull-out*), ciclos de gelo/degelo e resistência à corrosão. O limite ótimo, segundo tais testes, foi de 25% a 35%, mas produzindo efeitos negligenciáveis nos ciclos de gelo/degelo e aparentemente não significativos quanto à probabilidade de aumento da corrosão das barras metálicas. Dessa forma, concluiu-se que a SDA tem um grande potencial para ser usado em aplicações estruturais. A SDA também foi aplicada no asfalto, como filer, e em bases e sub-bases de estradas (HEEBINK et al., 2007; JIANG et al., 2011; CLOUTIER, 2016).

Uma série de construções em geral são exploradas utilizando a SDA. Um exemplo disso são pátios de alimentação para gado, feito com uma mistura de SDA com aspecto de solo, que depois de umedecido é compactado com equipamento para construção de estradas a fim de gerar um terreno firme, propício à alimentação dos animais e operação de maquinário pesado sem comprometer sua integridade física, verificando inclusive, por análise por elementos finitos, que se gerou resistência suficiente e com apenas de 25% a 30% do custo que teriam se tivessem sido feitas em concreto convencional. (CHUGH et al., 2006; CHUGH; PATWARDHAM; MUNISH, 2007).

Uma preocupação nesses pátios de alimentação foi a expansão por formação de etringita, que deveria ser mantida abaixo de 5%, por meio de uma drenagem eficiente. Além disso, o teste de lixiviação conduzido excedeu o limite para sulfato, mas, segundo Chugh et al.(2006), isso não é preocupante, uma vez que o teste é feito com os piores cenários possíveis, que raramente são encontrados.

- **Geotecnia**

Flowable fills são materiais que fluem como líquido, autonivelantes, sem necessidade de vibração ou compactação, que endurecem em poucas horas até uma determinada resistência, mas podendo ser facilmente escavados posteriormente (EPRI, 2007). Butalia, Wolfe e Lee (2001) verificaram que é possível fazer um *flowable fill*, substituindo as cinzas volantes por SDA. Para um tempo de pega menor, um pequeno teor de cimento pode ser adicionado. Um aumento de 4% de cimento e aditivos reduziu o tempo de pega em mais de um dia. Gemperline e Durham (2013), que chamam esse tipo de aplicação de material de

baixa resistência controlada, com função maior de preencher vazios em substituição ao solo compactado, afirmam ser possível a aplicação da SDA e de outros materiais reciclados, pois as resistências requeridas, que são em torno de 8 MPa, são bem menores que as do concreto estrutural. A SDA deixou as misturas com maior módulo de elasticidade e, quando a taxa de substituição foi de 90% para 100%, houve uma redução da resistência à compressão, possivelmente por ataque de sulfato, pois ela continha 12% de SO_3 . Peter (2011) adicionou uma espuma em *flowable fills* com SDA para melhorar a resistência ao congelamento.

Em minas, tanto podem ser usadas como enchimento, ao serem misturadas com cinzas pesadas e água, como podem ser injetadas em fraturas como uma pasta feita com água e SDA (EPRI, 2007). Beeghly e Schrock (2010) utilizaram reações pozolânicas e sulfopozolânicas da SDA para estabilizar resíduos de dragagem como preenchimento estrutural. Para evitar que a formação de etringita pudesse causar expansão deletéria, a mistura foi deixada para maturar por alguns dias antes de ser compactada. Segundo os autores, o pH deve ser mantido acima de 11 por 28 dias para que as reações pozolânicas ocorram sem problemas e que os metais pesados lixiviáveis possam ser estabilizados. Modi (2010) aplicou a SDA para recuperação de poços e *highwalls*, que são as grandes faces verticais deixadas pela mineração, de minas abandonadas, mostrando uma alternativa viável. Além disso, o autor percebeu que a adição de cal deixava a mistura ainda mais resistente.

- **Agregados sintéticos**

Wu (2005) produziu agregados sintéticos leves por peletização e extrusão, usando SDA, e avaliou sua durabilidade, assim como a de produtos feitos com esses agregados. Os testes foram ciclos de molhagem/secagem e gelo/degelo, bem como a exposição natural em longo prazo às condições climáticas. O autor comenta que a SDA é usada comercialmente para construção de estradas, preenchimento estrutural e *flowable fills* há anos, mas na construção civil é pouco explorada. Durante os estudos, verificou-se que houve aumento da durabilidade quando o tempo de mistura com SDA foi maior, além disso, a adição de cimento não alterou a durabilidade. Em contato com umidade, ocorreu uma leve expansão dos agregados, mesmo apresentando boa resistência ao esmagamento.

É válido ressaltar que a empresa *Universal Aggregates* construiu uma indústria na *Birchwood Power Facility*, em *King George County* (VA, EUA), para transformar SDA em agregados sintéticos comercialmente, sem o uso de combustão, para serem usados em blocos de alvenaria, concreto e pavimentação. Sua capacidade é a produção de 167 mil toneladas de agregado por ano e acredita-se que tais agregados possam ocupar de 10% a 15% do mercado dos agregados naturais (TOMER E HUBER, 2008).

- **Outros usos**

Como outras aplicações não enquadradas nas áreas anteriores, Pinheiro (2010) utilizou a SDA como fase-reforço para produção de materiais cerâmicos, verificando uma diminuição da temperatura de sinterização, viabilizando a empreitada do ponto de vista energético. Além disso, estudos como os Cordoba e Staicu (2018) utilizam a SDA como fonte de exploração de recursos ao recuperar selênio com o auxílio da metabolização por bactérias.

2.2.3 Restrições quanto ao uso da SDA na construção civil

De acordo com Ren et al. (2009), a SDA possui características que limitam bastante seu uso como material de construção, principalmente em misturas cimentícias, por causa do teor de enxofre, que, segundo as normas chinesas, por exemplo, não pode exceder 3,5% com relação ao cimento. Além disso, a possível presença de cal livre pode produzir a alcalinidade necessária para causar expansões, principalmente quando exposto à água, apesar do pH da SDA não ser considerado condutor para formação de etringita (EPRI, 2007).

Segundo o EPRI (2007), possíveis barreiras para a utilização do SDA, material que ainda está claramente subutilizado, principalmente nos Estados Unidos, estão relacionadas com:

- a) a não unanimidade nos termos usados para descrever o material, dificultando pesquisas e a comercialização de produtos;
- b) a falta de compreensão acerca do material, que requer mais estudos de suas propriedades químicas e de engenharia, pois é difícil generalizar as propriedades devido à grande variabilidade de uma UTE para outra;
- c) a limitação nos dados acerca dos efeitos na saúde e ambientais, mesmo sendo classificado como um resíduo não perigoso de acordo com limites normativos, ainda há a preocupação quanto à contaminação das águas por lixiviação, enchentes e afins quando da sua aplicação ou da sua disposição em aterros;
- d) a inconsistência dos manuais para o uso benéfico das cinzas, uma vez que as normas englobam vários tipos de cinza, como as volantes e pesadas, mas não há nada específico para SDA;

- e) fatores econômicos, pois algumas empresas acreditam ser menos dispendioso a simples disposição do material em aterros do que empregar recursos para aproveitá-lo, pois o preço de venda do SDA é muito baixo para justificar o *marketing* do material (na Europa o aumento dos impostos nos aterros tem alavancado a utilização do SDA).

Sahu, Brown e Lee (2002) comentam que a SDA pode ser estabilizada com mais cinza volante e pó de fornos de cal e usada como preenchimento estrutural ou deixada em pátios de armazenamento. Para estudar a expansão por formação de etringita e taumasita, amostras foram retiradas de ambas as aplicações e avaliadas, mostrando que realmente houve a formação dos compostos ao serem expostas à umidade. Apesar disso, as propriedades mecânicas do material, como resistência e rigidez, se mostraram iguais ou superiores a de solos comumente encontrados na natureza.

Em testes feitos com exposição de dois anos com a substituição parcial do cimento por SDA houve formação de etringita, mas de forma não destrutiva. No entanto, neste mesmo ensaio, notou-se a presença de cloretos, restringindo a aplicação em concreto armado, mas um teste de corrosão em elementos pré-moldados com exposição de um ano indicou uma baixa probabilidade de corrosão na maioria das amostras, porém, como houve a presença de taumasita, que reduz a resistência do concreto, o projeto foi abandonado (EPRI, 2007).

Wolfe et al. (2001) buscaram correlacionar as expansões com a formação de etringita ao liberar o acesso da água em amostras de SDA compactada. Após vários dias, mesmo com evidências da formação de etringita, a expansão e a microfratura foram mínimas. Isso ocorreu, segundo os autores, porque a etringita foi formada nos espaços porosos. Para que a expansão ocorra, todos os poros devem ser preenchidos e deve existir uma reserva de hidróxido de cálcio suficiente para manter o pH necessário para a reação e para servir como fonte de cálcio. Mesmo seis meses depois, ainda existiam espaços vazios disponíveis. Segundo o EPRI (2007) a habilidade da SDA para formar etringita sem se expandir é a chave para sua aplicação bem sucedida na engenharia.

Tsimas e Moutsatsou-Tsima (2005) ressaltam que o custo com transporte do material, bem como a não existência de normas específicas são mais algumas das dificuldades para o uso da SDA. Riley et al. (2011) afirmam que, até hoje, o elevado teor de enxofre tem impedido a aplicação da SDA no concreto, mas como esse teor não é tão significativamente acima dos limites, tal resíduo merece um estudo mais individualizado.

2.2.4 Preocupações ambientais

Heebink et al. (2007) comentam que a disposição da SDA é feita de forma semelhante às cinzas volantes que não são aproveitadas, o que pode gerar custos e prejudicar o meio ambiente. O fenômeno da lixiviação gera compostos solúveis, que se dispersam por águas e solos, e escoamento das partículas finas e coloidais. A água é o maior vetor de poluição no meio ambiente, mobilizando substâncias potencialmente perigosas, impactando na qualidade do solo, água e, conseqüentemente, da saúde humana. Em geral a área superficial intensifica as interações químicas e a liberação de poluentes (TIRUTA-BARNA, BARNA, 2012). Por isso, sendo a SDA um material de granulometria muito fina, deve-se tomar providências que diminuam sua disposição inadequada.

Taerakul et al. (2003), como parte de um estudo para analisar a viabilidade do uso da SDA em diversas aplicações de engenharia, fizeram testes de lixiviação e análise elementar por dois anos para verificar a liberação de vestígios, como mercúrio, arsênio e selênio, e compararam com resultados do mesmo material feitas em 1991-1992. Com isso, concluíram que, mesmo após um período de 11 anos, a análise elementar e o teste de lixiviação mostraram valores abaixo dos limites regulatórios para reuso. Em um estudo mais recente feito por Silva (2017) com a SDA da UTE Pecém I, os valores de pH permitiram classificar o resíduo como não corrosivo e todos os extratos lixiviados ficaram abaixo dos valores normativos, classificando o resíduo como não perigoso. Alguns limites para solubilização, no entanto, foram ultrapassados, ficando o resíduo classificado como não inerte e não perigoso, ou seja, Classe II-A da ABNT NBR 10004 (ABNT, 2004a).

Cheng et al. (2016) avaliaram como o uso da SDA em restauração de minas poderia afetar a qualidade das águas subterrâneas, mostrando que traços de alguns elementos aumentaram, chegando a ultrapassar limites normativos, mas muitos outros diminuíram, concluindo que, no geral, o uso da SDA não causou impactos significativos nos aquíferos. Já Shen et al. (2015), focaram sua pesquisa na avaliação da possível liberação de enxofre e mercúrio da SDA. Como na China esse material é usado para confecção de tijolos autoclavados, havia a preocupação se as elevadas temperaturas poderiam fazer com que tais elementos fossem liberados, mas sua pesquisa concluiu que há uma estabilidade térmica, fazendo com que eles não escapem.

2.3 A influência da SDA no concreto

Tsimas e Moutsatsou-Tsima (2005) estudaram a aplicação de SDA como substituição parcial do cimento no concreto de uma barragem, verificando possíveis problemas, soluções e sua perspectiva de uso. Foi notada uma melhora na trabalhabilidade, diminuição na temperatura de hidratação, maior durabilidade e resistência em longo prazo.

Yamei, Wei e Lianfei (1997) avaliaram se é possível usar SDA na produção de concretos de alto desempenho. Eles observaram os concretos exibiram bom desempenho tanto no estado fresco quanto no endurecido, atingindo resistências à compressão de 67,3 MPa a 85,5 MPa aos 90 dias, superando o concreto de referência. Aos 28 dias, os traços com SDA obtiveram de 84 a 91% da resistência à compressão do concreto de referência. Além disso, os autores verificaram que os agregados atuam como inibidores de expansão, fazendo com que os poros gerados por eles sejam preenchidos pela etringita, densificando a matriz e elevando a resistência nas idades iniciais. Essas descobertas revelam que alguns materiais não normatizados podem ser usados de forma eficiente quando bem dosados.

Van de Lindt e Rechan (2011) avaliaram o desempenho sísmico de pórticos executados com concreto contendo 50% de substituição do cimento por SDA. Os resultados mostraram que o desempenho do pórtico com SDA se mostrou compatível com o de um concreto convencional, suportando dois sismos acima do nível de projeto, o que permitiu aos autores concluir que, do ponto de vista estrutural, é viável o uso de SDA no concreto estrutural sujeito a abalos sísmicos, reduzindo os custos e o passivo ambiental.

Em outra pesquisa, Little (2008) comenta sobre o uso da SDA na fabricação de blocos e outros elementos pré-moldados, com substituição em massa de 35% do cimento. As aplicações que substituem parte do cimento, com a exceção do atraso no tempo de pega, mostraram-se com uma resistência e durabilidade maiores ou comparáveis com o concreto sem SDA (HEEBINK et al., 2007).

2.4 A influência da SDA na argamassa

Dentre as várias funções das argamassas, a mais usada é para revestimento, regularizando superfícies de substratos para receber pinturas ou cerâmicas ou servindo de acabamento quando é a última camada do sistema (VEIGA, 1998). No entanto, para que cumpra suas funções, uma argamassa de revestimento deve atender a uma série de critérios, tanto no estado fresco quanto no estado endurecido, que são aferidos com ensaios que preveem seu comportamento em diferentes condições de uso (MORAIS, 2011).

A propriedade mais importante no estado fresco das argamassas é a trabalhabilidade, que é a facilidade de preparação, transporte e aplicação da argamassa, onde ainda se pode avaliar seu rendimento e compacidade (GUACELLI, 2010). Idealmente, a argamassa deve manter-se coesa, consistente e plástica durante seu tempo de aplicação, tendendo a se espalhar com facilidade e a manter-se deformada após a retirada das tensões de deformação (SABBATINI, 1994; VEIGA, 1998). Essa propriedade é também importante por várias outras no estado endurecido dependerem dela, pois, com uma boa aplicação, são geradas maiores resistências (ARAUJO, 2014).

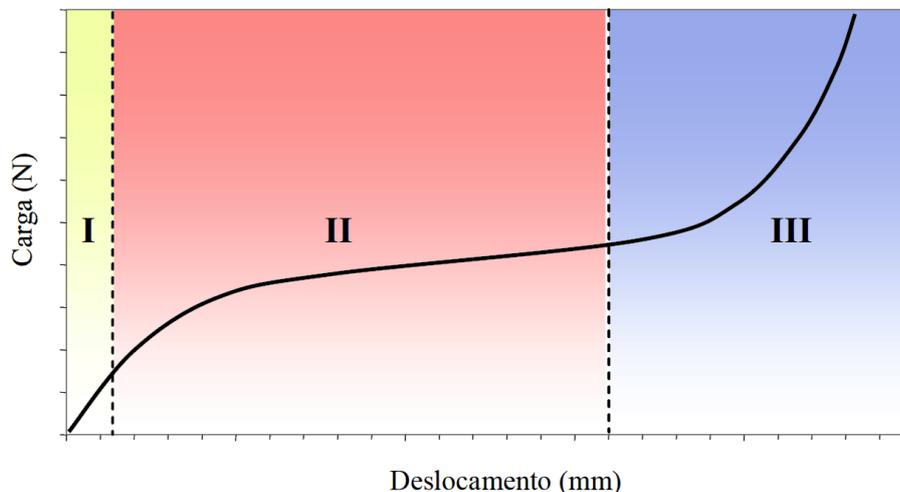
Carasek (2007) afirma que a leveza de uma argamassa tem relação com sua trabalhabilidade, reduzindo o esforço de um operário durante a aplicação e aumentando a produtividade. Uma forma de melhorar essa trabalhabilidade é com a utilização de cal hidratada na argamassa, garantindo também mais homogeneidade e melhor retenção de água, pois atua como lubrificante sólido juntamente com o cimento, envolvendo os grãos a fim de facilitar seu espalhamento (RAGO; CINCOTTO, 1995; GUIMARÃES, 2002).

O método do *squeeze-flow* para avaliação do comportamento reológico pode simular condições reais de escoamento envolvidas na aplicação e no preparo da argamassa. Este método consiste em comprimir uma amostra cilíndrica entre duas placas paralelas e é amplamente usado em alimentos, fármacos e em suspensões (CARDOSO et al., 2014). Segundo Betioli et al. (2009), o primeiro trabalho utilizando este método em materiais cimentícios foi o de Min, Erwin e Jennings (1994), que o realizou em pastas de cimento. Ainda segundo o autor, diversos trabalhos se seguiram com esses materiais, principalmente em argamassas de revestimento. No Brasil a norma deste ensaio é a ABNT NBR 15839 (ABNT, 2010b).

A resposta típica de um ensaio de *squeeze-flow* é uma curva carga-deslocamento como a da Figura 9, que está relacionada a parâmetros reológicos fundamentais como a viscosidade e a tensão de escoamento (BETIOLI et al., 2009). Nessa curva podem ser vistos três regiões típicas (CARDOSO; PILEGGI; JOHN, 2010):

- I. **Deformação elástica linear:** pequenos deslocamentos. Material se comporta como um sólido e tem relação com a tensão de escoamento, conseqüentemente, com a máxima espessura que uma camada de revestimento pode apresentar;
- II. **Deformação plástica ou fluxo viscoso:** deslocamentos intermediários. Material sofre grandes deslocamentos com pequeno aumento de carga. Está relacionado com a produtividade na aplicação das argamassas;
- III. **Enrijecimento por deformação (*strain hardening*):** grandes deformações. Aumento exponencial da carga conforme se aumenta a deformação. Forças de atrito predominantes, gerando forças que restringem o fluxo. Está relacionado com a dificuldade de um material ser aplicado e ser feito seu acabamento.

Figura 9 - Curva típica de um ensaio de *squeeze-flow*.



Fonte: Betioli et al. (2009).

Legenda: região I – deformação elástica; região II – deformação plástica ou fluxo viscoso; região III – enrijecimento por deformação (*strain hardening*).

Kudo (2012) comenta que os finos na argamassa possuem grande influência no comportamento reológico, fazendo com que apresentem curvas com cargas superiores. A falta de finos implica uma maior dificuldade de movimentação dos agregados, mas seu excesso pode diminuir a fluidez, uma vez que a água livre que permite o afastamento das partículas é diminuída à medida em que aumenta a área superficial em relação ao volume da composição.

No estado endurecido, a principal propriedade que uma argamassa de revestimento deve ter é uma boa aderência ao substrato (ARAÚJO, 2014). A ABNT NBR 13528 (ABNT, 2010a) apresenta o procedimento para o ensaio de resistência de aderência à tração, onde mostra inclusive os modos de ruptura que podem ocorrer no ensaio, que dirão se o ensaio foi válido e se o valor acusado no equipamento deve ser adotado como a resistência de aderência da argamassa.

Riley et al. (2011) utilizaram SDA com propriedades aglomerantes combinadas com um reforço de fibras de pneus de um processo de reciclagem para a produção de argamassas. O diferencial nesse estudo é que foram usados teores elevados de substituição do cimento pela SDA, de 80% a 100% em massa. Os autores ressaltam que o objetivo não era alcançar a maior resistência possível, mas consumir o máximo possível do resíduo em produtos úteis, mas não estruturais, mas que ainda tivessem desempenho adequado. Como resultado, verificaram que a pasta de SDA com água não tinha resistência suficiente para aplicações na engenharia, mesmo com a adição de fibras, no entanto, com a adição de apenas 5% de cimento Portland, foi possível obter resistências à compressão de 27 MPa, dentro do considerado aceitável para construção civil até mesmo para concretos. Além disso, a adição de fibras não influenciou muito na resistência à compressão, mas reduziu o *spalling*⁸ quando da fratura e melhorou a dureza e a ductibilidade da mistura. Outra observação dos autores foi a elevada absorção de água que as argamassas com SDA apresentaram.

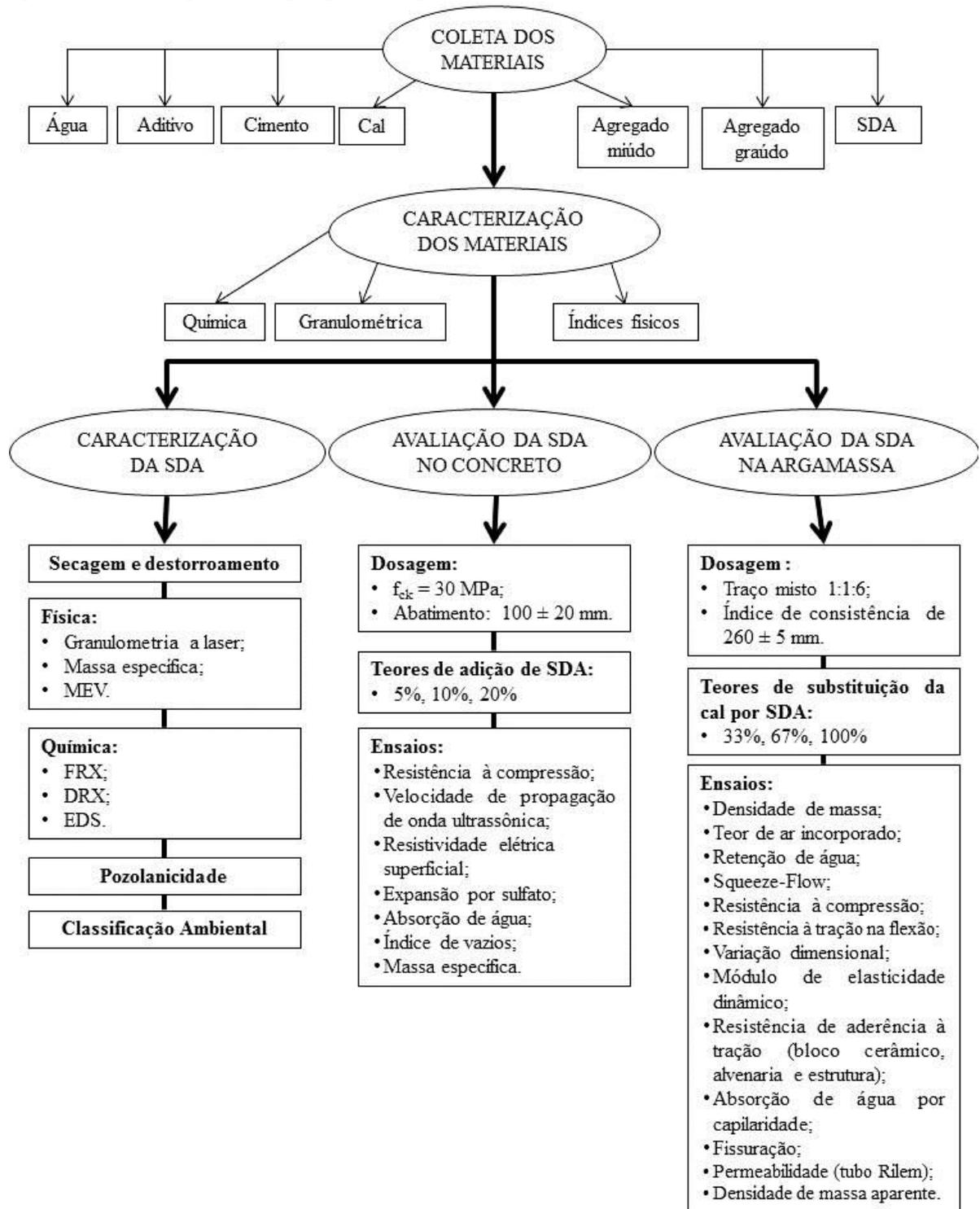
Yamei, Wei e Lianfei (1997) avaliaram se é possível usar SDA na produção de argamassas de alto desempenho. Eles observaram um bom desempenho tanto no estado fresco quanto no endurecido, atingindo resistências à compressão de 25,2 MPa a 42,4 MPa aos 28 dias. Nas idades iniciais (3 dias), houve uma redução da resistência à compressão com a adição de SDA, no entanto, em idades mais avançadas, o crescimento da resistência das argamassas com SDA foi bem mais expressivo, superando os valores obtidos para a argamassa de referência. Outro fato observado pela pesquisa foi que a influência do fator água/aglomerantes afetou de forma mais evidente a resistência à tração na flexão do que à compressão, crescendo de forma mais rápida quanto menor o fator.

⁸ Spalling: deslocamento das camadas superficiais do concreto quando tensões internas superam a capacidade resistente do concreto (CASONATO; CAETANO; LIMA, 2003).

3 MATERIAIS E MÉTODO

O fluxograma da Figura 10 mostra um resumo do programa experimental da pesquisa. Está dividido na coleta dos materiais, na caracterização dos insumos e da SDA e nas avaliações feitas nos concretos e argamassas, inclusive com os ensaios realizados.

Figura 10 - Fluxograma do programa experimental.



3.1 Materiais

Foi utilizado o cimento do tipo CP V ARI, por ser o cimento com o menor teor de adições minerais quimicamente passivas (materiais carbonáticos) comercializado na região do estudo. Dessa forma, o comportamento apresentado pelos traços pôde ser avaliado unicamente pela influência das adições de SDA. A Tabela 4 apresenta as propriedades do cimento usado na pesquisa.

Tabela 4 - Propriedades do cimento usado.

Composição Química				Resistência à Compressão			
Perda ao Fogo (%)	Resíduo Insolúvel (%)	SO ₃ (%)	CaO Livre (%)	1 dia (MPa)	3 dias (MPa)	7 dias (MPa)	
4,3	0,95	2,82	0,95	19,37	31,61	38,23	
Finura			Expansibilidade		Pega		Consistência
Massa específica (g/cm ³)	Blaine (cm ² /g)	# 325 (%)	# 200 (%)	Quente (mm)	Início (min)	Fim (min)	Normal (%)
3,11	4548,4	1,69	0,38	1,75	128,33	188,33	28,6

Fonte: Disponibilizado pelo fornecedor do cimento (2018).

A cal usada nos traços de argamassa foi do tipo CH-I, comprada em uma loja de materiais de construção da região. Foi obtido de um calcário sedimentar, de estrutura microcristalina e com dureza de Mohs igual a 3. Sua massa específica é de 2,23 g/cm³, enquanto sua densidade aparente pode variar, segundo dados disponibilizados pelo fornecedor, entre 0,55 e 0,65 g/cm³.

Os agregados miúdo e graúdo usados na pesquisa foram caracterizados a fim de verificar os requisitos da ABNT NBR 7211 (ABNT, 2009). Ambos foram adquiridos em lojas de materiais de construção locais. O resumo de suas propriedades pode ser visto na Tabela 5.

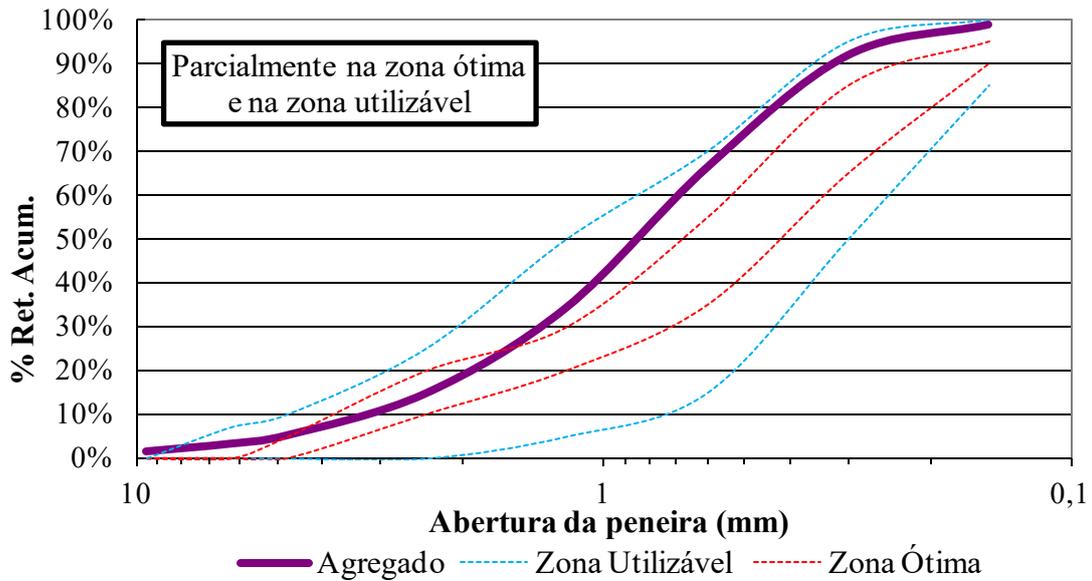
Tabela 5 - Propriedades dos agregados utilizados.

Propriedade	Agregado miúdo da argamassa	Agregado miúdo do concreto	Agregado graúdo
Massa específica (g/cm ³)	2,62	2,62	2,69
Massa unitária solto (g/cm ³)	1,42	1,61	1,40
Massa unitária compactado (g/cm ³)	-	-	1,51
Absorção (%)	0,42	0,42	0,40
Materiais Pulverulentos (%)	-	0,5	-
Teor de argila (%)	-	0,5	-
Impurezas orgânicas	-	Solução mais clara do que a solução padrão	-
Módulo de Finura	2,35	3,14	7,43
Dimensão máxima característica (mm)	1,20	4,75	25,00
Inchamento	1,43	-	-

Fonte: Autor (2018).

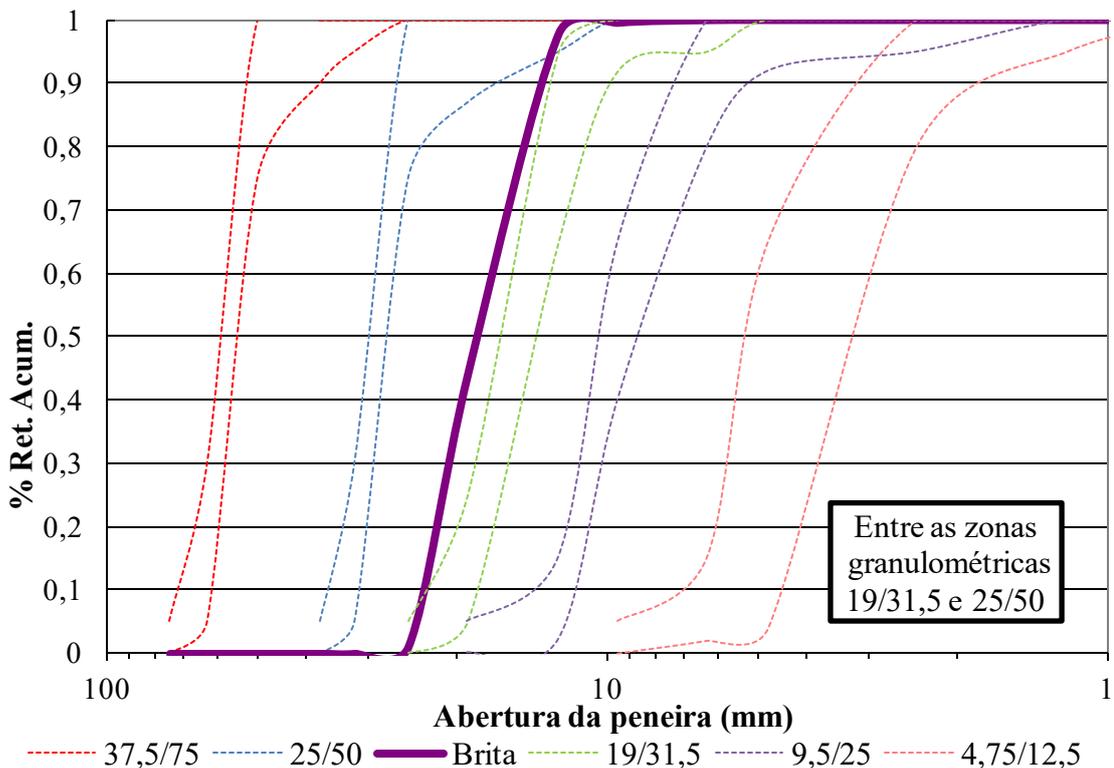
A curva granulométrica do agregado miúdo usado no concreto, uma areia natural, pode ser visto na Figura 11, mostrando que ele se encontra fora da zona ótima, mas ainda dentro da zona utilizável. Já a curva granulométrica do agregado graúdo, uma pedra granítica natural britada, é mostrada pela Figura 12.

Figura 11 - Curva granulométrica do agregado miúdo usado no concreto.



Fonte: Autor (2018).

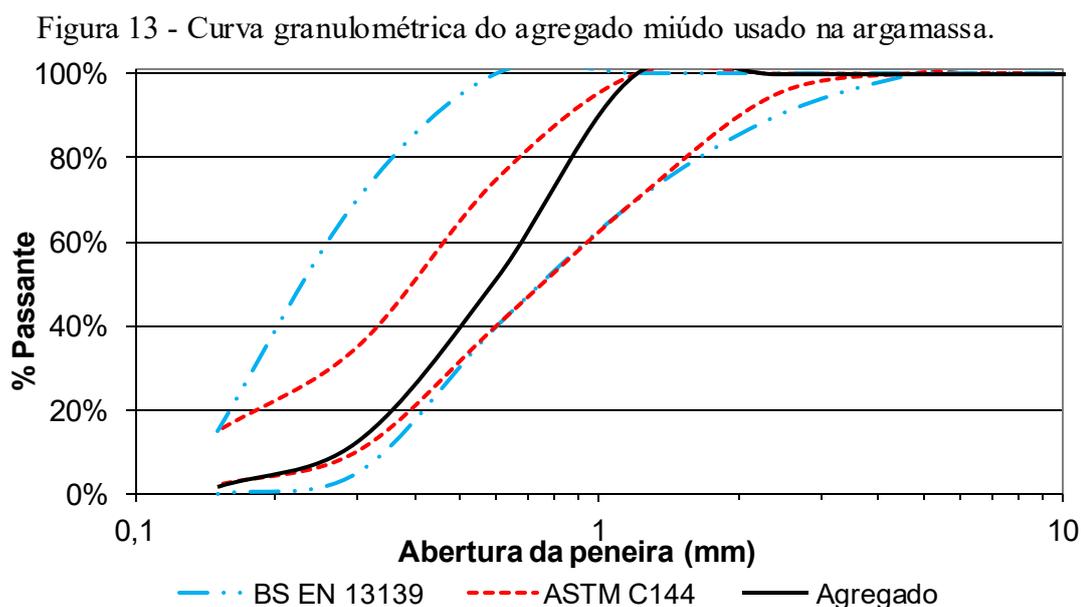
Figura 12 - Curva granulométrica do agregado graúdo usado no concreto.



Fonte: Autor (2018).

A curva do agregado graúdo não se adequa a nenhuma das curvas da ABNT NBR 7211 (ABNT, 2009), se aproximando mais dos limites da zona granulométrica 19/31,5 (limites em verde), o que faz sentido, uma vez que o DMC do agregado é 25 mm. Mesmo não estando dentro de nenhuma zona normativa, tal agregado foi usado por ser empregado comercialmente e muitas vezes não é feito na prática um ajuste granulométrico para uso no concreto.

Como não existe uma norma brasileira que preconize uma faixa granulométrica que um agregado miúdo deve obedecer para ser usado em argamassas, foram utilizadas as normas ASTM C144-03 e BS EN 13139:2013. Para enquadrar a areia já usada no concreto nessas faixas, todo o material retido na peneira de 1,18 mm foi descartado, obtendo a curva mostrada na Figura 13. As propriedades desse agregado após o ajuste granulométrico podem ser vistas na Tabela 5. Além disso, para corrigir os traços para argamassa utilizados em obras, usualmente em volume, precisando ser transformados em massa, foi realizado o ensaio de inchamento da ABNT NBR 6467 (ABNT, 2006).



Fonte: Autor (2018).

A água utilizada para o preparo das soluções para o ensaio de expansão por sulfatos foi destilada, conforme preconiza a norma ABNT NBR 13583 (ABNT, 2014c). Para os demais usos, empregou-se a água tratada oriunda da rede pública de abastecimento local.

Nesta pesquisa, foi utilizado um aditivo superplastificante sintético baseado em polímeros policarboxilatos. Seu uso foi justificado para se conseguir a mesma trabalhabilidade em todos os concretos ao se variar o teor de SDA, mantendo-se a relação água/cimento para todos os traços de concreto.

O resíduo usado, foco deste trabalho, é o *Spray Dryer Ash* (SDA) oriundo da Usina Termelétrica Pecém I (Figura 14-a), fornecido pela empresa Energias de Portugal (EDP). A coleta do material, que está situado no Pátio 2 da usina, onde há uma segregação quanto ao tipo de cinza, ocorreu no dia 03 de abril de 2017. O local da coleta está marcado em vermelho na parte superior direita da Figura 14-b. Para isso, foram usados pás e sacos de rafia, que foram etiquetados e posteriormente enviados para o Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC) da Universidade Federal do Ceará.

Figura 14 – a) Vista geral da UTE do Pecém; b) Local da coleta.

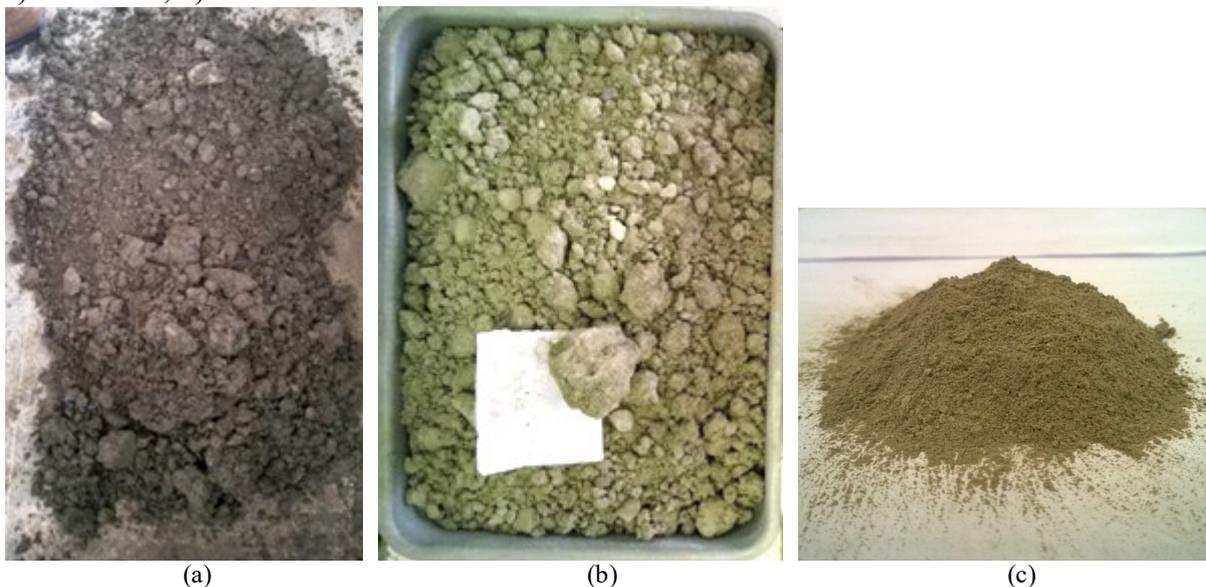


Fonte: Autor (2018).

Como o pátio onde o material em questão é disposto fica a céu aberto, o material se apresenta muito úmido e com vários aglomerados. Para que pudesse ser usado na pesquisa, a amostra de SDA foi homogeneizada, a fim de diminuir a variabilidade quando da execução dos ensaios de caracterização e produção dos insumos a serem testados, e depois foi colocada para secar na estufa do LMCC com a temperatura de 105°C até constância de massa. Foram necessárias 48 h para que a massa se estabilizasse. O material apresentou, em média, 30% de umidade.

Depois de seco, o material ainda permaneceu com boa parte dos aglomerados, tendo que ser destorroado no britador de mandíbula situado no Laboratório de Solos do Departamento de Transportes da UFC. Ao final do processo, a aparência do material é semelhante à de um cimento e relativamente escura, indicando um alto teor de cinzas volantes (Figura 15-a a 15-c). A caracterização física e química desse material pode ser vista em detalhes no item 4.1 deste trabalho.

Figura 15 - Spray Dryer Ash (SDA) da UTE Pecém I: a) SDA úmido, conforme coletado; b) SDA seco; c) SDA seco e destorroadado.

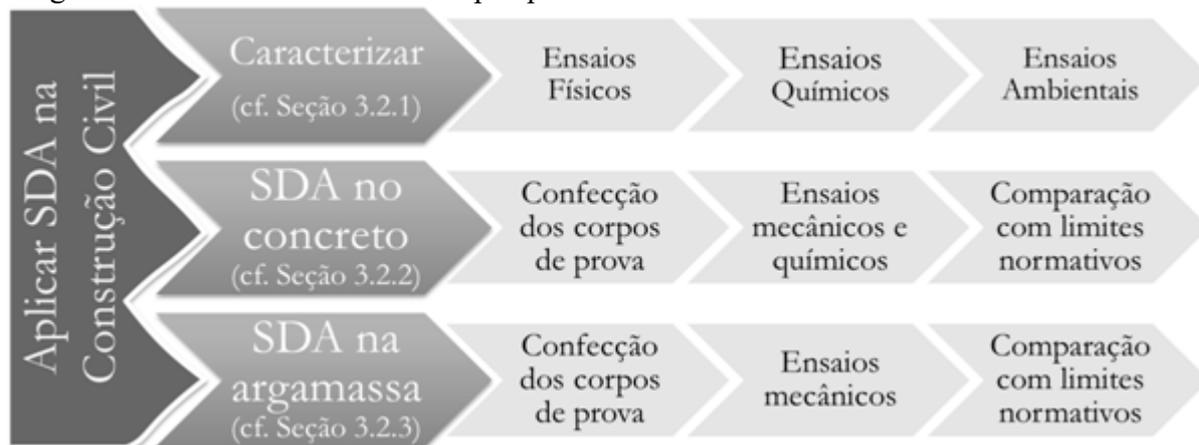


Fonte: Autor (2018).

3.2 Método de pesquisa

A pesquisa se divide em três fases, que estão alinhadas com os objetivos específicos e pode ser representada de forma resumida pela Figura 16.

Figura 16 – Resumo do método de pesquisa



Fonte: Autor (2018).

3.2.1 Caracterização física e química da SDA

A fim de caracterizar a SDA da UTE Pecém I, foram feitos os ensaios da Tabela 6, que indica qual a norma seguida, quando houver, e o local onde foram feitas as análises.

Tabela 6 - Ensaios para caracterização da SDA.

Ensaio	Norma	Local
Massa específica	NBR 16605: 2017	Laboratório de Materiais de Construção Civil (UFC)
Distribuição granulométrica a laser	-	Laboratório da Apodi (Quixeré/CE)
Atividade pozolânica	NBR 5751: 2015	Laboratório de Materiais de Construção Civil (UFC)
Fluorescência e difratometria de raios-X	-	Laboratório de Raios-X (UFC)
Microscopia eletrônica de varredura / espectroscopia por energia dispersiva	-	Central Analítica (UFC)
Índice de desempenho pozolânico	NBR 5752: 2014	Laboratório de Materiais de Construção Civil (UFC)
Lixiviação e Solubilização	NBR 10005: 2004 e NBR 10006: 2004	Laboratório de Saneamento Ambiental (UFC)
Classificação Ambiental	NBR 10004: 2004	Laboratório de Materiais de Construção Civil (UFC)

Fonte: Autor (2018).

A composição química por fluorescência de raios-X foi obtida com o auxílio de um espectrômetro de raios-X *Rigaku ZSX mini II*. Para visualizar a morfologia da SDA, foi usado um microscópio eletrônico de varredura (MEV) *Inspect S50 – FEI*, onde foi possível executar, conjuntamente, uma espectrometria por energia dispersiva (EDS).

Os compostos cristalinos presentes no resíduo foram encontrados utilizando um difratômetro de raios-X de modelo e marca *X'Pert PRO – PANalytical* com *spinner* e geometria *Bragg-Brentano*, operando em modo contínuo com radiação de Co K- α a 40kV e 40mA. Os difratogramas foram obtidos no intervalo 2θ de 5° a 100° e tempo de contagem de 67s, sendo analisado com o programa *X'Pert HighScore Plus* para a identificação de fases e o gráfico foi feito com o OriginPro.

Para obter a curva granulométrica por difração a laser, foi usado um analisador de partículas *Mastersize 2000E (Malvern Instruments)*, com o auxílio de uma unidade de dispersão Scirocco 2000M. Além da SDA, o mesmo procedimento foi seguido com a cal para fins de comparação. Os demais ensaios foram feitos utilizando vidrarias, métodos e equipamentos preconizados pelas normas brasileiras.

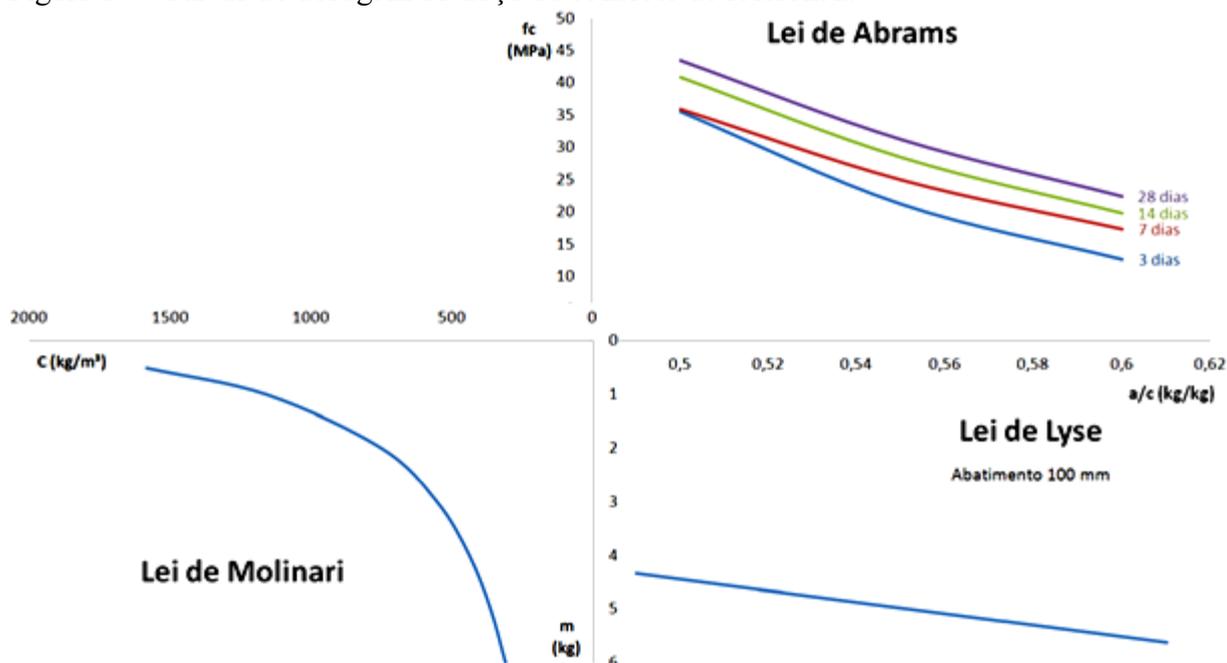
Optou-se por mostrar na tabela de resultados dos extratos lixiviado e solubilizado somente as substâncias presentes nos extratos que possuíam um limite estabelecido pela ABNT NBR 10004 (ABNT, 2004a). Dessa forma, pôde-se fazer a classificação ambiental de forma mais eficiente.

3.2.2 Avaliação da SDA como adição mineral em concreto

Após todos os materiais serem coletados ou adquiridos e, depois, caracterizados, foi feita uma dosagem de concreto para um f_{ck} de 25 MPa e abatimento de 100 ± 20 mm, utilizando um desvio padrão de 4 MPa. Para isso, partiu-se do método de dosagem da ABCP (RODRIGUES, 1995) com diferentes relações água/cimento (a/c) e ensaiaram-se os corpos de prova à compressão em idades pré-determinadas para montar o diagrama de dosagem da Figura 17. Depois disso, verificou-se qual o valor de a/c que resultaria em um f_{ck} de 25 MPa para dar procedimento à execução do traço de referência, que pode ser visto na Tabela 7.

Conforme será visto adiante, no item 4.1, a SDA da UTE Pecém I não atende aos critérios normativos de pozolanicidade, sendo assim, optou-se por utilizá-la como adição mineral, aproveitando seu efeito físico como filler. Foram escolhidos teores de adição de SDA até 20% por ser o limite normativo na Europa (BS 8500 - BSI, 2015). Os teores usados, relativos à massa de cimento, foram os de 0% (referência - R), 5% de adição de SDA (S5), 10% de adição de SDA (S10) e 20% de adição de SDA (S20). A Tabela 8 apresenta a quantidade de SDA adicionada e do aditivo superplastificante usado para um metro cúbico do traço de referência e os respectivos abatimentos obtidos.

Figura 17 - Curvas de dosagem do traço de concreto de referência



Fonte: Autor (2018).

Tabela 7 - Traço de concreto de referência usado (massa por metro cúbico).

Cimento (kg)	Areia (kg)	Brita (kg)	Água (kg)	Aditivo (kg)
377,4	804,3	999,6	200,0	0,3

Fonte: Autor (2018).

Tabela 8 - Massa de cinza, porcentagem de aditivo e abatimento de cada traço.

Identificação do Traço	SDA (kg)	Aditivo (%)	Abatimento (mm)
R	0	0,08%	115
S5	18,9	0,05%	90
S10	37,7	0,11%	80
S20	75,5	0,18%	80

Fonte: Autor (2018).

Foram moldados, para cada traço, 21 corpos de prova cilíndricos de 10 cm de diâmetro por 20 cm de altura, totalizando 84 corpos de prova (Figura 18-a). Em seguida, foram dispostos em cura por imersão em água saturada de cal em tanques em temperatura ambiente, não controlada (Figura 18-b).

Figura 18 - Corpos de prova de concreto: a) moldagem; b) cura.



Fonte: Autor (2018).

Primeiramente foram feitos ensaios de velocidade de propagação de ondas ultrassônicas, com o auxílio de um instrumento ultrassônico *Pundit Lab* da *PROCEQ* (ABNT NBR 8802 - ABNT, 2013a). Cánovas (1988) relaciona essa velocidade com a qualidade do concreto, o que pode ser visto na Tabela 9.

Tabela 9 - Critério Utilizado para a avaliação da qualidade do concreto.

Velocidade de propagação da onda ultrassônica (m/s)	Qualidade do concreto
$V > 4500$	Excelente
$3500 < V < 4500$	Ótimo
$3000 < V < 3500$	Bom
$2000 < V < 3000$	Regular
$V < 2000$	Ruim

Fonte: Cánovas (1988).

Em seguida, aferiu-se a resistividade elétrica superficial usando um instrumento modelo *Resipod* da *PROCEQ* (Figura 19). A Tabela 10 mostra a probabilidade de ocorrência de corrosão de acordo com o valor da resistividade elétrica superficial. Como não é um ensaio normatizado no Brasil, pode-se usar a norma espanhola UNE 83988-2 (AENOR, 2014).

Tabela 10 - Probabilidade de ocorrência de corrosão.

Resistividade ($k\Omega.cm$)	Taxa de corrosão
< 5	Muito alta
5 – 10	Alta
10 – 20	Moderada
>20	Baixa

Fonte: Adaptado de Whiting e Nagi (2003).

Figura 19 - Medição da resistividade elétrica superficial.



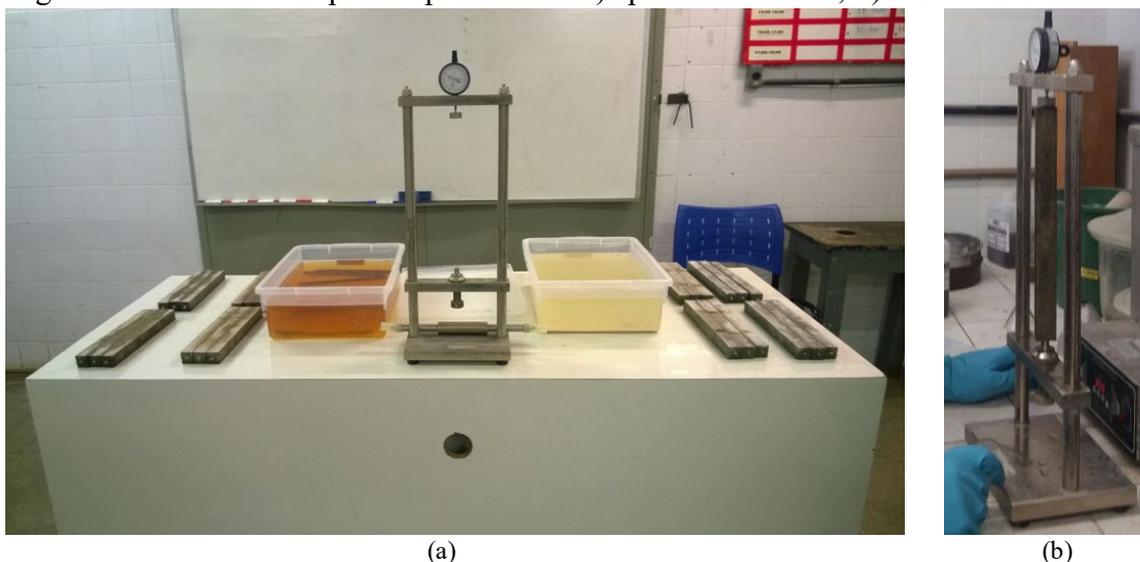
Fonte: Autor (2018).

Foram realizados ainda ensaios de absorção de água por capilaridade, seguindo a ABNT NBR 9779 (ABNT, 2012) e de absorção de água, índice de vazios e massa específica, seguindo a ABNT NBR 9778 (ABNT, 2005a). Para cada ensaio, foram utilizados três corpos de prova por traço.

Pares de corpos de prova foram ensaiados quanto à resistência à compressão aos 3, 7, 28 e 91 dias, conforme ABNT NBR 5739 (ABNT, 2018a). Foi moldado um corpo de prova de reserva para cada idade e traço.

Por existir uma preocupação com uma possível expansão por ataque por sulfatos, devido ao elevado teor de enxofre da SDA, realizaram-se os procedimentos da ABNT NBR 13583 (ABNT, 2014c), a fim de avaliar a variação dimensional das barras, ao serem submetidas a uma solução agressiva de sulfato de sódio (Figura 20). Marciano (1993) propôs o valor limite de 0,03% para essa propriedade: acima desse valor de expansão, um possível ataque por sulfatos é preocupante no concreto avaliado.

Figura 20 - Ensaio de Expansão por sulfato: a) aparato de ensaio; b) barra sendo medida.



Fonte: Autor (2018).

A Tabela 11 apresenta um resumo com os ensaios realizados nos traços de concreto, bem como a norma seguida, os tipos e quantidades de corpos de prova por ensaio e as idades em que cada ensaio foi executado.

Tabela 11 - Resumo dos ensaios nos traços de concreto.

Ensaio	Norma	Tipo de corpo de prova	Quantidade de corpos de prova	Idade dos ensaios
Resistência à compressão	ABNT NBR 5739: 2018	Cilíndrico 10x20 cm	2 por idade	3, 7, 28 e 91 dias
Velocidade de propagação de ondas ultrassônicas	ABNT NBR 8802: 2013	Cilíndrico 10x20 cm	2	28 dias
Resistividade elétrica superficial	UNE 83988-2	Cilíndrico 10x20 cm	2	28 dias
Expansão por sulfato	ABNT NBR 13583: 2014	Prismático 25x25x285 mm	3	14, 28 e 42 dias
Absorção de água, índice de vazios e massa específica	ABNT NBR 9778: 2005	Cilíndrico 10x20 cm	3	28 dias
Absorção de água por capilaridade	ABNT NBR 9779: 2012	Cilíndrico 10x20 cm	3	28 dias

Fonte: Autor (2018).

3.2.3 Avaliação da SDA como substituição da cal em argamassa

O traço usado como referência para este trabalho é de 1:1:6, o mesmo adotado na maior parte das construtoras da região para revestimentos externos, que significa um saco de 50 kg de cimento, um saco de 20 kg de cal e seis padiolas de 45 litros de areia. A quantidade

de água usada no traço foi a necessária para se obter um índice de consistência de 260 ± 5 mm, conforme preconiza a ABNT NBR 16541 (ABNT, 2016b) e aferido de acordo com a ABNT NBR 13276 (ABNT, 2016a).

Para os traços a serem comparados com a referência, procedeu-se com a substituição da cal por SDA da termelétrica do Pecém. Os teores de substituição, em volume, foram de 33%, 67% e 100%. No entanto, para uma maior praticidade e precisão da preparação dos traços em laboratório, a massa da SDA a ser substituída foi pesada, para isso foi aplicada a correção da massa da equação (9), com base na diferença entre as massas específicas da cal e da SDA, de forma a garantir que o volume de cal que foi removido do traço tenha sido substituído por igual volume de SDA.

$$m_{SDA} = m_{cal} \cdot \frac{\gamma_{SDA}}{\gamma_{cal}} \quad (9)$$

Onde m é a massa do material e γ a massa específica.

Os traços resultantes, bem como seus respectivos índices de consistência (IC), são apresentados na Tabela 12. Manteve-se constante a faixa de consistência do traço de referência e alterou-se a massa de água adicionada no traço.

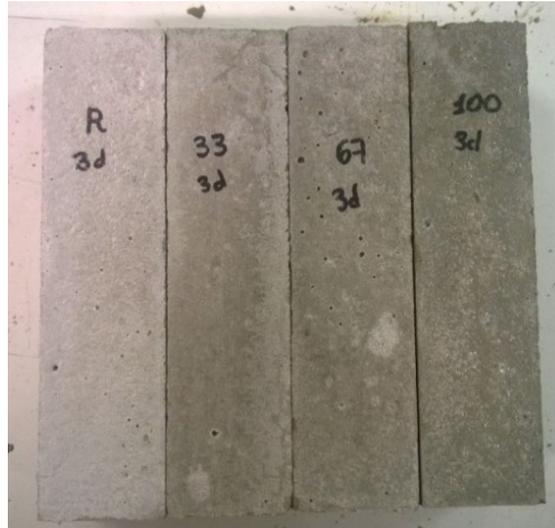
Tabela 12 – Quantidade de material por metro cúbico de argamassa.

	Cimento (kg)	Cal (kg)	SDA (kg)	Areia (kg)	Água (kg)	IC (mm)
Referência (R)	254,4	101,8	-	1364,4	351,1	256
33% de SDA	254,4	67,9	36,5	1364,4	330,8	257
67% de SDA	254,4	33,9	73,0	1364,4	330,8	255
100% de SDA	254,4	-	109,5	1364,4	343,5	263

Fonte: Autor (2018).

Depois de definidos os traços, seguiu-se com a preparação das argamassas segundo a ABNT NBR 16541 (ABNT, 2016b). Para cada mistura, foram moldados 12 corpos de prova prismáticos (Figura 21) segundo a ABNT NBR 13279 (ABNT, 2005d), onde se pode ver a variação da cor à medida em que o teor de SDA aumenta, 12 painéis de 2 cm de espessura sobre blocos cerâmicos (Figura 22) e 2 painéis quadrados de 50 cm de lado e 2 cm de espessura, sendo um aderido em uma parede de alvenaria de blocos cerâmicos (Figura 23-a) e outro em um bloco de concreto com f_{ck} de 20 Mpa e dimensões de 1 x 1 x 1,5 m (Figura 23-b), simulando a situação onde a argamassa está revestindo a estrutura de concreto, teoricamente o pior caso por causa da superfície lisa.

Figura 21 - Variação de cor nos traços.



Fonte: Autor (2018).

Figura 22 - Painéis moldados em blocos cerâmicos.



Fonte: Autor (2018).

Figura 23 - Painéis de argamassa: a) na alvenaria; b) no concreto.



Fonte: Autor (2018).

Para avaliar as propriedades no estado fresco, primeiramente foram aferidos a densidade de massa e o teor de ar incorporado (Figura 24), seguindo a ABNT NBR 13278 (ABNT, 2005c). Em seguida, a retenção de água das argamassas (Figura 25) foi obtida usando a ABNT NBR 13277 (ABNT, 2005b). Por fim, a reologia dos traços foi caracterizada (Figura 26) com os procedimentos da ABNT NBR 15839 (ABNT, 2010b), a saber, o método *squeeze-flow*.

Figura 24 - Ensaio de densidade de massa e teor de ar incorporado.



Fonte: Autor (2018).

Figura 25 - Ensaio de retenção de água.



Fonte: Autor (2018).

Figura 26 - Ensaio de *squeeze-flow*.

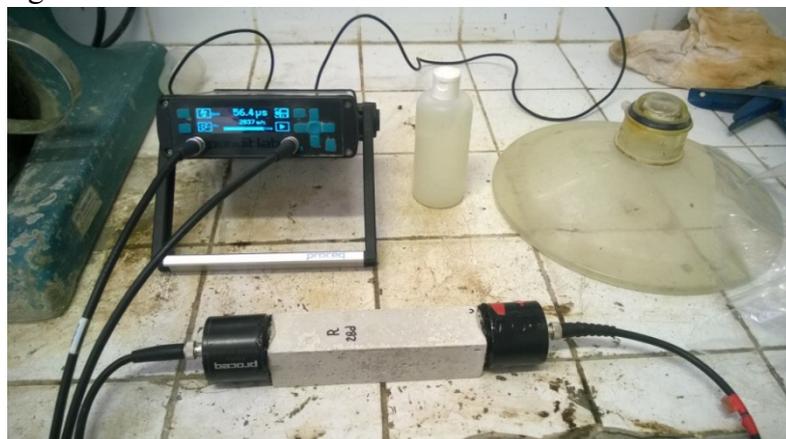


Fonte: Autor (2018).

Já no estado endurecido, a ABNT NBR 13280 (ABNT, 2005e) permitiu calcular a densidade de massa aparente dos traços, enquanto a ABNT NBR 15630 (ABNT, 2008) foi seguida para avaliar o módulo de elasticidade dinâmico por meio da propagação de ondas ultrassônicas (Figura 27).

Foram feitos três ensaios para verificação das propriedades mecânicas das argamassas, a saber, resistência à tração na flexão (Figura 28) e à compressão (Figura 29) e resistência de aderência à tração (Figuras 30-a a 30-c), todos sendo feitos nos mesmos dias e nas mesmas condições ambientais. Os ensaios de resistência à tração na flexão e à compressão foram executados seguindo a ABNT NBR 13279 (ABNT, 2005d). Os rompimentos ocorreram com 3, 7 e 28 dias, com três corpos de prova por idade para a tração na flexão. Após o rompimento, as metades foram ensaiadas à compressão.

Figura 27 - Ensaio de módulo de elasticidade dinâmico.



Fonte: Autor (2018).

Figura 28 - Ensaio de resistência à tração na flexão.



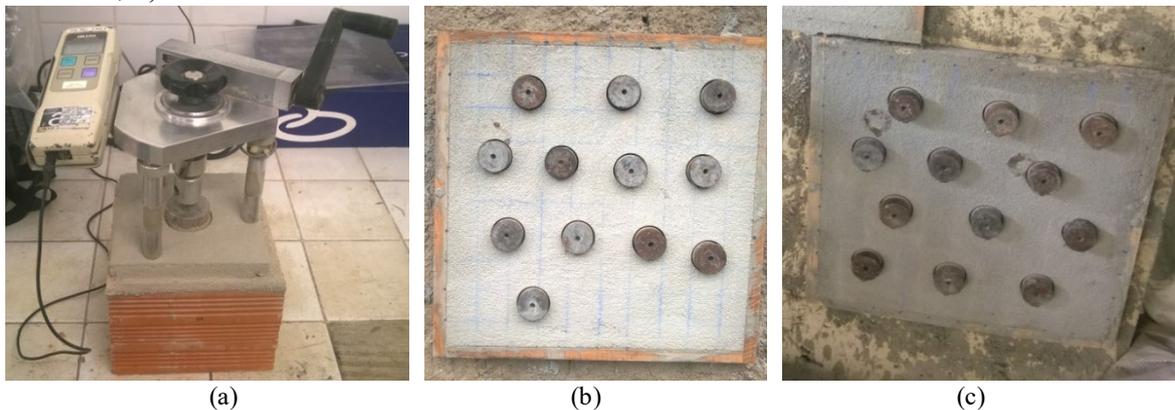
Fonte: Autor (2018).

Figura 29 - Ensaio de resistência à compressão.



Fonte: Autor (2018).

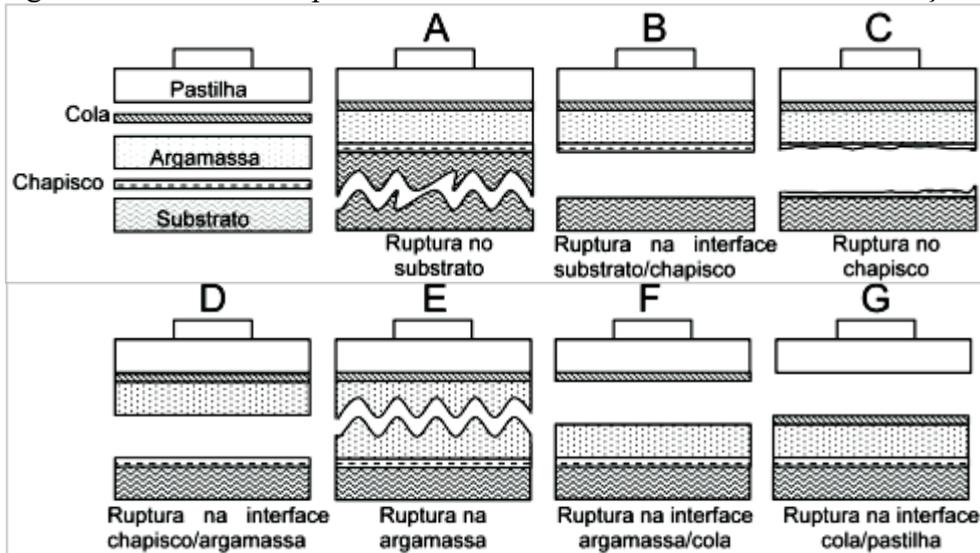
Figura 30 - Ensaio de resistência de aderência à tração: a) no bloco cerâmico; b) na alvenaria; c) na estrutura de concreto.



Fonte: Autor (2018).

A determinação da resistência de aderência à tração foi feita segundo a ABNT NBR 13528 (ABNT, 2010a). Cada painel foi cortado conforme a norma e pastilhas foram coladas para posteriormente serem ensaiadas à tração. Em seguida, avaliou-se se os valores estão dentro dos limites prescritos pela ABNT NBR 13749 (ABNT, 2013b) e quais os modos de ruptura (Figura 31).

Figura 31 - Modos de ruptura no ensaio de resistência de aderência à tração.



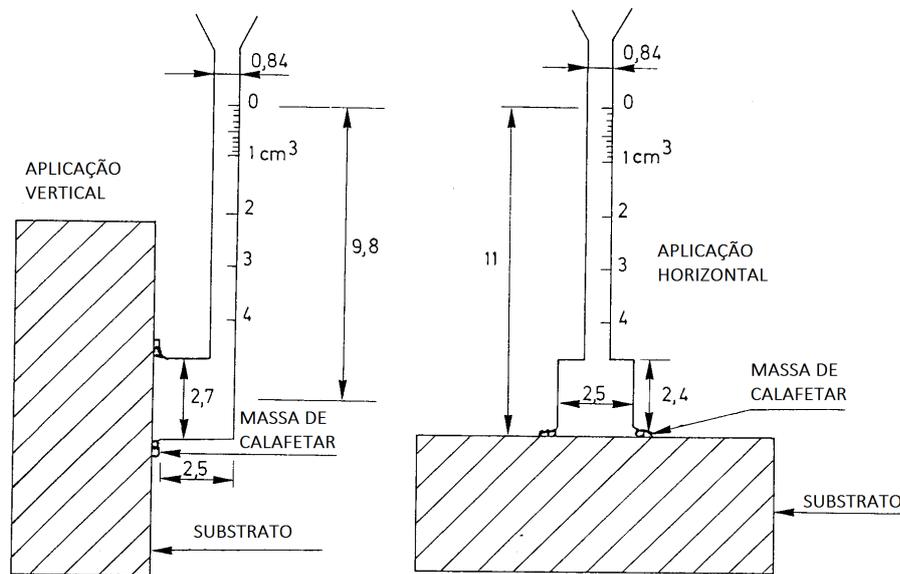
Fonte: ABNT NBR 13528 (ABNT, 2010a).

Legenda: modos de ruptura tipo: B e D – valor da aderência igual ao obtido no ensaio; G – resultado desprezado; demais tipos – valor da aderência maior que o obtido no ensaio.

Por fim, foram feitos ensaios que estão relacionados com a durabilidade da argamassa, todos sendo feitos nos mesmos dias e nas mesmas condições ambientais. A determinação da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade foi feita seguindo os passos da NBR 15259 (ABNT, 2005g). Para a permeabilidade, foram usados tubos Rilem, também conhecidos como método do cachimbo ou tubos de *Karsten*⁹. Foram seguidos os procedimentos do teste nº II.4 da Rilem Commission 25-PEM (RILEM, 1980). Nele, vidrarias como as da Figura 32 são coladas na argamassa e preenchidas com água, anotando-se o decréscimo da coluna de água com o tempo. A permeabilidade (Figura 33-a) e a fissuração (Figura 33-b) foram analisadas aos 28 dias nos painéis de 0,5 x 0,5 m moldados na parede de alvenaria. Além disso, a ABNT NBR 15261 (ABNT, 2005h) foi utilizada para analisar a variação dimensional das argamassas, cuja medição é semelhante à da Figura 20, para verificar se houve expansão ou retração linear.

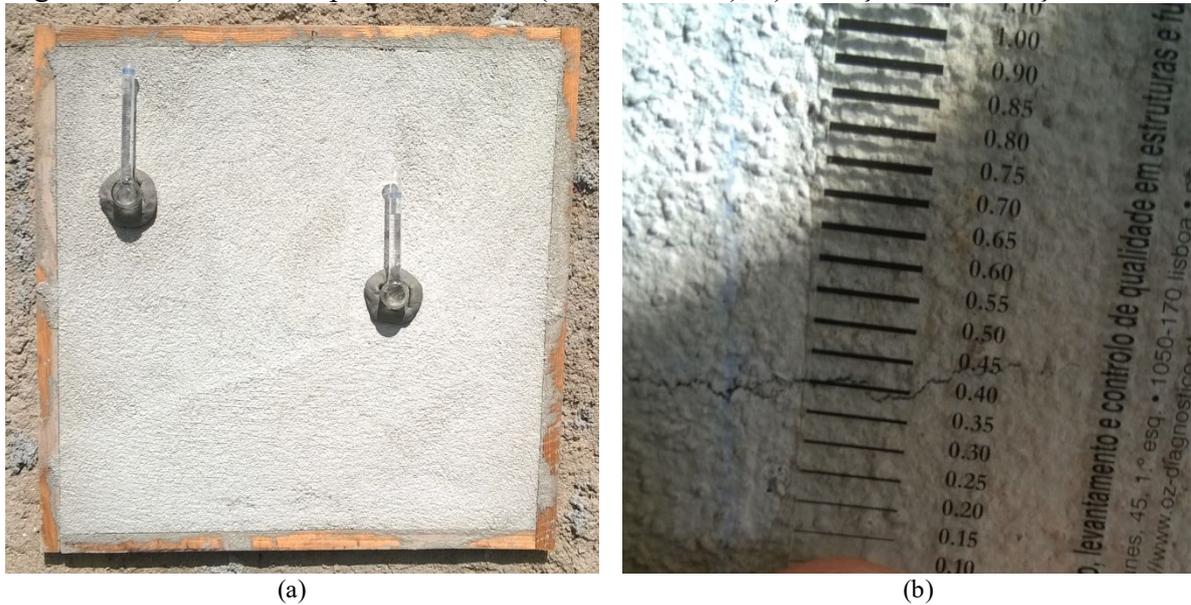
⁹ KARSTEN R. Zur Frage einer Prüfung von Mörtel auf Wasserdichtigkeit. **Das Baugewerbe**, v. 43, n. 13, p. 885 – 886, 1963.

Figura 32 - Vidrarias usadas no ensaio de permeabilidade (tubos Rilem).



Fonte: Adaptado do teste nº II.4 da Rilem Commission 25-PEM (RILEM, 1980).

Figura 33 – a) Ensaio de permeabilidade (tubo de Rilem); b) Medição da fissuração.



Fonte: Autor (2018).

A Tabela 13 apresenta um resumo com os ensaios realizados nos traços de argamassa de revestimento externo, bem como a norma seguida, os tipos e quantidades de corpos de prova por ensaio e as idades em que cada ensaio foi executado.

Tabela 13 - Resumo dos ensaios nos traços de argamassa de revestimento externo.

Ensaio	Norma	Tipo de corpo de prova	Quantidade de corpos de prova	Idade dos ensaios
Resistência à compressão e à tração na flexão	ABNT NBR 13279: 2005	Prismático 4x4x16 cm	3	3, 7 e 28 dias
Variação dimensional e mássica	ABNT NBR 15261: 2005	Prismático 25x25x285 mm	3	1, 7 e 28 dias
Módulo de elasticidade dinâmico	ABNT NBR 15630: 2008	Prismático 4x4x16 cm	3	28 dias
Resistência de aderência à tração	ABNT NBR 13528: 2010	Painéis de 20x20x2 cm ou 50x50x2 cm	1 de cada tipo	28 dias
Retenção de água	ABNT NBR 13277: 2005	Cilíndrico 201x14 mm	1	Estado fresco
Absorção por capilaridade	ABNT NBR 15259: 2005	Prismático 4x4x16 cm	3	28 dias
Fissuração	-	Painel de 50x50x2 cm	1	28 dias
Permeabilidade (tubo Rilem)	Teste nº II.4 (Rilem Commission 25-PEM)	Painel de 50x50x2 cm	2 amostras por painel	28 dias
<i>Squeeze-Flow</i>	ABNT NBR 15839: 2010	Cilíndrico 100x10 mm	1	Estado fresco
Densidade de massa aparente	ABNT NBR 13280: 2005	Prismático 4x4x16 cm	3	28 dias
Densidade de massa e teor de ar incorporado	ABNT NBR 13278: 2005	Cilíndrico 83x83 mm	1	Estado fresco

Fonte: Autor (2018).

3.3 Método de análise dos resultados

Para análise dos resultados, foi utilizada a análise de variância (ANOVA), com o auxílio do software MS Excel. O intervalo de confiança adotado foi de 95%. Com essa ferramenta, pode-se verificar se a diferença entre as médias entre grupos é significativa.

A fim de verificar qual a parcela do resultado pode ser explicada pela variação do teor de SDA, dividiu-se a soma de quadrados (SQ) da variação entre os traços pela soma de quadrados da variação total (dentro de cada traço e entre os traços). O restante da variação que não pode ser explicada pelo teor de SDA é chamado de resíduo. Esse cálculo estatístico é chamado de coeficiente de explicação (SANTANA, 2018).

Ao ser constatado pela ANOVA que há uma diferença significativa entre as médias dos grupos, o teste de Turkey é aplicado para verificar quais os grupos diferem dos

demais, ao comparar cada par e reunir grupos com médias significativamente semelhantes. Esse teste é feito com o auxílio do software PAST (HAMMER; HARPER; RYAN, 2001). Todas as tabelas contendo as análises feitas nesta pesquisa podem ser encontradas no APÊNDICE A – ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS.

Por fim, quando a quantidade de amostras disponíveis foi insuficiente para se fazer uma ANOVA, fez-se uma análise por meio do coeficiente de correlação de Pearson. Após o cálculo do coeficiente, classificou-se a correlação de acordo com Hinkle, Wiersma e Jurs (2003 apud MUKAKA, 2012). A Tabela 14 apresenta as classes de correlação existentes.

Tabela 14 - Classificação da correlação.

Coeficiente de Pearson	Inte rpretação
0,9 a 1,0 (-0,9 a -1,0)	Correlação positiva (negativa) muito alta
0,7 a 0,9 (-0,7 a -0,9)	Correlação positiva (negativa) alta
0,5 a 0,7 (-0,5 a -0,7)	Correlação positiva (negativa) moderada
0,3 a 0,5 (-0,3 a -0,5)	Correlação positiva (negativa) baixa
0,0 a 0,3 (0,0 a -0,3)	Correlação desprezível

Fonte: Adaptado de Hinkle, Wiersma e Jurs (2003 apud MUKAKA, 2012).

4 APRESENTAÇÃO, ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4.1 Caracterização física e química da SDA

Os resultados da caracterização física e química da SDA estão apresentados na Tabela 15.

Tabela 15 - Caracterização da SDA.

Propriedade	Valor
Massa específica	2,40 g/cm ³
Superfície específica	2,29 m ² /g
Índice de desempenho pozolânico com cimento Portland aos 28 dias	97%
Atividade pozolânica com cal aos 7 dias	11,8 MPa

Fonte: Autor (2018).

Pode-se notar que a massa e a superfície específica estão dentro dos limites apresentados pela literatura, que estão, respectivamente, entre 2,09 e 3,71 g/cm³, e entre 0,2 e 16 m²/g (ERPI, 2007; HEEBINK et al., 2007). O índice de desempenho pozolânico com cimento Portland aos 28 dias e a atividade pozolânica com cal aos sete dias da SDA obtidos apresentaram valores superiores aos mínimos preconizados pela ABNT NBR 12653 (ABNT, 2014b), respectivamente 90% e 6 MPa. Fato semelhante ao ocorrido na pesquisa de Tsimas e Moutsatsou-Tsima (2005).

Para a classificação ambiental contida na ABNT NBR 10004 (ABNT, 2004a) foi montada a Tabela 16, cujos valores dos extratos lixiviados e solubilizados foram obtidos com os procedimentos da ABNT NBR 10005 (ABNT, 2004b) e 10006 (ABNT, 2004c).

Tabela 16 - Extratos lixiviado e solubilizado da SDA.

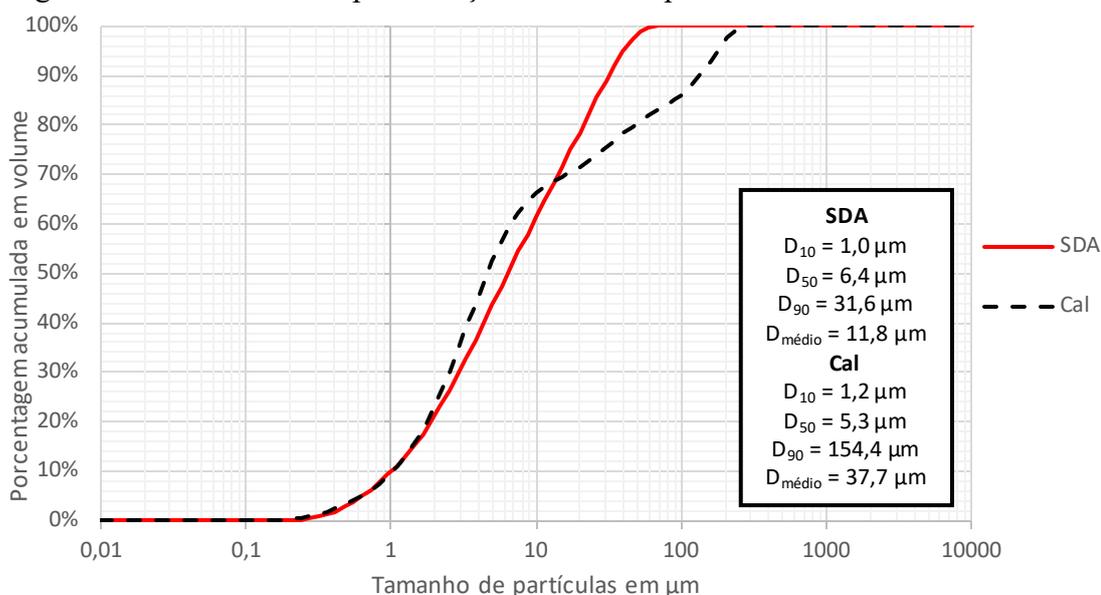
	Extrato Lixiviado (pH = 6,59)			Extrato Solubilizado (pH = 7,55)			
	Cádmio	Chumbo	Cromo	Ferro	Fluoreto	Nitrato	Sulfato
Valores encontrados (mg/L)	0,018	0,815	0,023	0,01	8,13	7,00	26,42
Valores limite (mg/L)	0,50	1,00	5,00	0,30	1,50	10,00	250,00

Fonte: Autor (2018).

Como a concentração das substâncias contidas no extrato lixiviado são todas inferiores ao valor limite, pode-se dizer que o resíduo é não perigoso. Do pH dos extratos, percebe-se que são não corrosivos segundo a norma, pois estão entre 2 e 12,5. Por fim, como a concentração de fluoreto foi superior ao valor limite, conclui-se que o resíduo é não inerte. Portanto, a SDA está contida nos resíduos de classe II-A, não perigosos e não inertes. Tal classificação aquiesce com a encontrada na pesquisa de Silva (2017).

A Figura 34 ilustra a composição das frações da SDA obtida por granulometria por difração a laser, mostrando um material muito fino, com partículas menores que 100 μm . A título de comparação, uma vez que parte da pesquisa substituiu a cal por SDA, é mostrada, no mesmo gráfico, a curva granulométrica da cal utilizada na pesquisa.

Figura 34 - Granulometria por difração a laser comparando SDA e cal.



Fonte: Autor (2018).

Pode-se ver que nas frações mais finas, as curvas são semelhantes, mas na medida em que as partículas aumentam de tamanho, vê-se que a SDA é mais fina. Isso também pode ser observado pela superfície específica, que é de 2,19 m^2/g na cal e 2,29 m^2/g na SDA, e pelo diâmetro D_{90} , que é cerca de cinco vezes menor na SDA. As dimensões das partículas encontradas estão dentro dos limites apresentados na pesquisa de Heebink et al. (2007), que apresentaram diâmetros médios entre 2 e 45 μm .

A partir do FRX (Tabela 17), nota-se que a SDA não pode ser classificada como um material pozolânico classe C, segundo a NBR 12653 (ABNT, 2014b), pois a soma dos óxidos de ferro, alumínio e silício é de 52,45%, inferior ao mínimo de 70% da norma. Da mesma forma, a porcentagem de óxido de enxofre presente é de 7,85%, superando o limite de 5% preconizado. Essas características são semelhantes às indicadas na pesquisa de Yamei, Wei e Lianfei (1997). Dessa forma, ainda que os dados da Tabela 15 apresentem um bom desempenho pozolânico, optou-se por usar, no concreto, a SDA como adição mineral, aproveitando-se de seu efeito filer. Na argamassa, seguindo a base do trabalho de Sampaio (2017), a SDA foi usada como substituição da cal.

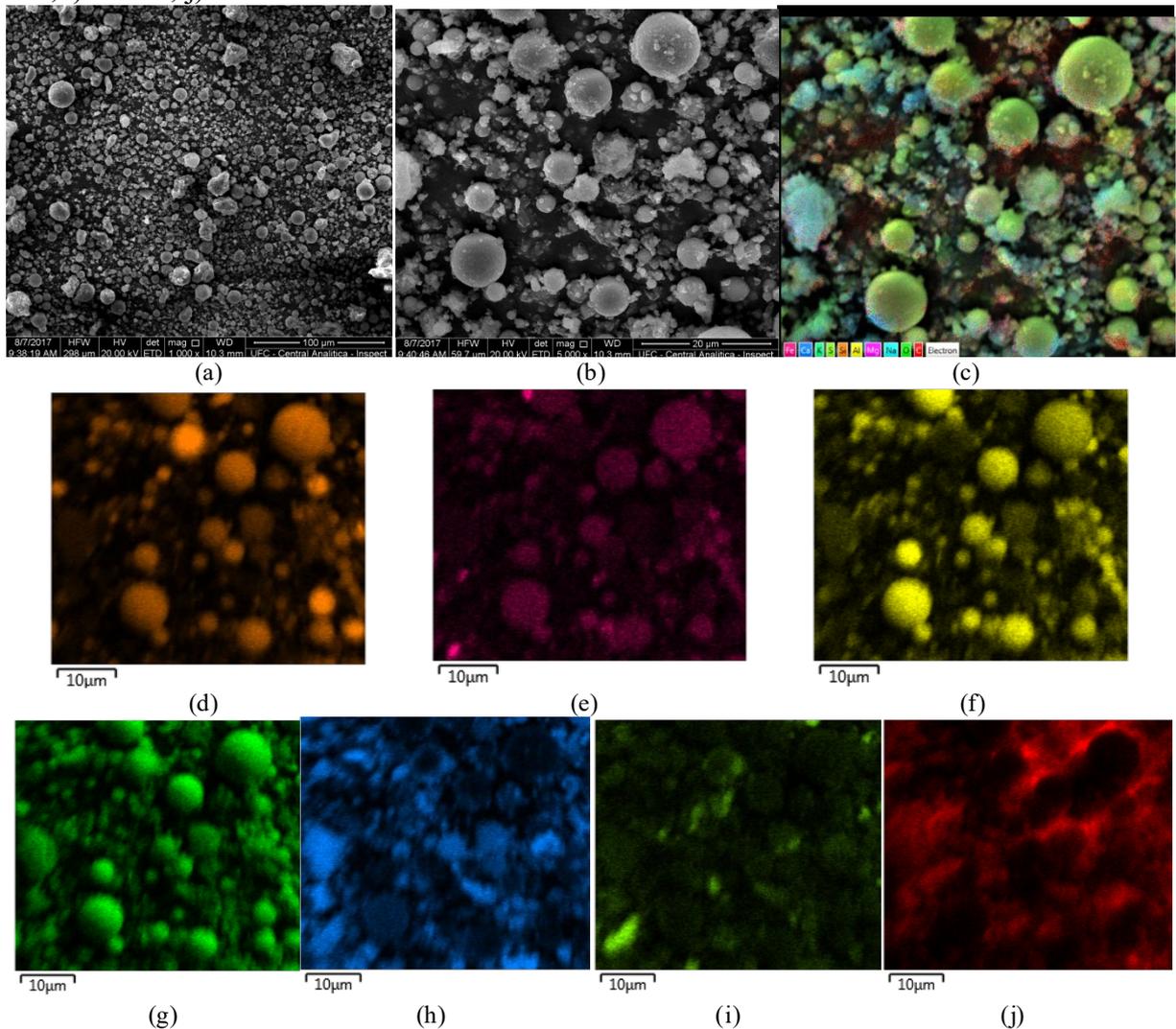
Tabela 17 - Composição química da SDA.

Elemento	Porcentagem em massa
CaO	35,4
SiO ₂	24,0
Fe ₂ O ₃	22,9
SO ₃	7,9
Al ₂ O ₃	5,4
K ₂ O	2,1
TiO ₂	1,9
SrO	0,4

Fonte: Autor (2018).

Ao observar as imagens geradas pela microscopia eletrônica de varredura com espectroscopia de energia dispersiva (MEV/EDS) percebem-se partículas esféricas típicas das cinzas volantes convencionais, mas com incrustações sulfurosas (Figuras 35-a a 35-j).

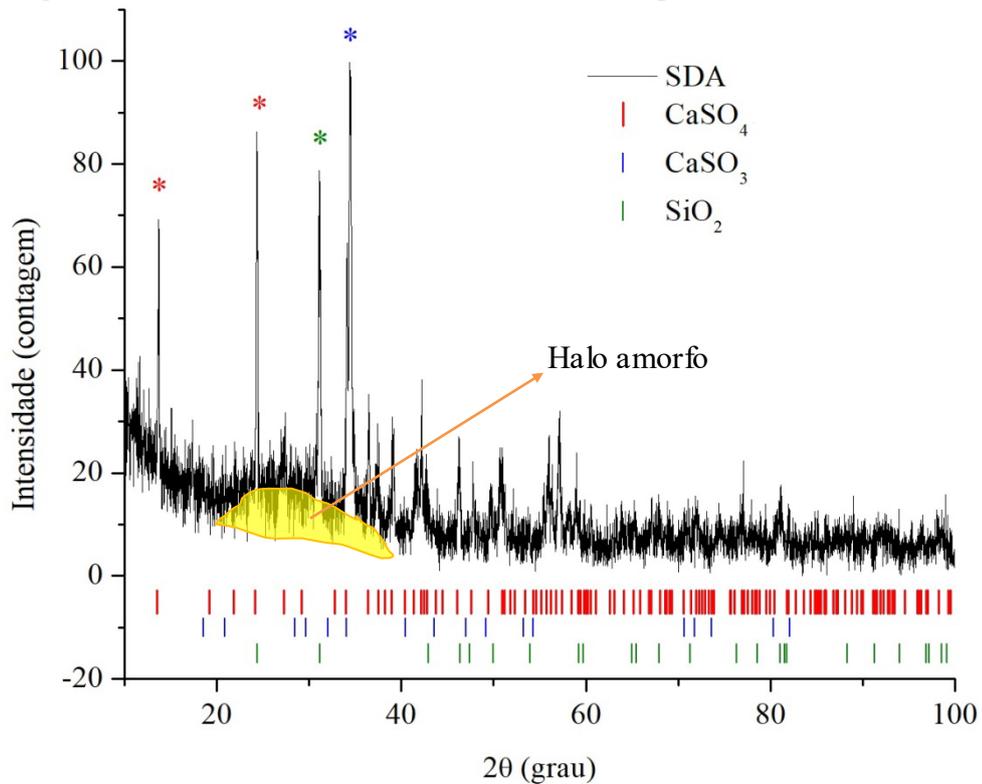
Figura 35 - Microscopia eletrônica de varredura da SDA (MEV): a) visão geral; b) zoom aplicado; c) mapa de elementos (EDS); d) Si K α 1; e) Fe K α 1; f) Al K α 1; g) O K α 1; h) Ca K α 1; i) S K α 1; j) C K α 1.



Fonte: Autor (2018).

Ao analisar o difratograma de raios-X (DRX) da SDA (Figura 36), vê-se que as fases mais significativas são de óxido de silício (SiO_2), sulfito e sulfato de cálcio (CaSO_3 e CaSO_4), estes últimos são os responsáveis pelo elevado teor de enxofre no resíduo. No entanto, é válido lembrar que este ensaio só detecta as fases cristalinas da amostra. A fase amorfa não é mostrada como picos no difratograma, no entanto, um possível halo amorfo¹⁰ pode ser visto entre 20° e 40° , uma característica comum em materiais com propriedades pozolânicas, segundo Hoppe Filho (2008).

Figura 36 - Elementos cristalinos da SDA obtidos por DRX.



Fonte: Autor (2018).

¹⁰ Relevo no gráfico de DRX distribuído em grande amplitude angular (2θ) gerado pelo espalhamento em várias direções dos raios X devido a distribuição randômica de seus átomos (YELLA REDDY, 2015).

4.2 Resultados da avaliação da SDA como adição mineral em concreto

Os resultados médios (M) e os desvios-padrão (Sd) dos ensaios realizados nos corpos de prova dos concretos de referência e com adições de SDA estão apresentados na Tabela 18 e serão analisados nos itens a seguir. Os dados brutos de cada ensaio podem ser encontrados no APÊNDICE B deste trabalho.

Tabela 18 - Resultados médios dos ensaios nos concretos.

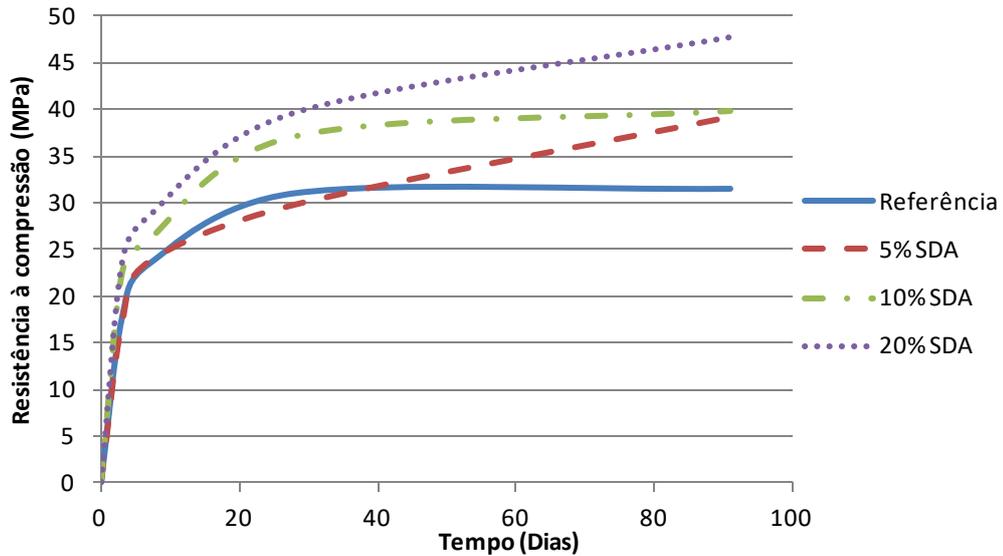
Propriedade	R		S5		S10		S20	
	M	Sd	M	Sd	M	Sd	M	Sd
Resistência à compressão - 3 dias (MPa)	17,6	0,8	17,0	0,1	22,3	0,7	23,4	1,5
Resistência à compressão - 7 dias (MPa)	23,4	1,8	23,7	0,3	26,0	0,0	28,6	2,1
Resistência à compressão - 28 dias (MPa)	31,0	2,3	29,7	1,4	37,0	2,5	39,6	1,3
Resistência à compressão - 91 dias (MPa)	31,5	4,5	39,2	1,2	39,8	5,3	47,7	2,7
Resistividade elétrica superficial (kΩ.cm)	11,8	0,1	14,7	0,2	16,5	0,5	23,3	0,3
Velocidade de propagação das ondas ultrassônicas (m/s)	5043,3	19,3	5095,3	36,8	5078,2	18,1	5125,0	27,3
Absorção de água por imersão (%)	5,9%	0,0	5,4%	0,0	5,2%	0,0	5,4%	0,0
Absorção de água por capilaridade (g/cm ²)	0,56	0,58	0,55	0,29	0,59	0,29	0,56	0,29
Índice de vazios (%)	13,3%	0,0	12,4%	0,0	12,0%	0,0	12,4%	0,0
Massa específica (g/cm ³)	2,25	0,01	2,28	0,01	2,29	0,01	2,28	0,01
Expansão por sulfato externo (%)	0,012	0,004	0,009	0,034	0,008	0,012	0,006	0,003
Expansão por sulfato interno (%)	0,002	0,006	0,017	0,026	0,011	0,000	0,005	0,002

Fonte: Autor (2018).

4.2.1 Análise dos resultados de resistência à compressão

Na Figura 37 tem-se a evolução da resistência à compressão de cada traço de concreto no tempo. Nela, pode-se observar uma tendência de aumento da resistência na medida em que a adição de SDA se eleva. Tal fato, nas idades iniciais, pode ser justificado pelo efeito filler que o resíduo exerce no concreto, preenchendo a matriz e a tornando mais compacta e resistente.

Figura 37 - Evolução da resistência à compressão com o tempo.



Fonte: Autor (2018).

A Tabela 19 apresenta a significância da diferença entre as médias obtidas nos ensaios de resistência à compressão nos traços de concreto, em cada idade, ao se alterar o teor de adição de SDA:

Tabela 19 - Significância da diferença de resistência à compressão no concreto.

Propriedade	Significância
Resistência à compressão - 3 dias	Significativo
Resistência à compressão - 7 dias	Não Significativo
Resistência à compressão - 28 dias	Significativo
Resistência à compressão - 91 dias	Não Significativo

Fonte: Autor (2018).

Aos 3 dias de idade, a diferença entre as médias foi significativa, com o teor de SDA explicando 95% da variação, segundo a análise de variância mostrada na Tabela A1. Ao efetuar o teste de Turkey, viu-se que existem dois grupos de resistência (Tabela A2): num primeiro grupo, estão os traços R e S5, no outro, S10 e S20. O que implica dizer que, nessa idade, a SDA só passa a fazer efeito significativo no sentido de aumentar a resistência à compressão, a partir de 10% de adição com relação à massa de cimento.

Aos 7 dias de idade, a diferença entre as médias não foi significativa, segundo a análise de variância mostrada na Tabela A3. Isso implica dizer que, nessa idade, a SDA não influenciou na resistência à compressão.

Com 28 dias de idade, a diferença entre as médias foi significativa, com o teor de SDA explicando 90% da variação, segundo a análise de variância mostrada na Tabela A4. Ao efetuar o teste de Turkey (Tabela A5), viu-se que os traços S10 e S20 possuem médias semelhantes entre si, mas diferente dos demais, sendo mais resistentes.

Aos 91 dias de idade, a princípio, a diferença entre as médias não foi significativa, segundo a análise de variância mostrada na Tabela A6, mas como os valores estavam visualmente discrepantes e o parâmetro F estava muito próximo ao F crítico, foi efetuado o teste de Turkey (Tabela A7), que mostrou que apenas o traço S20 tem média significativamente diferente do traço de referência, sendo mais resistente.

Vê-se que, após os 28 dias, o traço de referência continua próximo do f_{cj} dosado, 31,6 MPa, enquanto os traços com SDA tendem a um aumento de resistência. Isso pode estar ligado a reações pozolânicas, pois, mesmo não podendo ser classificado como pozolana Classe C por causa de alguns parâmetros normativos, a SDA mostrou desempenho satisfatório nos parâmetros de resistência (Tabela 15). Outra explicação para o aumento da resistência é a densificação da matriz ao preencher os poros com etringita, conforme verificado por Yamei, Wei e Lianfei (1997).

Ao analisar a evolução de um modo geral, pode-se dizer que a SDA influenciou positivamente a resistência à compressão nos concretos estudados. As resistências se mantiveram semelhantes ou acima dos valores obtidos para o traço de referência. Resultados semelhantes foram encontrados em diversos estudos como o de Tsimas e Moutsatsou-Tsima (2005).

4.2.2 Resistividade elétrica superficial

Na Tabela 18 podem ser vistas as resistividades elétricas superficiais dos traços de concreto analisados. A Tabela 20 apresenta a significância da variação entre as médias obtidas nos ensaios de resistividade elétrica superficial nos traços de concreto.

Tabela 20 - Significância da diferença de resistividade elétrica superficial do concreto.

Propriedade	Significância
Resistividade elétrica superficial	Significativo

Fonte: Autor (2018).

A propriedade teve diferenças significativas entre suas médias (Tabela A9), com o teor de SDA explicando 100% da variação, e o teste de Turkey (Tabela A10) mostrando que

todas as médias são diferentes entre si, o que permite inferir que o aumento do teor de SDA aumenta a resistividade elétrica superficial. Segundo Whiting e Nagi (2003), no traço S20 há uma probabilidade baixa de haver corrosão das armaduras, enquanto os demais apresentam probabilidades moderadas (Tabela 10).

Não foram encontrados na literatura estudos relacionando a resistividade elétrica e adições de SDA em concreto, portanto, como forma de comparação, foi verificado o efeito da adição de cinzas volantes, uma vez que esse material representa grande parte da composição de uma SDA. Silva e de Brito (2013) mostraram que a adição de cinzas volantes melhora significativamente essa propriedade, especialmente em idades mais avançadas. Outra pesquisa onde ocorreu esse comportamento foi na de Nokken et al. (2008). Burden (2006) comenta que esse aumento na resistividade ocorre pela diminuição da permeabilidade ocasionada pelas reações pozolânicas.

4.2.3 Velocidade de propagação de onda ultrassônica

Na Tabela 18 podem ser vistas velocidades de propagação de ondas ultrassônicas nos traços de concreto analisados, onde se mostra, a priori, uma tendência de melhora dessa propriedade com a adição de SDA. A Tabela 21 apresenta a significância da variação entre as médias obtidas nos ensaios de velocidade de propagação de ondas ultrassônicas nos traços de concreto.

Tabela 21 - Significância da diferença de velocidade de propagação de onda ultrassônica no concreto.

Propriedade	Significância
Velocidade de propagação de ondas ultrassônicas	Não Significativo

Fonte: Autor (2018).

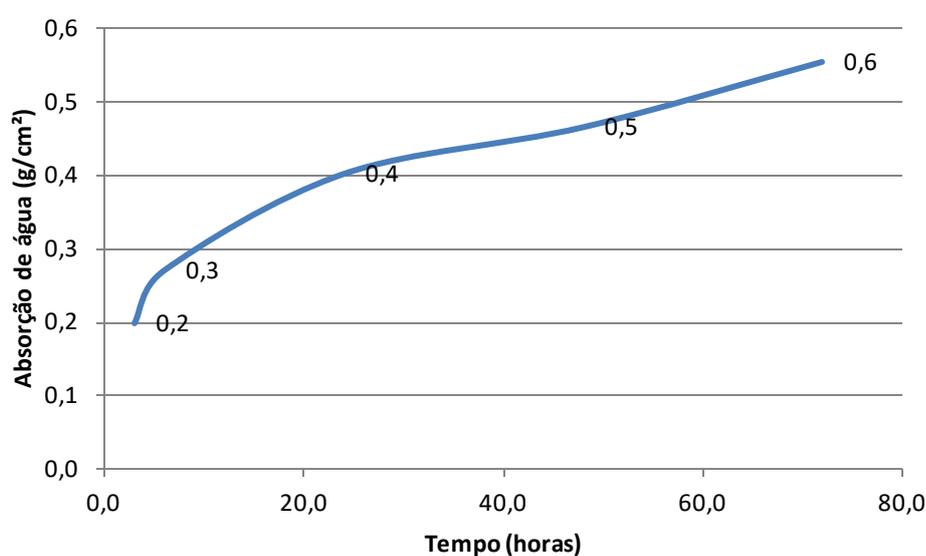
Todos os traços são de excelente qualidade, pois segundo Cánovas (1988), possuem velocidades de propagação superiores a 4500 m/s. Ao fazer uma análise de variância (Tabela A8), viu-se que as diferenças entre as médias não são significativas, portanto, a adição de SDA não influenciou nessa propriedade.

Estudos anteriores como os de Yamei, Wei e Lianfei (1997) já mostraram que a SDA diminui os poros da matriz, deixando o concreto mais maciço, sendo assim, era de se esperar que houvesse um aumento na velocidade de propagação das ondas ultrassônicas, como ocorreu na pesquisa de Demirboğa, Türkmen e Karakoc (2004).

4.2.4 Absorção de água

A Tabela 18 mostra uma pequena variação na absorção por capilaridade entre os traços em estudo. Quando arredondados ao décimo mais próximo, como preconiza a norma, todos os traços apresentaram exatamente os mesmos valores (Figura 38), portanto, a adição de SDA não teve influência nessa propriedade, um comportamento inicialmente anômalo, uma vez que era esperado que a SDA diminuísse a absorção por capilaridade pelo efeito da densificação da matriz, mas uma explicação possível é o fato desse valor já ser muito baixo no traço de referência, quando comparados com os valores obtidos por Vieira (2005) e Neto (2011). No entanto, Olivia e Nikraz (2011) obtiveram comportamento semelhante ao verificar que a penetrabilidade de concretos com cinzas volantes não diferiu significativamente dos traços de referência. Neste trabalho, apenas notaram-se diferenças nas alturas de ascensão capilar, mas como é uma medida muito imprecisa, a mercê da acuidade visual do operador e de difícil contraste, foram desconsideradas.

Figura 38 - Absorção de água por capilaridade.



Fonte: Autor (2018).

A Tabela 22 apresenta a significância da variação entre as médias obtidas nos ensaios de absorção de água por imersão nos traços de concreto:

Tabela 22 - Significância da diferença de absorção de água por imersão no concreto.

Propriedade	Significância
Absorção de água por imersão	Significativo

Fonte: Autor (2018).

A absorção de água por imersão, que também pode ser vista na Tabela 18, apresenta uma diferença significativa nas médias (Tabela A11), com o teor de SDA explicando 83% da variação. Por Turkey (Tabela A12) vê-se que todos os traços com SDA são significativamente diferentes do traço de referência, permitindo perceber que a adição de SDA melhorou os traços de concreto com relação a essa propriedade.

Mehta e Monteiro (2014) afirmam que adições minerais diminuem a porosidade da matriz e da zona de transição, melhorando assim a estanqueidade dos concretos. Tal afirmação foi verificada por diversos autores como Olivia e Nikraz (2011).

4.2.5 Índice de vazios e massa específica

A Tabela 23 apresenta a significância da variação entre as médias obtidas nos ensaios de índice de vazios e massa específica nos traços de concreto:

Tabela 23 - Significância da diferença do índice de vazios e da massa específica no concreto.

Propriedade	Significância
Índice de vazios	Significativo
Massa específica	Significativo

Fonte: Autor (2018).

Fato semelhante ao ocorrido com a absorção de água por imersão foi observado no índice de vazios e na massa específica, ou seja, os traços com SDA se mostraram significativamente diferentes do traço de referência, o que pode ser visto nas Tabelas A13 até A16. O aumento da massa específica e diminuição do índice de vazios são condizentes com a densificação da matriz pela formação de etringita proposta por Yamei, Wei e Lianfei (1997), além do efeito físico que a SDA pode ter ocasionado ao ser usada como filler (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

4.2.6 Expansão por sulfato

A Tabela 18 apresenta a variação dimensional aos 42 dias de barras sujeitas à solução agressiva de sulfato de sódio. Da tabela, percebe-se que o ataque por sulfatos externos não será um problema, pois os valores de expansão aos 42 dias são bem inferiores ao valor limite de 0,03% para essa idade proposto por Marciano (1993). A Tabela 24 apresenta a significância da variação entre as médias obtidas nos ensaios de expansão por sulfato nos traços de concreto.

Tabela 24 - Significância da diferença de expansão por sulfato no concreto.

Propriedade	Significância
Expansão por sulfato externo	Não Significativo
Expansão por sulfato interno	Não Significativo

Fonte: Autor (2018).

A priori, nota-se uma diminuição da expansão com o aumento do teor de SDA, o que aquiesce com os resultados mostrados anteriormente de índice de vazios, absorção de água e com a pesquisa de Brown e Oates (1983). No entanto, a Tabela A17 mostra que a diferença entre as médias das expansões dos traços não é significativa.

Para avaliar a expansão causada pelo teor de enxofre existente nos traços com SDA, observaram-se somente as expansões das barras que ficaram na solução de água saturada com cal. Da Tabela 18, vê-se que a expansão aumenta quando SDA é adicionado aos traços, mas que diminui à medida que o teor aumenta, provavelmente por efeito do maior preenchimento da matriz (efeito físico), que deixou os traços menos permeáveis. Vale ressaltar que essa diminuição não foi suficiente para manter a expansão abaixo da obtida para o traço de referência, e que a Tabela A17, mais uma vez, mostra que essa diferença das médias das expansões não é significativa.

Análises semelhantes foram feitas com as expansões aos 14 e 28 dias. Em ambas o comportamento se manteve em conformidade com a expansão aos 42 dias. Ao executar o ensaio, notou-se a necessidade da realização de um ensaio mais longo a fim de melhor explorar a presença do sulfato nos traços de concreto, pois as reações com sulfato são lentas e o tempo do ensaio da ABNT NBR 13583 (ABNT, 2014c) é muito curto para uma pesquisa mais exploratória dos efeitos deletérios do sulfato no concreto.

4.3 Resultados da avaliação da SDA como substituição da cal em argamassa

4.3.1 Resultados no estado fresco

- **Densidade de massa, teor de ar incorporado e retenção de água**

Os resultados médios da densidade de massa, teor de ar incorporado e retenção de água podem ser vistos na Tabela 25:

Tabela 25 - Densidade de massa, ar incorporado e retenção de água nas argamassas.

Traço	Densidade de massa (g/cm ³)	Teor de ar incorporado (%)	Retenção de água (%)
Referência (R)	2,02	2,3%	78%
33% de SDA	2,03	3,3%	82%
67% de SDA	2,06	2,0%	77%
100% de SDA	2,08	0,4%	79%

Fonte: Autor (2018).

Nela pode ser vista a tendência do aumento da densidade e da diminuição do teor de ar incorporado conforme se aumenta o teor de SDA na mistura. Deve ser feita apenas uma ressalva no valor encontrado do ar incorporado com 33% de SDA, que se mostrou superior que o traço de referência. O comportamento desses resultados está de acordo com Mehta e Monteiro (2014), que comentam que, com a adição de partículas finas, como a SDA, ocorre uma diminuição do teor de ar incorporado, pois há um melhor preenchimento dos espaços vazios, aumentando a densidade.

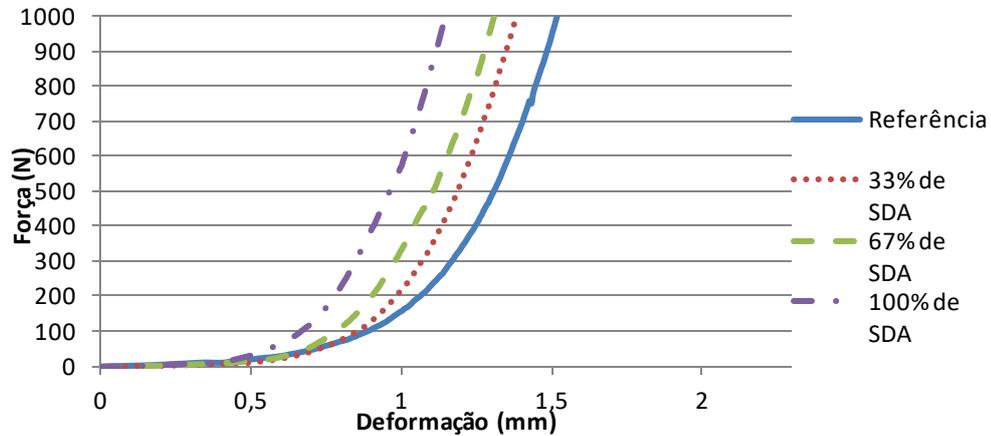
O valor do coeficiente de correlação de Pearson que relaciona o teor de SDA com a densidade de massa é de 0,97, indicando uma correlação positiva muito alta. Para a relação com o teor de ar incorporado, o coeficiente é -0,76, indicando uma correlação altamente negativa. Já para a relação com a retenção de água, o coeficiente é de -0,10, sendo uma correlação negativa desprezível (Tabela 14) segundo Hinkle, Wiersma e Jurs (2003 apud MUKAKA, 2012).

Su et al. (2013) notaram uma melhora na retenção de água com a adição de SDA. Da mesma forma, Malhotra e Dave (1999) verificaram um aumento da retenção de água com a adição de cinzas volantes na argamassa. No entanto, ao adicionar resíduos de FGD na argamassa, Zhong, Ni e Li (2012) não notaram diferenças significativas na retenção de água, à semelhança do que ocorreu nas argamassas deste trabalho.

- *Squeeze-Flow*

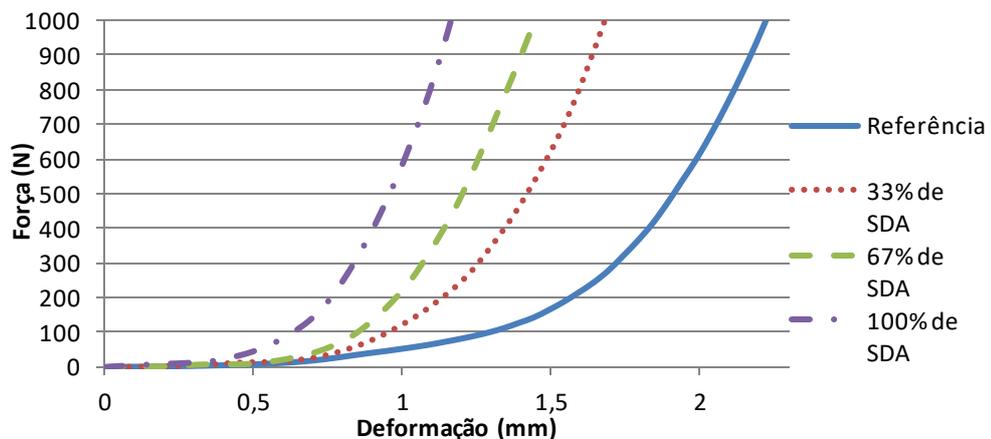
Os resultados do ensaios de *squeeze-flow* estão apresentados nas Figura 39 e 40:

Figura 39 - Curva carga-deslocamento a 0,1 mm/s.



Fonte: Autor (2018).

Figura 40 - Curva carga-deslocamento a 3 mm/s.

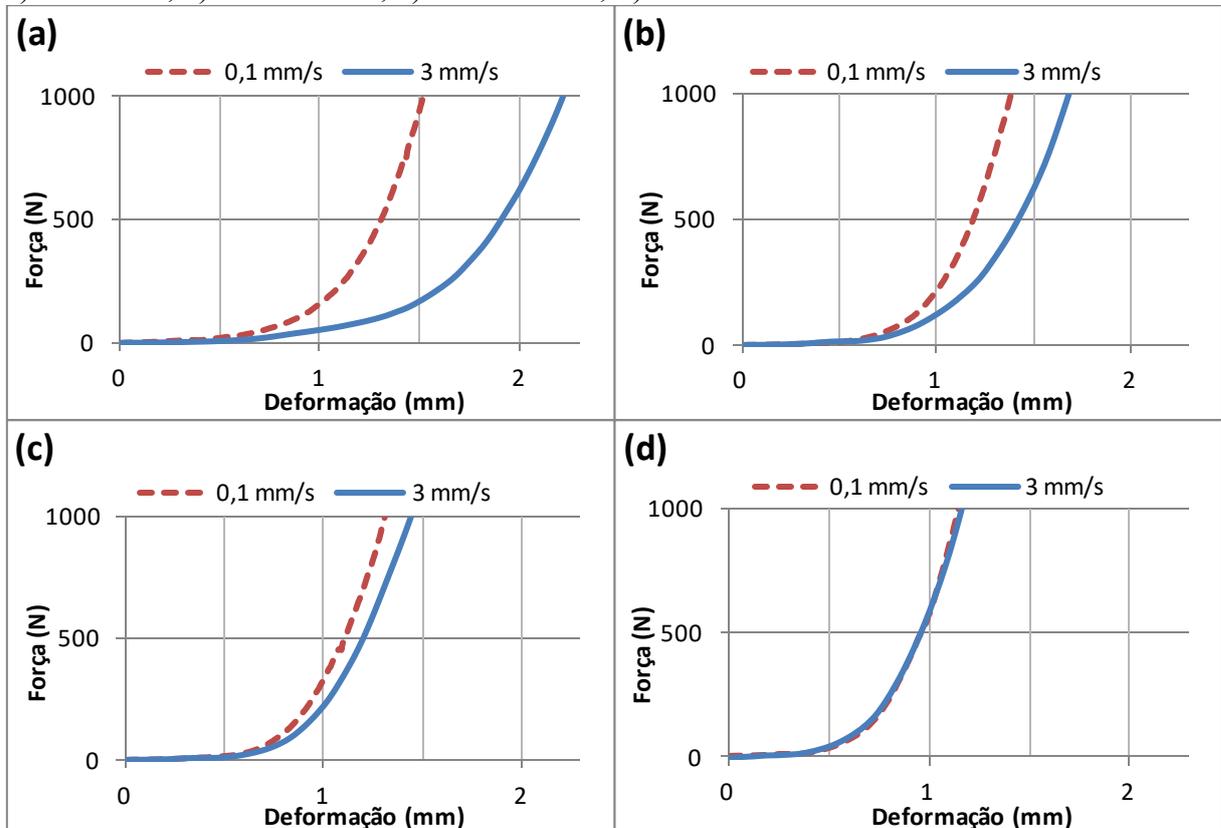


Fonte: Autor (2018).

Ao avaliar o comportamento reológico pelo método do *squeeze-flow*, vê-se que, de forma similar ao que ocorreu no trabalho de Cardoso et al. (2014), as curvas carga-deslocamento resultantes mostram duas regiões distintas: fluxo viscoso, ocorrendo com cargas baixas, apresentando deformação plástica até cerca de 0,5 mm; e um enrijecimento por deformação (*strain hardening*), onde a carga aumenta substancialmente com um pequeno aumento de deformação. A primeira região pode estar associada à produtividade na aplicação de argamassa, enquanto a segunda representa a dificuldade de se fazer o acabamento, uma vez que forças restritivas são mais altas contra o fluxo (CARDOSO; PILEGGI; JOHN, 2010).

Assim, o resultado indica que o SDA tem pouca influência na produtividade da argamassa, uma vez que todas as curvas são muito semelhantes na primeira região, a não ser para curva do traço de referência na velocidade de 3 mm/s, que apresentou uma região de fluxo viscoso maior. Isto foi confirmado durante a moldagem dos corpos de prova: nenhuma diferença prática foi notada pelo autor ou pelo profissional que fez os painéis de argamassa. Por outro lado, mesmo o profissional não tendo notado diferença durante a fase de acabamento, o ensaio mostrou que o estágio de enrijecimento por deformação foi influenciado pela presença de SDA, aumentando a consistência da argamassa com a elevação do teor de SDA. Essa diferença é mais evidente nas maiores taxas de deslocamento (Figuras 41-a a 41-d). Esse estágio pode ocorrer devido à migração de líquido do centro para as bordas, fazendo uma concentração sólida na região central, principalmente em testes de baixa velocidade (CARDOSO et al., 2014; KOLENDA et al., 2003; TOUTOU; ROUSSEL; LANOS, 2005) e devido a restrições geométricas que aumentam o atrito entre as partículas (CARDOSO et al., 2014; BETIOLI, 2009).

Figura 41 - Resultados individuais de *squeeze-flow* para diferentes taxas de deformação: a) referência; b) 33% de SDA; c) 67% de SDA; d) 100% de SDA.



Fonte: Autor (2018).

Não houve evidência de segregação líquido-sólido durante e após os ensaios em nenhuma argamassa, portanto a fricção por restrição geométrica está mais relacionada às diferenças dessas argamassas. Como mostra a Figura 34, o SDA tem partículas com tamanhos menores que a cal, portanto, sua superfície específica elevada exige mais água para uma cobertura completa. No entanto, o índice de consistência foi utilizado para fixar o comportamento do estado fresco, como comumente adotado para comparar propriedades mecânicas de misturas. Com este método, as misturas SDA usaram menos água para obter o mesmo diâmetro na mesa de consistência (Tabela 12). Associando isso com a diminuição do ar aprisionado (Tabela 25), o aumento de consistência observado com maior teor de SDA pode ser explicado pela menor quantidade de pasta disponível para lubrificar o sistema, elevando o atrito (CARDOSO; PILEGGI; JOHN, 2010; CARDOSO; JOHN; PILEGGI, 2009; KUDO, 2012).

Outra observação interessante pode ser vista nas Figuras 41-a a 41d: há uma menor dependência da taxa de deslocamento com o aumento do conteúdo de SDA. Esses fatos contribuem para confirmar a afirmação de que medidas de ponto único como o índice de consistência (*flow table*) não são suficientes para determinar o comportamento do material (CARDOSO; JOHN; PILEGGI, 2009), uma vez que argamassas com o mesmo índice de consistência, como as deste trabalho, podem ter respostas reológicas diferentes em outros ensaios reológicos.

4.3.2 Resultados no estado endurecido

- **Densidade de massa aparente e módulo de elasticidade dinâmico**

As médias (M) e desvios-padrão (Sd) da densidade de massa aparente e do módulo de elasticidade dinâmico das argamassas em estudo podem ser vistos na Tabela 26. A Tabela 27 apresenta a significância da variação entre as médias obtidas nesses ensaios nos traços de argamassa de revestimento externo.

Tabela 26 - Densidade de massa aparente e módulo de elasticidade dinâmico.

Traço	Densidade de massa aparente (kg/m ³)		Módulo de elasticidade dinâmico (GPa)	
	M	Sd	M	Sd
Referência (R)	1887	23	13,4	0,3
33% de SDA	1916	40	15,8	0,5
67% de SDA	1924	2	17,0	0,7
100% de SDA	1903	15	16,6	1,3

Fonte: Autor (2018).

Tabela 27 - Significância da diferença de densidade de massa aparente e do módulo de elasticidade dinâmico na argamassa.

Propriedade	Significância
Densidade de massa aparente	Não Significativo
Módulo de elasticidade dinâmico	Significativo

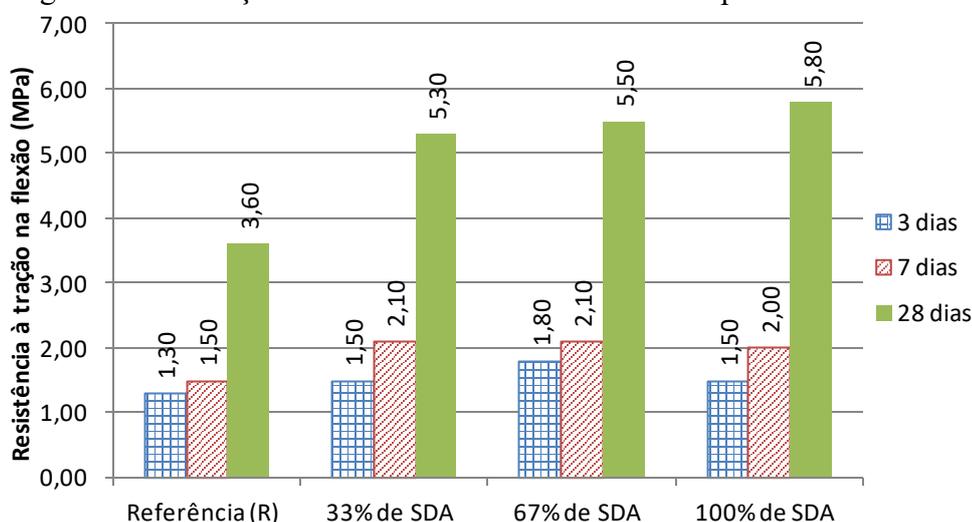
Fonte: Autor (2018).

Ao fazer a análise de variância (Tabelas A18 e A19), viu-se que as diferenças entre as médias da densidade de massa aparente não são significativas, mas são para o módulo de elasticidade dinâmico, com o teor de SDA explicando 82% da variação. Aplicando o teste de Turkey (Tabela A20), pode-se afirmar que os traços com SDA têm médias significativamente diferentes do traço de referência, mas não diferentes entre si. A implicação é que a SDA aumenta o módulo de elasticidade dinâmico das argamassas, sendo inclusive maiores que os valores encontrados na literatura. Esse resultado vai ao encontro de trabalhos como o de Gemperline e Durham (2013), que também evidenciaram um aumento do módulo de elasticidade com o aumento do teor de SDA, e de Kazmierczak, Rosa e Arnold (2016), que evidenciaram pequenas variações na densidade de massa aparente ao elevar a quantidade de finos no traço das argamassas. Esse aumento do módulo em argamassas, segundo Bauer et al. (2005), é prejudicial, pois aumentam as tensões no revestimento, deixando-o mais susceptível a fissurações.

- **Resistência à tração na flexão**

A Figura 42 mostra a evolução da resistência à tração na flexão das argamassas com o tempo. A Tabela 28 apresenta a significância da variação entre as médias obtidas nesse ensaio nos traços de argamassa de revestimento externo.

Figura 42 - Evolução da resistência à flexão com o tempo.



Fonte: Autor (2018).

Tabela 28 - Significância da diferença de resistência à tração na flexão na argamassa.

Propriedade	Significância
Resistência à tração na flexão – 3 dias	Significativo
Resistência à tração na flexão – 7 dias	Não Significativo
Resistência à tração na flexão – 28 dias	Significativo

Fonte: Autor (2018).

A partir desses dados, nota-se que, para as idades iniciais, a resistência aumenta com o aumento do teor de SDA até o traço com 67%, voltando a cair quando se substitui toda a cal por SDA, mas mantendo-se superior ao traço de referência. No entanto, ao fazer a análise de variância e o teste de Turkey para os resultados aos 3 dias (Tabelas A21 e A22), vê-se que apenas o traço com 67% de SDA tem média significativamente diferente do traço de referência. Aos 7 dias, as diferenças entre as médias não foram significativas (Tabela A23).

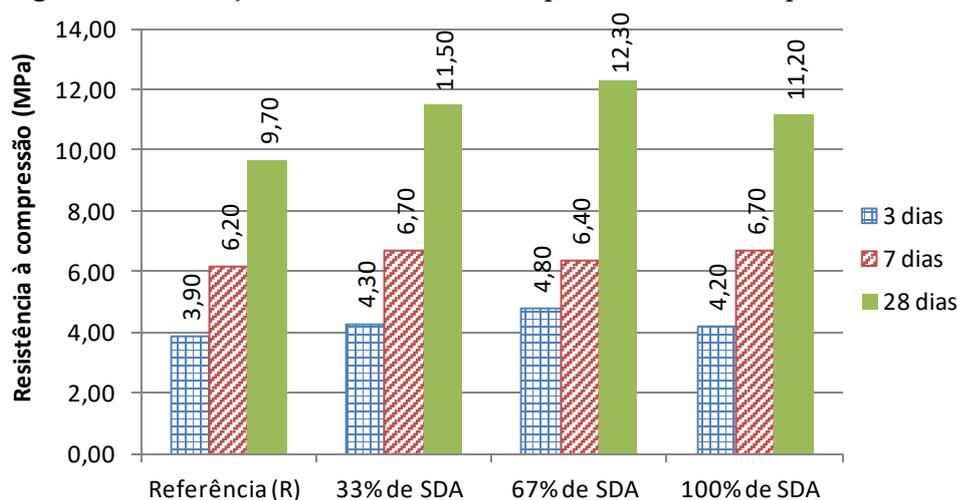
Já para a idade de 28 dias, a resistência tem a tendência de aumentar quanto maior foi o teor de SDA. Aplicando a análise de variância e o teste de Turkey para os resultados aos 28 dias (Tabelas A24 e A25), vê-se que os traços com 67% e 100% de SDA têm médias significativamente diferentes do traço de referência. Outro ponto notável é que os traços com SDA apresentaram valores de resistência à tração na flexão superiores aos encontrados na literatura.

Trabalhos como os de Zhong, Ni e Li (2012), Kazmierczak, Rosa e Arnold (2016) e Sampaio (2017) também mostraram essa tendência de melhora dessa propriedade com o aumento do teor de cinzas. Na pesquisa de Sampaio (2017), o traço com 75% de substituição da cal por cinzas volantes foi o que atingiu os maiores valores.

- **Resistência à compressão**

A evolução da resistência à compressão das argamassas com o tempo pode ser vista na Figura 43. A Tabela 29 apresenta a significância da variação entre as médias obtidas nesse ensaio nos traços de argamassa de revestimento externo.

Figura 43 - Evolução da resistência à compressão com o tempo.



Fonte: Autor (2018).

Tabela 29 - Significância da diferença de resistência à compressão na argamassa

Propriedade	Significância
Resistência à compressão – 3 dias	Significativo
Resistência à compressão – 7 dias	Significativo
Resistência à compressão – 28 dias	Significativo

Fonte: Autor (2018).

Nota-se que, à semelhança do que ocorreu com as idades iniciais da resistência à tração na flexão, a resistência tem um máximo no traço com 67% de SDA, e a queda da resistência no traço com 100% de SDA não é suficiente para tornar o traço menos resistente que a argamassa de referência, principalmente aos 28 dias (Tabelas A26 a A31). No entanto, vale notar que há uma incoerência no traço com 67% de SDA aos 7 dias, provavelmente por alguma falha nos corpos de prova ou no procedimento de aproximação dos cutelos do dispositivo de ensaio, o que fez com que todas as argamassas com SDA ficassem com médias significativamente semelhantes, mas diferentes do traço de referência.

Uma vez mais, os trabalhos de trabalhos como os de Zhong, Ni e Li (2012) e Sampaio (2017) mostraram uma tendência de aumento da resistência com o aumento do teor de cinzas, com o traço com 75% de substituição da cal por cinzas volantes se sobressaindo na pesquisa de Sampaio (2017).

- **Resistência de aderência à tração**

A resistência de aderência à tração foi ensaiada aos 28 dias. A Tabela 30 mostra os valores médios (M) e os desvios-padrão (Sd) de resistência. A Tabela 31 apresenta a significância da variação entre as médias obtidas nesses ensaios nos traços de argamassa de revestimento externo.

Tabela 30 - Resistência de aderência à tração.

Identificação do traço	Ra (MPa)					
	Bloco Cerâmico		Alvenaria		Estrutura de Concreto	
	M	Sd	M	Sd	M	Sd
Referência (R)	>0,34	0,13	>0,34	0,17	0,54	0,22
33% de SDA	>0,39	0,24	>0,40	0,19	0,40	0,25
67% de SDA	>0,41	0,12	>0,44	0,19	0,53	0,20
100% de SDA	>0,37	0,11	>0,35	0,14	0,42	0,23

Fonte: Autor (2018).

Tabela 31 - Significância da resistência de aderência à tração na argamassa aplicada em diferentes substratos.

Substrato	Significância
Blocos cerâmicos	Não Significativo
Alvenaria	Não Significativo
Estrutura de concreto	Não Significativo
Diferença entre substratos	Não Significativo

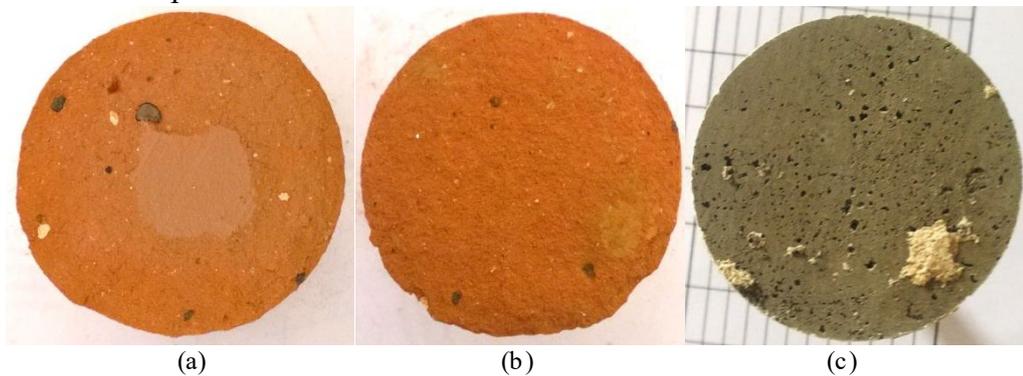
Fonte: Autor (2018).

Novamente é verificada a tendência de aumento da resistência até 67% de substituição, diminuindo em seguida até o traço com 100% de SDA. No entanto, as análises de variância das resistências de aderência à tração (Tabelas A32 a A34) mostram que as diferenças entre as médias dentro de cada grupo não são significativas, o que indica que a substituição de cal por SDA não apresentou alteração no comportamento da argamassa com relação a essa propriedade. Além disso, todos os traços passaram no critério da ABNT NBR 13749 (ABNT, 2013b), que diz que argamassas de revestimento externo devem apresentar resistência de aderência à tração igual ou superior a 0,3 MPa.

Vale notar que os valores para aderência em blocos cerâmicos e em alvenaria contêm um sinal de “maior que” (>) antes do valor numérico por causa do local de ruptura, que em sua maioria ocorreu no substrato (Figuras 44-a e 44-b), indicando que o valor da aderência em si é maior do que o registrado no equipamento, mas, para efetuar os cálculos da análise de variância, adotou-se esse valor numérico como sendo a própria resistência. Já na

estrutura de concreto, as rupturas foram entre o substrato e o chapisco (Figura 44-c), sendo efetivamente a resistência de aderência o valor mostrado no equipamento (ABNT NBR 13528 – ABNT, 2010a). Isso pode explicar os valores maiores encontrados para a aderência na estrutura de concreto, teoricamente menores, por ser lisa, pois o substrato dos blocos cerâmicos e da alvenaria, que é feita com blocos cerâmicos, possui menor resistência do que um bloco de concreto.

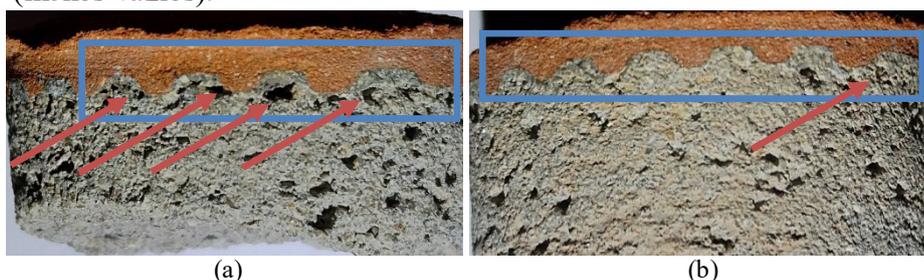
Figura 44 - Local de ruptura no ensaio de aderência: a) bloco cerâmico – substrato; b) alvenaria – substrato; c) estrutura de concreto – interface substrato/chapisco.



Fonte: Autor (2018).

Mesmo com essa aparente diferença de valores entre os grupos com substratos diferentes, ao aplicar a análise de variância entre eles (Tabela A35), nota-se que, ainda assim, as diferenças entre as médias não são significativas, confirmando que a SDA não causa diminuição na aderência à tração. Outra observação importante quanto ao comportamento dos traços com a adição da SDA foi no preenchimento das reentrâncias dos blocos cerâmicos (Figura 45-a). A Figura 45-b permite verificar que, com a adição de SDA, a argamassa cobriu melhor todos os detalhes do bloco, o que melhora a área de contato entre a argamassa e o substrato.

Figura 45 - Superfície de contato entre argamassa e substrato: a) traço de referência (vazios indicados com setas); b) traços com SDA (menos vazios).



Fonte: Autor (2018).

Com esse melhor preenchimento dos vazios, era de se esperar que a resistência de aderência à tração fosse significativamente maior nos traços com SDA. Essa melhora na aderência ocorreu nos trabalhos de Sampaio (2017) e de Li e Wu (2005). No entanto, na pesquisa de Malhotra e Dave (1999), a substituição de cal por cinzas volantes também obteve como resultado que a resistência de aderência à tração não foi afetada pela substituição.

4.3.3 Resultados dos ensaios de durabilidade

- **Absorção de água por capilaridade e coeficiente de capilaridade**

A Tabela 32 mostra a absorção de água por capilaridade e os valores médios (M) e desvios-padrões (Sd) do coeficiente de capilaridade para cada argamassa estudada. A Tabela 33 apresenta a significância da variação entre as médias obtidas nesse ensaio nos traços de argamassa de revestimento externo.

Tabela 32 - Absorção de água por capilaridade e coeficiente de capilaridade.

Identificação do traço	A ₁₀ (g/cm ²)	A ₉₀ (g/cm ²)	C (g/dm ² .min ^{1/2})	
			M	Sd
Referência (R)	0,10	0,32	3,5	0,5
33% de SDA	0,23	0,63	6,3	0,5
67% de SDA	0,26	0,67	6,6	0,9
100% de SDA	0,33	0,71	6,4	0,2

Fonte: Autor (2018).

Tabela 33 - Significância da Absorção de água por capilaridade e coeficiente de capilaridade na argamassa.

Propriedade	Significância
Absorção de água por capilaridade e coeficiente de capilaridade	Significativo

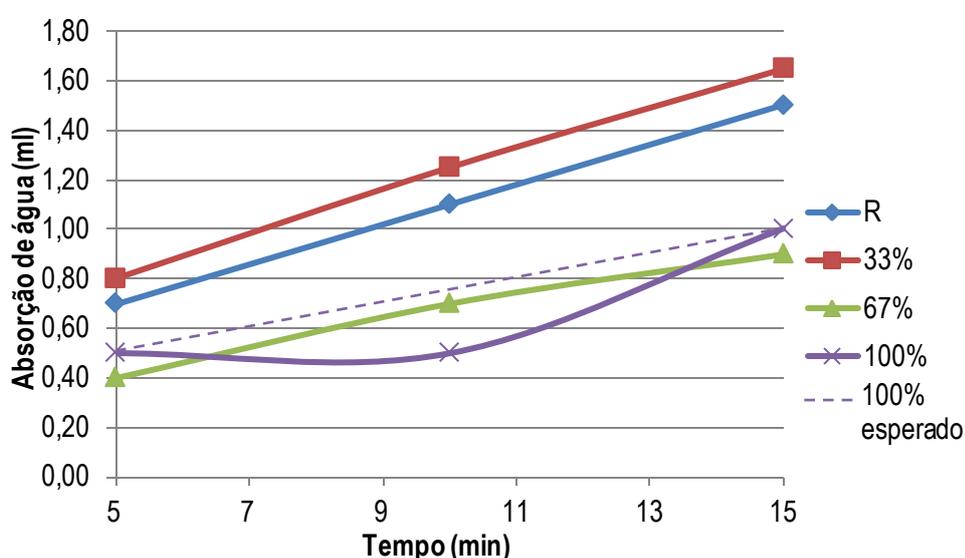
Fonte: Autor (2018).

Mais uma vez, têm-se a tendência de um valor máximo no traço com 67% de SDA, mas, ao aplicar a análise de variância e o teste de Turkey (Tabelas A36 e A37), verifica-se que todos os traços com SDA têm médias semelhantes entre si, mas significativamente diferentes do traço de referência. Isso mostra que o valor do coeficiente de capilaridade e da absorção d'água por capilaridade aumentam ao adicionar SDA na argamassa, o que é prejudicial, pois os revestimentos ficam mais susceptíveis a manifestações patológicas oriundas da ascensão capilar. Isso pode ter ocorrido devido ao efeito do melhor preenchimento da matriz cimentícia, conforme verificado na Figura 45, que deixou os poros interconectados mais estreitos, intensificando os efeitos capilares. Esse aumento da absorção de água por capilaridade também foi evidenciado pelo trabalho de Kazmierczak, Rosa e Arnold (2016).

- **Permeabilidade**

O ensaio de permeabilidade com tubos Rilem (método do cachimbo) tem seus resultados mostrados na Figura 46, onde percebe-se uma alteração no traço com 100% de SDA, que provavelmente seguiria o comportamento da linha tracejada não fosse algum problema ocorrido na aferição feita aos 10 minutos. A Tabela 34 apresenta a significância da variação entre as médias obtidas nesse ensaio nos traços de argamassa de revestimento externo.

Figura 46 - Resultado do ensaio de permeabilidade pelo método do cachimbo.



Fonte: Autor (2018).

Tabela 34 - Significância da diferença de permeabilidade com tubos Rilem na argamassa.

Propriedade	Significância
Permeabilidade com tubos Rilem	Não Significativo

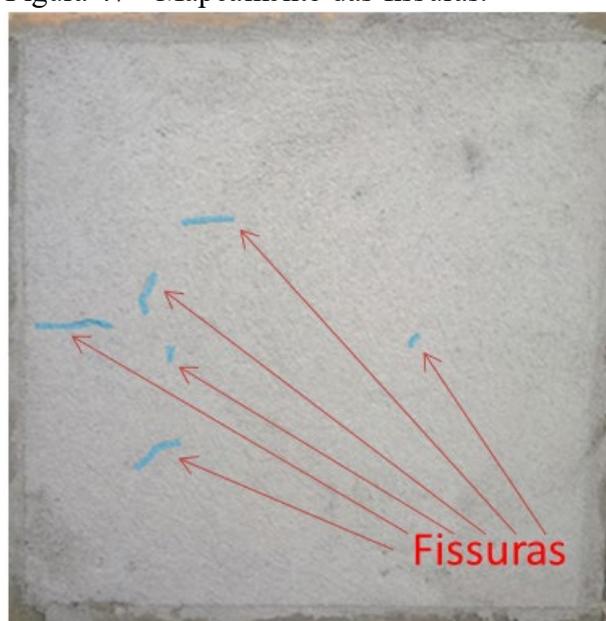
Fonte: Autor (2018).

Após uma análise de variância (Tabela A38), o ensaio se mostrou com diferenças não significativas entre as médias dos coeficientes de permeabilidade, que são obtidos subtraindo os valores absorvidos entre 15 e 5 minutos, obtendo os valores 0,08; 0,09; 0,05 e 0,05 ml/min respectivamente com o aumento do teor de substituição. Portanto, o SDA não influenciou na permeabilidade da argamassa, apesar de visualmente ser observada uma tendência da diminuição dos valores obtidos nos ensaios. Sampaio (2007), por outro lado, observou uma diminuição da permeabilidade com o aumento do teor de substituição.

- **Fissuração**

Após 28 dias, as fissuras dos painéis foram mapeadas (Figura 47) e suas espessuras foram medidas com um fissurômetro. A Tabela 35 mostra os resultados, indicando uma diminuição na quantidade de fissuras à medida em que se aumenta o teor de SDA, com um coeficiente de correlação de Pearson de -0,58, indicando uma correlação negativa moderada (Tabela 14). Já para a espessura média das fissuras, o coeficiente foi ainda menor, -0,16, indicando uma correlação negativa desprezível segundo Hinkle, Wiersma e Jurs (2003 apud MUKAKA, 2012). Essa diminuição da fissuração com o aumento do teor de substituição também foi evidenciada no trabalho de Sampaio (2017).

Figura 47 - Mapeamento das fissuras.



Fonte: Autor (2018).

Tabela 35 - Resultados do ensaio de fissuração.

Traço	Fissuras por metro quadrado (cm)	Espessura média das fissuras (mm)
Referência (R)	36,0	0,40
33% de SDA	0,0	0,00
67% de SDA	0,0*	0,00*
100% de SDA	0,0	0,00

*Apenas uma fissura de 6,3 cm e espessura de 0,75mm em um painel de 50 x 50 cm que foi desconsiderada por estar muito próxima a um dos cantos, sendo provavelmente devida à falha durante a desmoldagem.

Fonte: Autor (2018).

Esse resultado aquiesce com as observações dos ensaios anteriores, pois, numericamente, a retenção de água é maior nos traços com SDA, o que diminui a fissuração. As tensões envolvidas podem ter sido maiores devido ao aumento do módulo de elasticidade

(BAUER et al., 2005), no entanto, como foi mostrado que o teor de cinza melhora a resistência à tração (Figura 42), essas tensões atingem com maior dificuldade o valor da tensão de fissuração das argamassas, estando de acordo com o comportamento observado para a fissuração.

- **Variação dimensional e mássica**

Para verificar a susceptibilidade dos traços à retração, foi feito o ensaio de análise da variação dimensional linear, cujos resultados médios (M) e desvios-padrão (Sd) podem ser vistos na Tabela 36. A Tabela 37 apresenta a significância da variação entre as médias obtidas nesse ensaio nos traços de argamassa de revestimento externo.

Tabela 36 - Variação dimensional das argamassas.

Traço	Variação dimensional (%)		Variação mássica (%)	
	M	Sd	M	Sd
Referência (R)	-0,062	0,022	-0,202	0,116
33% de SDA	-0,065	0,008	-0,076	0,020
67% de SDA	-0,080	0,007	-0,089	0,014
100% de SDA	-0,085	0,010	-0,105	0,026

Fonte: Autor (2018).

Tabela 37 - Significância da diferença de variação dimensional na argamassa.

Propriedade	Significância
Variação dimensional e mássica das argamassas	Não Significativo

Fonte: Autor (2018).

Os resultados mostrados na Tabela 36 em conjunto com a análise de variância da variação dimensional (Tabela A39 e A40), permitem afirmar que não há uma diferença significativa entre as médias, ou seja, a variação dimensional das argamassas não é influenciada pela substituição da cal por SDA.

Esse resultado está em consonância com os resultados de retenção de água, que também não mostraram uma diferença significativa entre os valores médios dos traços. Segundo Bauer et al. (2005), essas duas propriedades estão diretamente relacionadas. Kazmierczak, Rosa e Arnold (2016) também verificaram uma pequena variação entre seus traços, principalmente nas idades iniciais, mas, de modo geral, a retração aumentou com o aumento do teor de finos. Tendência semelhante foi encontrada nesta pesquisa.

Ao compilar todos os resultados para os traços de argamassa, pode-se classificá-los seguindo a ABNT NBR 13281 (ABNT, 2005f), o que pode ser visto na Tabela 38. Nela,

vê-se que as argamassas estão sempre dentro de um mesmo grupo normativo, com a exceção do coeficiente de capilaridade, onde a diferença entre os traços com SDA foram tão significativas que fizeram com que fossem classificadas num grupo diferente.

Tabela 38 - Classificação das argamassas quanto às suas propriedades e características.

Propriedade	Referência (R)	33% de SDA	67% de SDA	100% de SDA
Compressão	P6	P6	P6	P6
Densidade de massa aparente	M6	M6	M6	M6
Tração na flexão	R6	R6	R6	R6
Coeficiente de capilaridade	C3	C4	C4	C4
Densidade de massa	D6	D6	D6	D6
Retenção de água	U2	U2	U2	U2
Aderência à tração	A3	A3	A3	A3

Fonte: Autor (2018).

A tendência geral de um máximo na resistência mecânica aos 67% de substituição, conseqüentemente, uma queda da resistência ao substituir toda a cal por SDA, pode ser devido justamente ao teor de cal no traço. As reações pozolânicas dependem da presença de Ca(OH)_2 , principal constituinte da cal, para ocorrer. Dessa forma, ao substituir 100% da cal por SDA, é provável que a queda da resistência ocorra pela retirada do material que contribuiria para a ocorrência das reações pozolânicas, ficando esta, dependente apenas do hidróxido de cálcio existente no cimento, diminuindo a formação de compostos que garantam um aumento tão expressivo da resistência da argamassa como ocorreu nos traços com 67% de substituição.

4.4 Resumo dos resultados

Com base nos resultados discutidos acima, pode-se resumir as tendências na Tabela 39. Nela, um triângulo para cima representa que houve um aumento nos valores dos resultados ao usar SDA, e uma diminuição caso o triângulo esteja para baixo. Quando a cor for verde significa que houve uma melhora da propriedade com a incorporação de SDA, sendo vermelho caso contrário. Quando a utilização da SDA não tiver influência em uma propriedade, constarão dois triângulos horizontais.

Tabela 39 - Resumo dos resultados.

SDA como adição mineral em traços de concreto	Resistência à compressão	3 dias	▲
		7 dias	◀▶
		28 dias	▲
		91 dias	◀▶
	Velocidade de propagação de ondas ultrassônicas		◀▶
	Resistividade elétrica superficial		▲
	Expansão por sulfato		◀▶
	Absorção de água		▼
	Índice de vazios		▼
	Massa específica		▲
Absorção de água por capilaridade		◀▶	
SDA como substituição da cal em argamassa para revestimento externo	Resistência à tração na flexão	3 dias	▲
		7 dias	◀▶
		28 dias	▲
	Resistência à compressão	3 dias	▲
		7 dias	▲
		28 dias	▲
	Variação dimensional e mássica		◀▶
	Módulo de elasticidade dinâmico		▲
	Resistência de aderência à tração	Bloco cerâmico	◀▶
		Alvenaria	◀▶
		Estrutura de concreto	◀▶
	Retenção de água		◀▶
	Absorção de água por capilaridade		▲
	Fissuração		▼
	Permeabilidade (tubo Rilem)		◀▶
<i>Squeeze-Flow</i>		◀▶	
Densidade de massa aparente		◀▶	
Densidade de massa no estado fresco		▲	
Teor de ar incorporado		▼	

Legenda: ▲ valor aumentou, melhorando a propriedade; ▲ valor aumentou, piorando a propriedade;
▼ valor diminuiu, melhorando a propriedade; ▼ valor diminuiu, piorando a propriedade;
◀▶ valores próximos, não influenciando a propriedade.

Fonte: Autor (2018).

Ao analisar o resumo dos resultados de um modo geral, fica claro que a SDA surtiu efeitos positivos tanto no concreto quanto na argamassa. No concreto, todas as propriedades obtiveram valores semelhantes ou melhores aos do concreto de referência. Já na argamassa, cerca de 40% das propriedades melhoraram, 50% não foram influenciadas pela SDA e apenas 10% das propriedades apresentaram piores resultados que o traço de referência. Sendo assim, a pesquisa permitiu afirmar que a SDA tem potencial para ser incorporada como insumo na construção civil, bastando atentar para as suas características peculiares e para os efeitos negativos que ela pode causar em algumas propriedades.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 Conclusões

De acordo com os resultados deste trabalho, pode-se concluir:

- Quanto à caracterização da SDA da UTE Pecém I

Os resíduos oriundos da dessulfurização semi-seca dos gases da combustão da UTE Pecém I se mostraram um material bastante fino, com um diâmetro médio de 11,8 μm e uma massa específica de 2,4 g/cm^3 . São bastante semelhantes às cinzas volantes do ponto de vista morfológico, mas com incrustações sulfurosas (sulfito e sulfato de cálcio) nas partículas esféricas.

Os resíduos podem ser classificados ambientalmente como um material não corrosivo, não perigoso e não inerte (Classe II-A), mas que não podem ser classificados como pozolana Classe C por não terem a porcentagem mínima necessária de óxidos de ferro, alumínio e silício e devido ao seu alto teor de enxofre. No entanto, vale salientar que o resíduo mostrou bom desempenho mecânico quando testado quanto à pozolanicidade.

- Quanto à avaliação da SDA como adição mineral no concreto

Da pesquisa realizada, fica evidenciado que, com a adição de SDA no concreto até valores de 20% em relação à massa de cimento, algumas de suas propriedades são melhoradas, como a resistência à compressão, a resistividade elétrica superficial, a absorção de água, índice de vazios e massa específica, ou não sofrem influência, como ocorreu na velocidade de propagação das ondas ultrassônicas e na absorção de água por capilaridade. Além disso, a expansão devido a ataques por sulfatos foi inferior ao limite de 0,03% para todos os traços e a diferença entre os traços não foi significativa. Sendo assim, conclui-se que, ao adicionar SDA da termelétrica do Pecém em até 20%, não foi comprometido o desempenho do concreto.

- Quanto à avaliação da SDA como substituição da cal em argamassas para revestimento externo

Os ensaios realizados permitiram concluir que, do ponto de vista mecânico, é possível substituir a cal por *spray dryer ash* da usina termelétrica do Pecém em argamassas de revestimento externo, uma vez que as resistências se mantiveram iguais ou superiores aos valores encontrados para a argamassa de referência, preparada com cal. Outro ponto importante foi a tendência de um máximo de resistência em torno do traço com 67% de substituição.

No entanto, a substituição da cal por SDA deve ser feita com parcimônia, pois a pesquisa mostrou uma tendência do aumento da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade na medida em que se aumenta o teor de substituição, além de aumentar o módulo de elasticidade dinâmico, deixando a argamassa mais rígida e podendo deixá-la mais susceptível à fissuração. Outro ponto a ser observado é a tendência da diminuição da trabalhabilidade com o aumento do teor de resíduo, o que pode ser observado pela diminuição do teor de ar incorporado e pela fase de enrijecimento por deformação no ensaio de *squeeze-flow*.

- Quanto ao uso da SDA como insumo para construção civil

Conforme os resultados desta pesquisa, a utilização da SDA da UTE Pecém I na construção civil mostrou-se favorável, sendo tecnicamente viável, contribuindo com alternativas para a sua reciclagem, diminuindo assim seu passivo ambiental e contribuindo para o desenvolvimento sustentável na região do estudo.

Da pesquisa realizada, recomenda-se os seguintes produtos cimentícios com base na viabilidade técnica:

- a) Concreto com 20% de adição de SDA da UTE Pecém I, com relação à massa de cimento (ver traço das Tabelas 7 e 8);
- b) Argamassa mista de revestimento externo com 67% da cal sendo substituída por SDA da UTE Pecém I (ver traço da Tabela 12).

5.2 Sugestões de trabalhos futuros

- Realizar mais pesquisas com SDA substituindo parcialmente o cimento, verificando se houve alterações no desempenho ou no calor de hidratação, aproveitando o bom desempenho mecânico da SDA nos ensaios de pozolanicidade, atentando apenas para que o teor de enxofre na mistura não seja deletério.
- Executar ensaios ambientais e de durabilidade, como migração e difusão de cloretos e carbonatação acelerada a fim de verificar de maneira mais aprofundada a viabilidade desse uso para o resíduo no concreto, pois, em longo prazo, os efeitos da adição da SDA pelo ataque de sulfatos no concreto ainda podem se manifestar de maneira negativa.
- Realizar uma pesquisa exploratória mais longa envolvendo o ataque por sulfatos, de pelo menos 6 meses, pois as reações são lentas. Após a exposição das barras por esse tempo, comparar a resistência à tração na flexão com uma referência e fazer análises com MEV para verificar a formação de etringita.
- Otimizar o teor de SDA nos traços de argamassas de revestimento, pois a pesquisa mostrou que está em torno de 67%.
- Estudar formas de melhorar as propriedades das argamassas mostradas como problema nesta pesquisa, como o módulo de elasticidade dinâmico e a trabalhabilidade, possivelmente com uso de aditivos incorporadores de ar ou outros.
- Realizar ensaios de fadiga e análises estruturais para previsão de desempenho das argamassas com SDA.
- Promover a criação de normas para o uso desse resíduo e de outros oriundos de termelétricas, à semelhança do que existe em outros países, para que não se estagne no ciclo vicioso de não haver aplicações ou pesquisas por não haver normas e não se criarem normas por não haver pesquisas ou aplicações dos resíduos.
- Realizar pesquisas aplicando a SDA em outros usos já citados na revisão da literatura (Tabela 5), como em geopolímeros ou em cimentos de sulfoaluminato de cálcio com o intuito de explorar ainda mais o resíduo oriundo da dessulfurização semi-seca dos gases da combustão da UTE Pecém I e fazer do seu alto teor de enxofre um aliado.

REFERÊNCIAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 5739**. Concreto - Ensaios de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018a.

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

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

_____. **NBR 6467**. Agregados - Determinação do inchamento de agregado miúdo - Método de ensaio, Rio de Janeiro, 2006 (Versão corrigida: 2009).

_____. **NBR 7211**. Agregados para concreto – Especificação, Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR 8802**. Concreto endurecido — Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica, Rio de Janeiro, 2013a.

_____. **NBR 9778**. Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica, Rio de Janeiro, 2005a (Versão corrigida: 2009).

_____. **NBR 9779**. Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água por capilaridade, Rio de Janeiro, 2012.

_____. **NBR 10004**. Resíduos sólidos: Classificação, Rio de Janeiro, 2004a.

_____. **NBR 10005**. Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos, Rio de Janeiro, 2004b.

_____. **NBR 10006**. Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos, Rio de Janeiro, 2004c.

_____. **NBR 12653**. Materiais pozolânicos – Requisitos, Rio de Janeiro, 2014b (Versão corrigida: 2015).

_____. **NBR 13276**. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do índice de consistência, Rio de Janeiro, 2016a.

_____. **NBR 13277**. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da retenção de água, Rio de Janeiro, 2005b.

_____. **NBR 13278**. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado, Rio de Janeiro, 2005c.

_____. **NBR 13279**. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão, Rio de Janeiro, 2005d.

_____. **NBR 13280.** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido, Rio de Janeiro, 2005e.

_____. **NBR 13281.** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Requisitos, Rio de Janeiro, 2005f.

_____. **NBR 13528.** Revestimento de paredes de argamassas inorgânicas - Determinação da resistência de aderência à tração, Rio de Janeiro, 2010a.

_____. **NBR 13583.** Cimento Portland – Determinação da variação dimensional de barras de argamassa de cimento Portland expostas à solução de sulfato de sódio, Rio de Janeiro, 2014c.

_____. **NBR 13749.** Revestimento de paredes de argamassas inorgânicas - Especificação, Rio de Janeiro, 2013b.

_____. **NBR 15259.** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade, Rio de Janeiro, 2005g.

_____. **NBR 15261.** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da variação dimensional (retração ou expansão linear), Rio de Janeiro, 2005h.

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

_____. **NBR 15630.** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação do módulo de elasticidade dinâmico através da propagação de onda ultra-sônica, Rio de Janeiro, 2008 (Versão corrigida: 2009).

_____. **NBR 15839.** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Caracterização reológica pelo método squeeze-flow, Rio de Janeiro, 2010b.

_____. **NBR 16541.** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Preparo da mistura para a realização de ensaios, Rio de Janeiro, 2016b.

_____. **NBR 16605.** Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica, Rio de Janeiro, 2017.

ACAA – AMERICAN COAL ASH ASSOCIATION, 2015. **Coal Combustion Product Production and Use Survey.** ACAA, Aurora, CO, October 12, 2016.

AENOR - Asociación Española de Normalización y Certificación: **UNE 83988-2.** Durabilidad del hormigón - determinación de la resistividad - Parte 2: Método de las cuatro puntas o de Wenner. AENOR, Madrid, 2014.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **BIG – Banco de informações de geração: capacidade de geração do Brasil**. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>>. Acesso em 23 de julho de 2017.

AMONI, B.; LOIOLA, A.; SOARES, J.; SOARES, S. A method for NaA zeolite synthesis from coal fly ash and its application in warm mix asphalt. In: **13th ISAP Conference on asphalt pavement**. 2018.

ARAÚJO, N. N. **Desempenho de argamassas de revestimento produzidas com agregados reciclados oriundos do resíduo de construção e demolição da grande Natal-RN**. 2014. 129 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2014.

ARAÚJO, T. G. **Viabilidade de aplicação das cinzas da bacia de resíduos da termelétrica do Pecém no concreto**. 2016. 60 f. Trabalho de conclusão de curso (Engenharia Civil) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016.

ASTM - American Society for Testing Materials. **ASTM C144-03**. Standard Specification for Aggregate for Masonry Mortar, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2003.

BARROS, K. S. **Estudo sobre a possibilidade do uso de cinzas volantes advindas de uma termelétrica à carvão mineral da região metropolitana de fortaleza-ce para aplicação em camadas granulares de pavimentos**. 2016. 142 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de pós-graduação em engenharia de transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016.

BARSOUM, M.; GANGULY, A.; HUG, G. Microstructural evidence of reconstituted limestone blocks in the Great Pyramids of Egypt. **Journal of the American Ceramic Society**, v. 89, n. 12, p. 3788-3796, 2006.

BAUER, E. ; PEREIRA, C. H. A. ; RAMOS, D. ; SANTOS, C. ; PAES, I. L. ; SOUSA, J. G. G. ; ALVES, N. ; do Ó ; GONCALVES, S. R. C. ; LARA, P. L. O. . **Revestimentos de argamassa - características e peculiaridades**. 1. ed. BRASÍLIA: LEM-UnB - SINDUS-CON/DF, v. 1. 92p, 2005.

BEEGHLY, J.; SCHROCK, M. Dredge material stabilization using the pozzolanic or sulfo-pozzolanic reaction of lime by-products to make an engineered structural fill. **International Journal of Soil, Sediment and Water**, v. 3, n. 1, p. 6, 2010.

BETIOLI, A. M.; JOHN, V. M.; GLEIZE, P.; PILEGGI, R. G. Caracterização reológica de pasta cimentícia: associação de técnicas complementares. **Ambiente Construído, Porto Alegre**, v. 9, n. 4, p. 37-48, 2009.

BOXLEY, C. **Pervious concrete comprising a geopolymerized pozzolanic ash binder**. U.S. Patent n. 8,038,789, 18 out. 2011.

BOXLEY, C. **Treatment of fly ash for use in concrete**. U.S. Patent n. 20090071379, 19 mar. 2009.

BRANDÃO, M.; RODRIGUES, L.; DA SILVA, S. Desenvolvimento de revestimentos contendo adições de cinzas da combustão do carvão mineral geradas em UTE's. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CARVÃO MINERAL, 4, 2013, Gramado. **Anais...** Criciúma: SATC, 2013.

BRASILEIRO, F. L. C. **Utilização de cinzas de termelétrica na confecção de blocos de concreto para alvenaria**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de pós-graduação em engenharia civil: estruturas e construção civil, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018.

CARASEK, H. **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. São Paulo. IBRACON, 2007.

BARBOSA FILHO, M. P.; FAGERIA, N. K.; ZIMMERMANN, F. J. P. Atributos de fertilidade do solo e produtividade do feijoeiro e da soja influenciados pela calagem em superfície e incorporada. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 29, n. 3, p. 507-514, 2005.

BETIOLI, A. M.; JHON, V. M.; GLEIZE, P.; PILEGGI, R. G. Caracterização reológica de pasta cimentícia: associação de técnicas complementares. **Ambiente Construído, Porto Alegre**, v. 9, n. 4, p. 37-48, 2009.

BROWN, G. E.; OATES, D. B. Air entrainment in sulfate-resistant concrete. **Concrete International**, v. 5, n. 01, p. 36-39, 1983.

BSI GROUP. **BS 8500**. Concrete – Complementary British Standard to BS EN 206. London: British Standards Institution, 2015.

BSI GROUP. **BS EN 13139: 2013**. Aggregates for mortar. London: British Standards Institution, 2013.

BURDEN, D. **The durability of concrete containing high levels of fly ash**. University of New Brunswick, Department of Civil Engineering, 2006.

BURGESS-CONFORTI, J.; BRYE, K.; MILLER, D.; POLLOCK, E.; WOOD, L. Dry flue gas desulfurization by-product application effects on plant uptake and soil storage changes in a managed grassland. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 25, n. 4, p. 3386-3396, 2018.

BURGESS-CONFORTI, J.; MILLER, D.; BRYE, K.; WOOD, L.; POLLOCK, E. Liming Characteristics of a High-Calcium Dry Flue Gas Desulfurization By-Product and a Class-C Fly Ash. **Journal of Environmental Protection**, v. 7, n. 11, p. 1592, 2016.

BUTALIA, T. S.; WOLFE, W. E.; LEE, J. W. Evaluation of a dry FGD material as a flowable fill. **Fuel**, v. 80, n. 6, p. 845-850, 2001.

CÁNOVAS, M. F. **Patologia e terapia do concreto armado**. São Paulo: PINI, 1988. 522p.

CARDOSO, F. A.; JOHN, V. M.; PILEGGI, R. G. Rheological behavior of mortars under different squeezing rates. **Cement and concrete research**, v. 39, n. 9, p. 748-753, 2009.

CARDOSO, F. A., JHON, V. M., PILEGGI, R. G., BANFILL, P. F. G.. Characterisation of rendering mortars by squeeze-flow and rotational rheometry. **Cement and Concrete Research**, v. 57, p. 79-87, 2014.

CARDOSO, F. A.; PILEGGI, R. G.; JOHN, V. M. Squeeze-flow aplicado a argamassas de revestimento: Manual de utilização. **Boletim técnico da Escola Politécnica da USP**, v. 1, p. 1-29, 2010.

CASONATO, C. A.; CAETANO, L. F.; LIMA, R. C. A. O spalling no concreto de alto desempenho. **Salão de Iniciação Científica (15.: 2003: Porto Alegre, RS). Livro de resumos. Porto Alegre: UFRGS**, 2003.

CASTELLAN, J. L.; CHAZAN, D. T.; D'ÁVILA, M. L. Dessulfuração em Termoelétricas a Carvão: O Caso da Usina de Candiota II. In: II Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica, 2003, Salvador/BA. **Anais...** Salvador/BA: Geração Termelétrica, 2003.

CHENG, C.; AMAYA, M.; BUTALIA, T.; BAKER, R.; WALKER, H.; MASSEY-NORTON, J.; WOLFE, W. Short-term influence of coal mine reclamation using coal combustion residues on groundwater quality. **Science of The Total Environment**, v. 571, p. 834-854, 2016.

CHOUSIDIS, N.; IOANNOU, I.; RAKANTA, E.; KOUTSODONTIS, C.; BATIS, G. Effect of fly ash chemical composition on the reinforcement corrosion, thermal diffusion and strength of blended cement concretes. **Construction and Building Materials**, v. 126, p.86-97, 2016.

CHUGH, Y.; PATWARDHAN, A.; MUNISH, S. Demonstration of Cattle Feeding Pads using Coal Combustion Byproducts including Sulfite-rich Scrubber Sludge. In: **World of Coal Ash (WOCA) Conference**. 2007.

CHUGH, Y.; PATWARDHAN, A.; MUNISH, S.; BOTHA, F. Development of construction materials using sulfite-rich scrubber sludge and fly ash. **Fuel**, v. 85, n. 16, p. 2323-2329, 2006.

CIRINO, M. A. G. **Estudo de pastas de cimento portland com adições de cinzas de carvão mineral para uso na cimentação de poços de petróleo**. 2016. 131 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de pós-graduação em engenharia civil: estruturas e construção civil, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016.

CLOUTIER, C. **The effective use of coal combustion products (CCPS) in asphalt pavements**. 2016. 154f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – The University of Wisconsin, Milwaukee, 2016.

CORDOBA, P.; STAICU, L. C. Flue gas desulfurization effluents: An unexploited selenium resource. **Fuel**, v. 223, p. 268-276, 2018.

CRUZ, M.; CASTRO, R.; MEDEIROS, J.; ARAÚJO, O.; OVILEIRA, V.; RIBEIRO, G. Evaluation of the benefits of using semi-dry FGD and its solid waste treatment on the environmental performance of a power plant. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Química, 11, 2016, Fortaleza/CE. **Anais...** Fortaleza/CE: XXI COBEQ, 2016.

DEMIRBOĞA, R.; TÜRKMEN, İ.; KARAKOC, M. B. Relationship between ultrasonic velocity and compressive strength for high-volume mineral-admixed concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 34, n. 12, p. 2329-2336, 2004.

DILMORE, R.; HOWARD, B.; SOONG, Y.; GRIFFITH, C.; HEDGES, S.; DeGALBO, A.; MORREALE, B.; BALTRUS, J.; ALLEN, D.; FU, J. Sequestration of CO₂ in mixtures of caustic byproduct and saline waste water. **Environmental Engineering Science**, v. 26, n. 8, p. 1325-1333, 2009.

DISNEY, P. W.; VINSON, L. FGD Forced oxidation mechanism: a pilot plant case study. In: World of Coal Ash Conference, 2005. Lexington. **Proceedings ...** Lexington: WOCA, 2005.

DRYDEN, J.; MALEK, M. Defining a Research Program for Cement, Brick, and Block Production from a Novel FGD Product. In: **World of Coal Ash (WOCA) Conference**. 2011.

DUTRA, F. V. A. **Materiais sorventes empregados em diferentes métodos de preparo de amostras**. 2014. 29f. Trabalho de conclusão de curso (Química) – Universidade Federal de São João del-Rei, São João del-Rei, 2014.

DUVALLET, T.; ROBL, T. Coal combustion products in the fabrication of calcium sulfoaluminate cement: A New Low-Carbon Alternative to Ordinary Portland Cement. **Ash at Work**, n. 1, p. 30-32, 2016.

EUROPEAN COAL COMBUSTION PRODUCTS ASSOCIATION. **Production and Utilisation of CCPs in 2010 in Europe (EU 15)**. Disponível em: <http://www.ecoba.com/evjm,media/ccps/ECO-STAT_2010.pdf> Acesso em 03 de junho de 2017.

EDP. **A Usina**. Disponível em: <<http://www.edp.com.br/geracao-renovaveis/geracao/ceara/energia-pecem/A-Usina/Paginas/Usina.aspx>>. Acesso em 30 de maio de 2017.

EDP. **Centro de Produção Sines – Instalação de Dessulfuração – Relatório de Conformidade Ambiental do Projecto de Execução (RECAPE) – Sumário Executivo**. 2006. Disponível em: <<https://www.edp.pt/PT/sustentabilidade/EDPDocuments/D4.pdf>> acesso em 28 de julho de 2017.

ENEVA. **Pecém II**. Disponível em: <<http://www.eneva.com.br/pt/nossos-negocios/geracao-de-energia/usinas-em-operacao/Paginas/ute-pecem-ii.aspx>>. Acesso em 04 de outubro de 2016.

EPRI-ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE. **A Review of Literature Related to the Use of Spray Dryer Absorber Material: Production, Characterization, Utilization Applications, Barriers, and Recommendations**. Palo Alto, CA. 2007.

FANG, D.; LIAO, X.; ZHANG, X.; TENG, A.; XUE, X. A novel resource utilization of the calcium-based semi-dry flue gas desulfurization ash: As a reductant to remove chromium and vanadium from vanadium industrial wastewater. **Journal of hazardous materials**, v. 342, p. 436-445, 2018.

FAUTH, D. J.; SOONG, Y.; WHITE, C. M. Carbon sequestration utilizing industrial solid residues. **Fuel Chemistry Division Preprints**. v. 47, n. 1, p. 37-38, 2002.

FU, H.; GUAN, B.; WU, Z. Transformation pathways from calcium sulfite to α -calcium sulfate hemihydrate in concentrated CaCl₂ solutions. **Fuel**, v. 150, p. 602-608, 2015.

FUNGARO, D. A.; IZIDORO, J. C. Remediação de drenagem ácida de mina usando zeólitas sintetizadas a partir de cinzas leves de carvão. **Química Nova**, São Paulo, v. 29, n. 4, p. 735-740, 2006.

GEA. **Spray Dryer Absorber Flow**. Altura: 1200 pixels. Largura: 675 pixels. 96 dpi. 82,9 KB. Formato JPEG. Disponível em: <http://www.gea.com/en/binaries/SDA-productpage_SprayDryer-Absorber-flow1200x675_tcm11-17185.jpg> acesso em 27 de julho de 2017.

GEMPERLINE, C. S.; DURHAM, S. Beneficial use of recycled materials in controlled low strength materials. In: **ICPTT 2012: Better Pipeline Infrastructure for a Better Life**. ASCE, 2013.

GUACELLI, P. A. G. **Substituição de areia natural por areia de britagem de rochas basálticas para argamassas de revestimento**. 2010. 166 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Edificações e Saneamento) - Centro de Tecnologia e Urbanismo, Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2010.

GUIMARÃES, J. E. P. **Acal: Fundamentos e aplicações na engenharia civil**. 2.ed. Pini: São Paulo, 2002.

GUO, H.; JIANG, N.; LI, J.; ZHAO, X.; ZHANG, Y.; CHEN, C.; ZHAO, H.; HAN, C.; WU, Y. Study of oxidation of calcium sulfite in flue gas desulfurization by pore-type surface dielectric barrier discharge. **RSC Advances**, v. 8, n. 8, p. 4464-4471, 2018.

HAMMER, Ø.; HARPER, D. A. T.; RYAN, P. D. PAST-palaeontological statistics, ver. 1.89. **Palaeontol electron**, v. 4, n. 1, p. 1-9, 2001.

HAMON. **Air Quality Systems**. Disponível em: <<http://www.hamon.com.br/docs/upload/31/files/Brochures/Hamon-AQS-Brochure-2015.pdf>> Acesso em 31 de março de 2018.

HEEBINK, L.; BUCKLEY, T.; HASSET, D.; ZACHER, E.; PFLUGHOEFT-HASSET, D.; DOCKTER, B. Current status of spray dryer absorber material characterization and utilization. In: **World of Coal Ash (WOCA) Conference**, 2007.

HOPE FILHO, J. **Sistemas cimento, cinza volante e cal hidratada: mecanismo de hidratação, microestrutura e carbonatação de concreto**. 2008. 318 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil, São Paulo, 2008.

JIANG, Y.; WU, M.; SU, Q.; LU, M.; LIN, C Dry CFB-FGD By-Product Utilization-International Prospectives. In: **World of Coal Ash (WOCA) Conference**. 2011.

KAZMIERCZAK, C. de S.; ROSA, M.; ARNOLD, D. C. M. Influência da adição de filer de areia de britagem nas propriedades de argamassas de revestimento. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 16, n. 2, p. 7-19, 2016.

KIM, Y.; DANG, M. Q.; DO, T. M. Studies on compressive strength of sand stabilized by alkali-activated ground bottom ash and cured at the ambient conditions. **International Journal of Geo-Engineering**, v. 7, n. 1, p. 15, 2016.

KERCHER, E.; DAY, K.; DAY, E. Reuse of FDG gypsum as pelletized fertilizer through high-intensive mixing. In: **World of Coal Ash (WOCA) Conference**. 2015.

KOLENDA, F.; RETANA, P.; RACINEUX, G.; POITOU, A. Identification of rheological parameters by the squeezing test. **Powder technology**, v. 130, n. 1-3, p. 56-62, 2003.

KUDO, E. K. **Caracterização reológica de argamassas colantes**. 2012. 140 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Construção Civil, São Paulo, 2012.

LEANDRO, R. P. **Estudo laboratorial acerca da possibilidade de aproveitamento da cinza pesada de termelétrica em bases e sub-bases de pavimentos flexíveis**. 2005. 195 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

LEE, J.; BRADSHAW, S.; EDIL, T.; BENSON, C. Quantifying the benefits of flue gas desulfurization gypsum in sustainable wallboard production. In: **World of Coal Ash (WOCA) Conference**. 2011.

LEVANDOWSKI, J.; KALKREUTH, W. Chemical and petrographical characterization of feed coal, fly ash and bottom ash from the Figueira Power Plant, Paraná, Brazil. **Int. J. Coal Geol.**, v. 77, p. 269-281, 2009.

LI, G.; WU, X. Influence of fly ash and its mean particle size on certain engineering properties of cement composite mortars. **Cement and Concrete Research**, v. 35, n. 6, p. 1128-1134, 2005.

LI, J.; ZHUANG, X.; QUEROL, X.; LEIVA, C.; FONT, O.; HE, Y. Manufacturing off fire-resistant panels using FGD gypsum and fly ash from power plants in Xinjiang, Northwest China. In: World of Coal Ash Conference, 5, 2013. Lexington. **Proceedings...** Lexington: WOCA, 2013.

LITTLE, J. Spray dryer ash finds a market. **Ash at Work**, n. 1, p. 10-11, 2008.

LIU, R. P.; YAO, R. Preparation Eco-Cement with Semi Dry FGD Ash from Steel Plant. In: **Applied Mechanics and Materials**. Trans Tech Publications, 2014. p. 379-382.

MALLMANN, J. E. C.; OLEG, Z. Uso de cinzas volante e de fundo em concreto compactado com rolo (CCR). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CARVÃO MINERAL, 4, 2013, Gramado. **Anais...** Criciúma: SATC, 2013.

MALHOTRA, S. K.; DAVE, N. G. Investigations into the effect of addition of flyash and burnt clay pozzolana on certain engineering properties of cement composites. **Cement and Concrete Composites**, v. 21, n. 4, p. 285-291, 1999.

MALHOTRA, V. M. **Value-Added Products From FGD Sulfite-Rich Scrubber Materials**. Final Scientific/Technical Report. United States. Department of Energy, 2010. Disponível em: <<https://www.osti.gov/scitech/servlets/purl/1005230>> Acesso em 06 de junho de 2017.

MARCIANO, Z. A. N. **Desenvolvimento de um Método Acelerado para Avaliação da Resistência de Argamassas de Cimento Portland Expostas à Solução de Sulfato de Sódio**. 1993. 202p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.

MARKEVICIUS, G.; STOLL, J.; MALHOTRA, V. M.; MILLER, C.; BOTHA, F. Development of Wood-Substitute Composites from FGD Sulfite-Rich Scrubber Material and Waste Plastic Bottles While Taming Potential Mercury Reemission. In: **World of Coal Ash (WOCA) Conference**. 2009.

MEHTA, P. K; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: IBRACON, 2014.

MIN, B. H.; ERWIN, L.; JENNINGS, H. M. Rheological behaviour of fresh cement paste as measured by squeeze flow. **Journal of materials science**, v. 29, n. 5, p. 1374-1381, 1994.

MODI, D. **Potential Utilization of FGD Gypsum for Reclamation of Abandoned Highwalls**. 2010. 170 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Ohio State University, Columbus, 2010.

MORAIS, T. A. **Estudo do uso do agregado miúdo reciclado de concreto na produção de argamassa de revestimento vertical**. 2011. 135 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2011.

MUKAKA, M. M. A guide to appropriate use of correlation coefficient in medical research. **Malawi Medical Journal**, v. 24, n. 3, p. 69-71, 2012.

NAMAGGA, C.; ATADERO, R. **Sustainable Concretes for Transportation Infrastructure** (No. MPC Report No. 10-220). Mountain Plains Consortium, 2010

NAMAGGA, C.; ATADERO, R. Valuable utilisation of spray dryer ash and its performance in structural concrete. **International Journal of Sustainable Engineering**, v. 4, n. 02, p. 153-163, 2011.

NETO, C. Z. M. **Absorção capilar e resistividade elétrica de concretos compostos com cinza de casca de arroz de diferentes teores de carbono grafítico**. 2011. 167 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria/RS, 2011.

NOKKEN, M.; BODDY, A.; WU, X.; HOOTON, R. D. Effects of temperature, chemical, and mineral admixtures on the electrical conductivity of concrete. **Journal of ASTM International**, v. 5, n. 5, p. 1-9, 2008.

OLIVIA, M.; NIKRAZ, H. R. Strength and Water Penetrability of Fly Ash Geopolymer Concrete. **Journal of Engineering and Applied Sciences**, v. 06, n. 07, p. 70-78, 2011.

PETERS, S. Flowable Fill Using Spray Dryer Ash. **Ash at Work**, p. 40-41, 2011.

PINHEIRO, H. S. **Processamento e caracterização de peças cerâmicas obtidas a partir do resíduo do granito Asa Branca com adição dos produtos da combustão do carvão mineral**. 2010. 77f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2010.

RAGO, F.; CINCOTTO, M. A. **A reologia da pasta de cimento e a influência da cal**. In: **Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas**. Goiânia, 1995. Artigo técnico. 1º ed.

REN, L.; WANG, W.; MA, C.; XU, X.; DONG, Y. Study on a New Utilization Method for Dry and Semi-Dry Desulfurization FDG Residues. In: **Power and Energy Engineering Conference, 2009. APPEEC 2009. Asia-Pacific**. IEEE, 2009.

RIGOTTO, R. M. Inserção da saúde nos estudos de impacto ambiental: o caso de uma termelétrica a carvão mineral no Ceará. **Ciência & Saúde Coletiva**, v. 14, n. 6, p. 2049-2059, 2009.

RILEY, C.; ATADERO, R.; LINDT, J.; HEYLIGER, P. Cementitious Spray Dryer Ash-Tire Fiber Material for Maximizing Waste Diversion. **Advances in Civil Engineering**, v. 2011, 2011.

RILEM. Test nº II.4. Water absorption under low pressure (pipe method). In: Rilem Commission 25-PEM (Protection et érosion des monuments) Recommended tests to measure the deterioration of stone and to assess the effectiveness of treatment methods. **Materials and Structures**, v. 13, n. 75, p. 175-253, 1980.

RODRIGUES, P. P. F. **Parâmetros de dosagem do concreto**. Associação Brasileira de Cimento Portland - ABCP, ET-67 2a edição. São Paulo, Brasil, 1995.

ROHDE, G. M. Cinzas, a outra metade do carvão fóssil – nova estratégia para a termelétrica. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CARVÃO MINERAL, 4, 2013, Gramado. **Anais...** Criciúma: SATC, 2013.

ROSSI C.; Santos, F.; ZANCHETTA, L.; RONÇANI, M.; RUBBO, P.; GEREMIAS, R.; BILÉSIMO, T. Carvão mineral, energia e meio ambiente. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CARVÃO MINERAL, 4, 2013, Gramado. **Anais...** Criciúma: SATC, 2013.

SABBATINI, F. H. Argamassas de assentamento para paredes de alvenaria resistente. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Construção Civil, **Boletim técnico**, São Paulo, v. 2, 1994.

SAHU, S.; BROWN, S.; LEE, R. Thauasite formation in stabilized coal combustion by-products. **Cement and Concrete Composites**, v. 24, n. 3, p. 385-391, 2002.

SAMPAIO, K. N. H. **Avaliação técnica da utilização de cinzas de combustão do carvão mineral proveniente de termelétrica em argamassas de revestimento.** 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de pós-graduação em engenharia civil: estruturas e construção civil, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2017.

SANT'ANA, R. **Análise de Variância (ANOVA).** Disponível em: <<http://lite.acad.univali.br/curso/anova/index.html>>. Acesso em 27 de novembro de 2018.

SANTOS, D. V. **Análise técnica e financeira da reciclagem de resíduos de construção civil: estudo de caso.** 2018. 135 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de pós-graduação em engenharia civil: estruturas e construção civil, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018.

SANTOS, G. D. V. M. Breves considerações sobre a problemática ambiental e o uso do carvão mineral na matriz energética brasileira. **Revista Grifos**, Chapecó, v.23, n. 36/37, 2014.

SHEN, Y.; YANG, L.; LI, C.; CHEN, C.; LIU, S. The Study on Thermal Stability of Hg and S Element in Semi-dry Flue Gas Desulfurization Ash. **Applied Mechanics & Materials**, v. 768, 2015.

SILVA, D. A. A. **Estudo das propriedades mecânicas e de durabilidade do concreto com cinzas da termelétrica do Pecém/CE.** 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de pós-graduação em engenharia civil: estruturas e construção civil, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2017.

SILVA, P.; DE BRITO, J. Electrical resistivity and capillarity of self-compacting concrete with incorporation of fly ash and limestone filler. **Adv. Concr. Construct**, v. 1, n. 1, p. 65-84, 2013.

STAMM, H. R. **Método para avaliação de impacto ambiental (AIA) em projetos de grande porte: estudo de caso de uma usina termelétrica.** 2003. 284 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Industrial, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.

SU, Q.; JIANG, Y.; LU, M.; CHEN, Y.; WU, M.. Development of Dry FGD By-Product Utilization as Building Materials in China. In: **World of Coal Ash (WOCA) Conference.** 2013.

SWEET, P. C. Use of coal combustion products in Virginia. In: **International Ash Utilization Symposium**, Center for Applied Energy Research, University of Kentucky, Paper#14, 2001.

TAERAKUL, P.; SUN, P.; GOLIGHTLY, D.; BUTALIA, T.; WALKER, H.; Weavers, L. Characterization of Hg, As and Se in lime spray dryer ash. In: **International Ash Utilization Symposium**, Center for Applied Energy Research, University of Kentucky, 2003.

TEIXEIRA, J. M. C. **Utilização dos produtos da combustão do carvão mineral como aditivos na produção de argamassa para revestimento.** 2013. 101 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2013.

TERMOPE. **Matriz Energética**. Disponível em:

<<http://www.termope.com.br/Pages/O%20Setor%20E1%C3%A9trico/matriz-energetica.aspx>>
Acesso em 03 de outubro de 2016.

THOMAS, M. D. A. **Optimizing the use of fly ash in concrete**. Skokie, IL: Portland Cement Association, 2007.

THURLOW, M. **Sulfuric Acid Mist: Regulating Uncertainties**. 2012. Disponível em:

<<http://elq.typepad.com/currents/2012/12/sulfuric-acid-mist-regulating-uncertainties.html#update>> acesso em 27 de julho de 2017.

TIRUTA-BARNA, L.; BARNA, R. Potential hazards from waste based/recycled building materials. In: **Toxicity of Building Materials**, Editado por Pacheco-Torgal, F.; Jalali, S.; Fucic, A., pp.391-426. Elsevier, Woodhead Publishing Limited, 2012.

TOMER, B.; HUBER, W. **Commercial demonstration of the manufactured aggregate processing technology utilizing spray dryer ash**. Disponível em:

<<https://www.netl.doe.gov/File%20Library/Research/Coal/major%20demonstrations/ppii/proj217.pdf>> Acesso em 07 de junho de 2017.

TOUTOU, Z.; ROUSSEL, N.; LANOS, C. The squeezing test: a tool to identify firm cement-based material's rheological behaviour and evaluate their extrusion ability. **Cement and Concrete Research**, v. 35, n. 10, p. 1891-1899, 2005.

TSIMAS, S.; MOUTSATSOU-TSIMA, A. High-calcium fly ash as the fourth constituent in concrete: problems, solutions and perspectives. **Cement and Concrete Composites**, v. 27, n. 2, p. 231-237, 2005.

VAN DE LINDT, J.; RECHAN, R. Seismic Performance Comparison of a High-Content SDA Frame and Standard RC Frame. **Advances in Civil Engineering**, v. 2011, 2011.

VEIGA, M. R. S. **Comportamento de Argamassas de Revestimento de Paredes: Contribuição para o estudo da sua resistência à fendilhação**. Lisboa: LNEC, 1998.

VIEIRA, A. A. P. **Estudo do aproveitamento de resíduos de cerâmica vermelha como substituição pozolânica em argamassas e concretos**. 2005. 129 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2005.

WANG, H.; WANG, F.; ZHANG, F. Experimental Study on Semi-Dry FGD Residues for Brick Making. **Research of Environmental Sciences**, Pequim, v.17, n.1, p. 74-76, 2004
WATTS, D. B.; TORBERT, H. A. Use of FGD gypsum on a bermudagrass pasture in the Appalachian Plateau Region. In: **In 2011 World of coal ash (WOCA) conference**. 2011.

WATTS, Dexter B.; TORBERT, H. Allen. Use of FGD gypsum on a bermudagrass pasture in the Appalachian Plateau Region. In: **In 2011 World of coal ash (WOCA) conference**. 2011.

WHITING, D. A.; NAGI, M. A. Electrical resistivity of concrete-a literature review. **R&D Serial**, v. 2457, Portland Cement Association, Skokie, Illinois, EUA, 2003.

WOLFE, W.; LEE, R.; BUTALIA, T.; BROWN, S. The effect of ettringite formation on expansion properties of compacted spray dryer ash. In: **2001 International Ash Utilization Symposium. Hyatt Regency, Lexington, KY, Center for Applied Energy Research, University of Kentucky.** 2001.

WOODHEAD, P.; PARKER, J. **Behavior of blocks of consolidated spray dryer flue gas desulfurization wastes in the sea.** Final report to: A/S Niro Atomizer, 305 Gladsaxevej, DK-2860 Soeborg, Denmark, 1984. Disponível em:
<<https://dspace.sunyconnect.suny.edu/bitstream/handle/1951/61637/Special%20Report%2057.pdf?sequence=1&isAllowed=y>> Acesso em 08 de junho de 2017.

WU, M. M. **Durability Evaluation and Production of Manufactured Aggregates from Coal Combustion By-Products.** 2005. Disponível em:
<https://www.netl.doe.gov/File%20Library/Research/Coal/ewr/solid%20waste/RAW64-FINAL-COMLETE_1.pdf> Acesso em 07 de junho de 2017.

WU, M.; JIANG, Y.; SU, Q.; ROBL, T.; JEWELL, R.; BUTALIA, T.; ZHANG, W.; WOLFE, W. Dry FGD By-Product Characteristics and Utilization-International Perspective. In: **World of Coal Ash (WOCA) Conference.** 2013.

WU, Z.; NAIK, T. Chemically activated blended cements. **ACI Materials Journal**, v. 100, n. 5, p. 434-440, 2003.

XAVIER, M. F. **Avaliação do uso de cinzas de carvão mineral como melhorador de adesividade em misturas asfálticas.** 2016. 118 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de pós-graduação em engenharia de transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016.

YAMEI, Z.; WEI, S.; LIANFEI, S. Mechanical properties of high performance concrete made with high calcium high sulfate fly ash. **Cement and Concrete research**, v. 27, n. 7, p. 1093-1098, 1997.

ZAREMBA, T.; MOKROSZ, W.; HEHLMANN, J.; SZWALIKOWSKA, A.; STAPIŃSKI, G. Properties of the wastes produced in the semi-dry FGD installation. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 93, n.2, p.439-443, 2008.

ZHONG, S.; NI, K.; LI, J. Properties of mortars made by uncalcined FGD gypsum-fly ash-ground granulated blast furnace slag composite binder. **Waste management**, v. 32, n. 7, p. 1468-1472, 2012.

APÊNDICE A – ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS

Tabela A1 – Análise de variância da resistência à compressão do concreto aos 3 dias.

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>	<i>Significância</i>
Entre grupos	64,21055	3	21,40352	25,95152	0,004404	6,591382	S
Dentro dos grupos	3,299	4	0,82475				
Total	67,50955	7					

Fonte: Autor (2018).

Tabela A2 – Comparação de pares por Turkey (Q/valor-P): Resistência à compressão do concreto aos 3 dias.

	<i>R</i>	<i>S5</i>	<i>S10</i>	<i>S20</i>
R		0,9106	0,02184	0,01034
S5	0,9188		0,01449	0,007327
S10	7,381	8,3		0,6415
S20	9,125	10,04	1,744	

Fonte: Autor (2018).

Tabela A3 – Análise de variância da resistência à compressão do concreto aos 7 dias.

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>	<i>Significância</i>
Entre grupos	34,41364	3	11,47121	5,727266	0,062494	6,591382	NS
Dentro dos grupos	8,01165	4	2,002913				
Total	42,42529	7					

Fonte: Autor (2018).

Tabela A4 – Análise de variância da resistência à compressão do concreto aos 28 dias.

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>	<i>Significância</i>
Entre grupos	133,8219	3	44,60728	11,46415	0,019632	6,591382	S
Dentro dos grupos	15,5641	4	3,891025				
Total	149,386	7					

Fonte: Autor (2018).

Tabela A5 – Comparação de pares por Turkey (Q/valor-P): Resistência à compressão do concreto aos 28 dias.

	<i>R</i>	<i>S5</i>	<i>S10</i>	<i>S20</i>
R		0,9152	0,1182	0,04049
S5	0,8998		0,06801	0,02562
S10	4,323	5,223		0,6131
S20	6,148	7,048	1,825	

Fonte: Autor (2018).

Tabela A6 – Análise de variância da resistência à compressão do concreto aos 91 dias.

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>	<i>Significância</i>
Entre grupos	262,5049	3	87,50163	6,147292	0,0559	6,591382	NS
Dentro dos grupos	56,9367	4	14,23418				
Total	319,4416	7					

Fonte: Autor (2018).

Tabela A7 – Comparação de pares por Turkey (Q/valor-P): Resistência à compressão do concreto aos 91 dias.

	<i>R</i>	<i>S5</i>	<i>S10</i>	<i>S20</i>
R		0,3115	0,2672	0,04225
S5	2,877		0,9984	0,2513
S10	3,102	0,2249		0,293
S20	6,069	3,192	2,967	

Fonte: Autor (2018).

Tabela A8 – Análise de variância da velocidade de propagação das ondas ultrassônicas.

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>	<i>Significância</i>
Entre grupos	6977,486	3	2325,829	3,319648	0,13836	6,591382	NS
Dentro dos grupos	2802,5	4	700,625				
Total	9779,986	7					

Fonte: Autor (2018).

Tabela A9 – Análise de variância da resistividade elétrica superficial.

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>	<i>Significância</i>
Entre grupos	142,2	3	47,4	418,2353	1,89E-05	6,591382	S
Dentro dos grupos	0,453333	4	0,113333				
Total	142,6533	7					

Fonte: Autor (2018).

Tabela A10 – Comparação de pares por Turkey (Q/valor-P): Resistividade elétrica superficial.

	<i>R</i>	<i>S5</i>	<i>S10</i>	<i>S20</i>
R		0,003625	0,000743	0,000292
S5	12,18		0,02009	0,000301
S10	19,74	7,562		0,000366
S20	48,17	35,99	28,43	

Fonte: Autor (2018).

Tabela A11 – Análise de variância da absorção de água.

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>	<i>Significância</i>
Entre grupos	7,88E-05	3	2,63E-05	13,42103	0,00173	4,066181	S
Dentro dos grupos	1,56E-05	8	1,96E-06				
Total	9,44E-05	11					

Fonte: Autor (2018).

Tabela A12 – Comparação de pares por Turkey (Q/valor-P): Absorção de água.

	<i>R</i>	<i>S5</i>	<i>S10</i>	<i>S20</i>
R		0,01132	0,001445	0,01012
S5	6,082		0,3341	0,9998
S10	8,6047	2,565		0,3715
S20	6,206	0,1241	2,441	

Fonte: Autor (2018).

Tabela A13 – Análise de variância do índice de vazios.

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>	<i>Significância</i>
Entre grupos	0,000302	3	0,000101	11,95713	0,002514	4,066181	S
Dentro dos grupos	6,74E-05	8	8,43E-06				
Total	0,00037	11					

Fonte: Autor (2018).

Tabela A14 – Comparação de pares por Turkey (Q/valor-P): Índice de vazios.

	<i>R</i>	<i>S5</i>	<i>S10</i>	<i>S20</i>
R		0,01698	0,002042	0,01526
S5	5,644		0,3513	0,9998
S10	8,151	2,507		0,3965
S20	5,758	0,1134	2,394	

Fonte: Autor (2018).

Tabela A15 – Análise de variância da massa específica.

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>	<i>Significância</i>
Entre grupos	0,002433	3	0,000811	7,601646	0,00996	4,066181	S
Dentro dos grupos	0,000853	8	0,000107				
Total	0,003286	11					

Fonte: Autor (2018).

Tabela A16 – Comparação de pares por Turkey (Q/valor-P): Massa específica.

	R	S5	S10	S20
R		0,03733	0,009374	0,03349
S5	4,827		0,7352	0,9998
S10	6,29	1,463		0,7767
S20	4,937	0,1106	1,353	

Fonte: Autor (2018).

Tabela A17 – Análise de variância da variação volumétrica das barras expostas à solução agressiva e ao ataque por sulfato interno.

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico	Significância
Entre grupos	5,0148E-05	3	1,6716E-05	0,050018187	0,98414156	4,06618055	NS
Dentro dos grupos	0,00267359	8	0,0003342				
Total	0,00272373	11					

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico	Significância
Entre grupos	0,00040833	3	0,00013611	0,744190854	0,55523469	4,06618055	NS
Dentro dos grupos	0,00146317	8	0,0001829				
Total	0,0018715	11					

Fonte: Autor (2018).

Tabela A18 – Análise de variância da densidade de massa aparente.

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico	Significância
Entre grupos	0,002260295	3	0,000753	1,273385	0,347329	4,066181	NS
Dentro dos grupos	0,00473341	8	0,000592				
Total	0,006993704	11					

Fonte: Autor (2018).

Tabela A19 – Análise de variância do módulo de elasticidade dinâmico.

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico	Significância
Entre grupos	22,9726896	3	7,657563	12,44615	0,00221	4,066181	S
Dentro dos grupos	4,92204433	8	0,615256				
Total	27,89473394	11					

Fonte: Autor (2018).

Tabela A20 – Comparação de pares por Turkey (Q/valor-P): Módulo de elasticidade dinâmico.

	R	33%	67%	100%
R		0,02738	0,002383	0,00544
33%	5,144		0,2711	0,6162
67%	7,944	2,8		0,8822
100%	6,91	1,767	1,034	

Fonte: Autor (2018).

Tabela A21 – Análise de variância da resistência à tração na flexão aos 3 dias.

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico	Significância
Entre grupos	0,427128	3	0,142376	4,170969	0,047174	4,066181	S
Dentro dos grupos	0,27308	8	0,034135				
Total	0,700208	11					

Fonte: Autor (2018).

Tabela A22 – Comparação de pares por Turkey (Q/valor-P): Resistência à tração na flexão aos 3 dias.

	R	33%	67%	100%
R		0,8251	0,04314	0,2374
33%	1,216		0,1443	0,6313
67%	4,68	3,464		0,6284
100%	2,944	1,728	1,736	

Fonte: Autor (2018).

Tabela A23 – Análise de variância da resistência à tração na flexão aos 7 dias.

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico	Significância
Entre grupos	0,060977	3	0,020326	0,129064	0,94014	4,066181	NS
Dentro dos grupos	1,259878	8	0,157485				
Total	1,320854	11					

Fonte: Autor (2018).

Tabela A24 – Análise de variância da resistência à tração na flexão aos 28 dias.

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico	Significância
Entre grupos	8,85363	3	2,95121	6,290492	0,016866	4,066181	S
Dentro dos grupos	3,753233	8	0,469154				
Total	12,60686	11					

Fonte: Autor (2018).

Tabela A25 – Comparação de pares por Turkey (Q/valor-P): Resistência à tração na flexão aos 28 dias.

	R	33%	67%	100%
R		0,06144	0,03481	0,01886
33%	4,324		0,9759	0,8274
67%	4,898	0,5743		0,9681
100%	5,533	1,209	0,6348	

Fonte: Autor (2018).

Tabela A26 – Análise de variância da resistência à compressão aos 3 dias.

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico	Significância
Entre grupos	2,337074	3	0,779025	17,73263	7,44E-06	3,098391	S
Dentro dos grupos	0,878634	20	0,043932				
Total	3,215708	23					

Fonte: Autor (2018).

Tabela A27 – Comparação de pares por Turkey (Q/valor-P): Resistência à compressão aos 3 dias.

	R	33%	67%	100%
R		0,007913	0,000177	0,06341
33%	5,175		0,01022	0,764
67%	10,19	5,011		0,00123
100%	3,793	1,382	6,392	

Fonte: Autor (2018).

Tabela A28 – Análise de variância da resistência à compressão aos 7 dias.

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico	Significância
Entre grupos	2,146697	3	0,715566	15,95232	1,57E-05	3,098391	S
Dentro dos grupos	0,897131	20	0,044857				
Total	3,043827	23					

Fonte: Autor (2018).

Tabela A29 – Comparação de pares por Turkey (Q/valor-P): Resistência à compressão aos 7 dias.

	R	33%	67%	100%
R		0,003535	0,000179	0,001526
33%	5,691		0,05144	0,979
67%	9,631	3,94		0,1108
100%	6,245	0,5546	3,385	

Fonte: Autor (2018).

Tabela A30 – Análise de variância da resistência à compressão aos 28 dias.

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>	<i>Significância</i>
Entre grupos	20,31757	3	6,772524	97,52271	4,13E-12	3,098391	S
Dentro dos grupos	1,388912	20	0,069446				
Total	21,70648	23					

Fonte: Autor (2018).

Tabela A31 – Comparação de pares por Turkey (Q/valor-P): Resistência à compressão aos 28 dias.

	<i>R</i>	<i>33%</i>	<i>67%</i>	<i>100%</i>
R		0,000175	0,000175	0,000175
33%	16,16		0,000343	0,2706
67%	23,67	7,503		0,000177
100%	13,51	2,649	10,15	

Fonte: Autor (2018).

Tabela A32 – Análise de variância da resistência de aderência à tração em blocos cerâmicos.

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>	<i>Significância</i>
Entre grupos	0,032189	3	0,01073	0,44151	0,724475	2,816466	NS
Dentro dos grupos	1,069288	44	0,024302				
Total	1,101477	47					

Fonte: Autor (2018).

Tabela A33 – Análise de variância da resistência de aderência à tração em alvenaria.

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>	<i>Significância</i>
Entre grupos	0,081018	3	0,027006	0,892895	0,452352	2,816466	NS
Dentro dos grupos	1,330793	44	0,030245				
Total	1,411811	47					

Fonte: Autor (2018).

Tabela A34 – Análise de variância da resistência de aderência à tração em estruturas de concreto.

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>	<i>Significância</i>
Entre grupos	0,196565	3	0,065522	1,284876	0,291378	2,816466	NS
Dentro dos grupos	2,243756	44	0,050994				
Total	2,440321	47					

Fonte: Autor (2018).

Tabela A35 – Análise de variância entre substratos diferentes à resistência de aderência.

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>	<i>Significância</i>
Entre grupos	0,02375	2	0,011875	4,140219	0,0531	4,256495	NS
Dentro dos grupos	0,025814	9	0,002868				
Total	0,049565	11					

Fonte: Autor (2018).

Tabela A36 – Análise de variância da absorção de água por capilaridade e coeficiente de capilaridade.

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>	<i>Significância</i>
Entre grupos	19,6186	3	6,539533	18,49241	0,000589	4,066181	S
Dentro dos grupos	2,829066667	8	0,353633				
Total	22,44766667	11					

Fonte: Autor (2018).

Tabela A37 – Comparação de pares por Turkey (Q/valor-P): Absorção de água por capilaridade e coeficiente de capilaridade.

	<i>R</i>	<i>33%</i>	<i>67%</i>	<i>100%</i>
R		0,00208	0,001134	0,001528
33%	8,126		0,919	0,9891
67%	9,019	0,8932		0,9876
100%	8,563	0,4369	0,4563	

Fonte: Autor (2018).

Tabela A38 – Análise de variância do coeficiente de percolação (Tubo Rilem).

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>	<i>Significância</i>
Entre grupos	0,21375	3	0,07125	0,826086957	0,544248078	6,5913821	NS
Dentro dos grupos	0,345	4	0,08625				
Total	0,55875	7					

Fonte: Autor (2018).

Tabela A39 – Análise de variância da variação dimensional.

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>	<i>Significância</i>
Entre grupos	0,001114	3	0,000371	2,221597	0,163139	4,066181	NS
Dentro dos grupos	0,001337	8	0,000167				
Total	0,002451	11					

Fonte: Autor (2018).

Tabela A40 – Análise de variância da variação mássica.

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>	<i>Significância</i>
Entre grupos	0,029231	3	0,009744	2,643029	0,120826	4,066181	NS
Dentro dos grupos	0,029492	8	0,003687				
Total	0,058723	11					

Fonte: Autor (2018).

APÊNDICE B – DADOS BRUTOS DOS ENSAIOS REALIZADOS

Tabela B1 – Dados brutos dos resultados de resistência à compressão dos concretos.

	3 dias			7 dias			28 dias			91 dias		
	CP1	CP2	Média	CP1	CP2	Média	CP1	CP2	Média	CP1	CP2	Média
Referência (R)	17,0	18,1	17,6	22,2	24,7	23,4	32,6	29,4	31,0	28,3	34,6	31,5
5% de SDA (S5)	16,9	17,1	17,0	23,9	23,5	23,7	30,8	28,7	29,7	38,3	40,0	39,2
10% de SDA (S10)	22,8	21,8	22,3	26,1	26,0	26,0	38,8	35,2	37,0	36,0	43,5	39,8
20% de SDA (S20)	22,4	24,5	23,4	27,0	30,1	28,6	38,7	40,5	39,6	49,6	45,8	47,7

Fonte: Autor (2018).

Tabela B2 – Dados brutos dos resultados de resistividade elétrica superficial dos concretos.

	Resistividade (k Ω .cm)		
	CP1	CP2	Média
Referência (R)	11,9	11,7	11,80
5% de SDA (S5)	14,9	14,5	14,70
10% de SDA (S10)	16,9	16,1	16,50
20% de SDA (S20)	23,0	23,5	23,27

Fonte: Autor (2018).

Tabela B3 – Dados brutos dos resultados de velocidade de propagação de ondas ultrassônicas nos concretos.

	Ultrassom - velocidade (m/s)		
	CP1	CP2	Média
Referência (R)	5057	5030	5043,33
5% de SDA (S5)	5069	5121	5095,33
10% de SDA (S10)	5091	5065,3	5078,17
20% de SDA (S20)	5144,3	5105,7	5125,0

Fonte: Autor (2018).

Tabela B4 – Dados brutos dos resultados da absorção de água por capilaridade (continua)

Identificação do traço		Altura da ascensão capilar (cm)	Absorção 3h (g/cm ²)	Absorção 6h (g/cm ²)	Absorção 24h (g/cm ²)	Absorção 48h (g/cm ²)	Absorção 72h (g/cm ²)
R	CP1	3	0,19	0,25	0,39	0,52	0,57
	CP2	2	0,24	0,31	0,48	0,60	0,64
	CP3	2	0,17	0,20	0,33	0,41	0,46
	MÉDIA	2,3	0,20	0,25	0,40	0,51	0,56

Fonte: Autor (2018).

Tabela B4 – Dados brutos dos resultados da absorção de água por capilaridade (conclusão)

Identificação do traço		Altura da ascensão capilar (cm)	Absorção 3h (g/cm ²)	Absorção 6h (g/cm ²)	Absorção 24h (g/cm ²)	Absorção 48h (g/cm ²)	Absorção 72h (g/cm ²)
S5	CP1	2	0,17	0,22	0,38	0,48	0,52
	CP2	1,5	0,15	0,23	0,42	0,53	0,57
	CP3	1,5	0,23	0,28	0,42	0,51	0,56
	MÉDIA	1,7	0,18	0,24	0,41	0,51	0,55
S10	CP1	1	0,23	0,31	0,46	0,55	0,64
	CP2	0,5	0,22	0,27	0,38	0,46	0,55
	CP3	1	0,22	0,28	0,41	0,50	0,60
	MÉDIA	0,8	0,22	0,28	0,42	0,50	0,59
S20	CP1	1	0,22	0,29	0,41	0,47	0,56
	CP2	0,5	0,19	0,27	0,45	0,52	0,60
	CP3	0,5	0,19	0,25	0,36	0,41	0,51
	MÉDIA	0,7	0,20	0,27	0,40	0,47	0,56

Fonte: Autor (2018).

Tabela B5 – Dados brutos dos resultados da absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica

R	ms	mi	msat	A	lv	ps
1	3,44	2,114	3,637	6%	13%	2,26
2	3,457	2,122	3,663	6%	13%	2,24
3	3,499	2,158	3,711	6%	14%	2,25
			Média	5,91%	13,32%	2,25
S5	ms	mi	msat	A	lv	ps
1	3,491	2,151	3,679	5%	12%	2,28
2	3,474	2,13	3,661	5%	12%	2,27
3	3,523	2,177	3,717	6%	13%	2,29
			Média	5,42%	12,37%	2,28
S10	ms	mi	msat	A	lv	ps
1	3,496	2,147	3,68	5%	12%	2,28
2	3,536	2,18	3,717	5%	12%	2,30
3	3,503	2,156	3,688	5%	12%	2,29
			Média	5,22%	11,95%	2,29
S20	ms	mi	msat	A	lv	ps
1	3,5	2,155	3,682	5%	12%	2,29
2	3,453	2,122	3,645	6%	13%	2,27
3	3,481	2,148	3,672	5%	13%	2,28
			Média	5,42%	12,35%	2,28

Fonte: Autor (2018).

Tabela B6 – Dados brutos dos resultados de variação dimensional das barras sujeitas à solução agressiva de sulfato de sódio

	Água com cal			Solução agressiva			Expansão		
	14 dias	28 dias	42 dias	14 dias	28 dias	42 dias	14 dias	28 dias	42 dias
Referência (R)	0,003	0,009	0,002	0,008	0,018	0,014	0,005	0,009	0,012
5% de SDA (S5)	0,003	0,009	0,017	0,008	0,017	0,026	0,005	0,008	0,009
10% de SDA (S10)	0,004	0,006	0,011	0,008	0,012	0,019	0,004	0,006	0,008
20% de SDA (S20)	0,002	0,008	0,005	0,005	0,012	0,011	0,003	0,004	0,006

Fonte: Autor (2018).

Tabela B7 – Dados brutos dos resultados de densidade de massa e teor de ar incorporado em argamassas.

R		33% de SDA		67% de SDA		100% de SDA	
d (g/cm ³)	2,0236	d (g/cm ³)	2,028778	d (g/cm ³)	2,0574	d (g/cm ³)	2,080756
A	0,023215	A	0,032505	A	0,020247	A	0,00383
mtot	1528,62	mtot	1530,95	mtot	1543,83	mtot	1554,34
mr	618	mr	618	mr	618	mr	618
vr	450	vr	450	vr	450	vr	450
dt	2,071694	dt	2,096939	dt	2,099916	dt	2,088755

Fonte: Autor (2018).

Tabela B8 – Dados brutos dos resultados de retenção de água em argamassas.

Traço	mw	m	AF	mv	ma	ms	Ra
Referência	210,67	1032,34	0,169484	820,24	1678,91	1646,29	0,775855
33% de SDA	198,46	1033,89	0,161042	816,53	1640,69	1616,14	0,81503
67% de SDA	198,46	1035,45	0,160838	818,81	1651,92	1621,19	0,770665
100% de SDA	206,09	1037	0,165788	819,31	1635,19	1606,21	0,785752

Fonte: Autor (2018).

Tabela B9 – Dados brutos dos resultados de densidade de massa aparente e módulo de elasticidade dinâmico em argamassas.

		R			33%			67%			100%		
		A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
Densidade aparente	altura (mm)	40,15	39,9	39,8	39,9	40,1	40,1	40,25	40,2	40	40	40,1	40,3
	largura (mm)	40,2	39,9	40,1	40	39,5	39,5	40,6	40,7	40,7	40,1	40	40
	comprimento (mm)	160,1	160,1	160,0	161	161,2	160,5	160,2	160,5	160,1	159,9	160,1	160,2
	massa (g)	480,95	483,26	486,62	493,62	478,47	496,84	504,74	505,7	501	483,98	492,05	492,7
	volume (cm ³)	258,41	254,9	255,4	257,0	255,3	254,3	262,1	263,0	260,6	256,5	256,9	258,2
	densidade amostra (g/cm ³)	1,86	1,90	1,91	1,92	1,87	1,95	1,93	1,92	1,92	1,89	1,92	1,91
	densidade média (g/cm ³)	1,89			1,92			1,92			1,90		
Mod. E. last.	velocidade (m/s)	2812	2787	2837	3042	3002	3025	3200	3071	3137	3213	3143	2968
	Ed amostral (GPa)	13,2	13,3	13,8	16,0	15,2	16,1	17,7	16,3	17,0	17,5	17,0	15,1
	Ed médio (GPa)	13,4			15,8			17,0			16,6		

Fonte: Autor (2018).

Tabela B10 – Dados brutos dos resultados de resistência à tração na flexão em argamassas

	3 dias	7 dias	28 dias
R	Resist (Mpa)		
1	1,45	2,89	2,46
2	1,16	1,46	3,61
3	1,38	4,16	3,59
33%	Resist (Mpa)		
1	1,50	2,06	5,45
2	1,31	1,86	6,60
3	1,57	2,32	3,87
67%	Resist (Mpa)		
1	1,79	2,15	5,50
2	1,93	2,20	5,57
3	1,76	1,84	5,07
100%	Resist (Mpa)		
1	1,98	1,89	5,83
2	1,47	2,15	4,88
3	1,47	1,89	5,74

Fonte: Autor (2018).

Tabela B11 – Dados brutos dos resultados de resistência à compressão em argamassas (continua)

	3 dias	7 dias	28 dias
R	Resist (Mpa)	Resist (Mpa)	Resist (Mpa)
1	4,20	6,92	9,43
2	3,78	7,31	9,90
3	3,89	7,28	9,69
4	3,84	7,38	9,76
5	3,93	7,29	9,65
6	3,66	7,12	9,97
33%	Resist (Mpa)	Resist (Mpa)	Resist (Mpa)
1	4,33	6,80	12,31
2	4,48	6,91	11,71
3	3,95	6,68	11,48
4	4,20	6,37	11,28
5	4,46	6,96	11,74
6	4,53	6,63	11,15
67%	Resist (Mpa)	Resist (Mpa)	Resist (Mpa)
1	4,70	5,82	11,78
2	4,89	6,50	12,29
3	4,67	6,15	12,61
4	4,53	6,38	11,56
5	4,82	6,50	12,60
6	4,91	7,16	12,12

Fonte: Autor (2018).

Tabela B11 – Dados brutos dos resultados de resistência à compressão em argamassas (conclusão)

	3 dias	7 dias	28 dias
100%	Resist (Mpa)	Resist (Mpa)	Resist (Mpa)
1	4,18	6,32	11,45
2	4,40	6,33	10,45
3	3,74	6,04	10,80
4	4,13	7,00	11,59
5	4,26	6,76	12,42
6	4,54	6,97	10,92

Fonte: Autor (2018).

Tabela B12 – Dados brutos dos resultados de permeabilidade em argamassas

	5				10			15			Coefficiente de percolação		
	Amos- tra 1	Amos- tra 2	Mé- dia	Amos- tra 1	Amos- tra 2	Mé- dia	Amos- tra 1	Amos- tra 2	Mé- dia	cm ³ /10min			
R	0,5	3,1	0,9	0,7	0,8	2,6	1,4	1,1	1,1	2,1	1,9	1,5	0,8
33 %	0,9	3,3	0,7	0,8	1,2	2,7	1,3	1,25	1,4	2,1	1,9	1,65	0,85
67 %	0,5	3,7	0,3	0,4	0,8	3,4	0,6	0,7	1	3,2	0,8	0,9	0,5
100 %	0,6	3,6	0,4	0,5	0,9	3,9	0,1	0,5	1,2	3,2	0,8	1	0,5

Fonte: Autor (2018).

Tabela B13 – Dados brutos dos resultados de resistência de aderência à tração em blocos cerâmicos

	Corpo de Prova (mm)					Carga de ruptura (N)	Tensão de ruptura (Mpa)	Forma de ruptura (%)						
	#	d1	d2	dm	Área			Sub.	Sub/Chap	Chap.	Chap/Arg	Arg.	Ag/Cola	Cola/Past.
R	1	49,45	49,3	49,375	1914,715	647	0,34	100						
	2	49,2	49,3	49,25	1905,032	431	0,23	100						
	3	49,65	50	49,825	1949,775	605	0,31	100						
	4	48,7	49,2	48,95	1881,895	813	0,43	100						
	5	50	49,3	49,65	1936,103	635	0,33				40	60		
	6	49,1	49,3	49,2	1901,166	599	0,32				90	10		
	7	49,9	49,4	49,65	1936,103	326	0,17				40	60		
	8	49,55	49,2	49,375	1914,715	882	0,46	100						
	9	49,2	49,6	49,4	1916,654	1198	0,63					100		
	10	48,75	49	48,875	1876,132	691	0,37	100						
	11	49,4	49,5	49,45	1920,536	555	0,29				80	20		
	12	47,9	48,85	48,375	1837,942	295	0,16				70	30		
33%	1	48,65	49,3	48,975	1883,817	688	0,37				80	20		
	2	48,55	48,55	48,55	1851,264	279	0,15				100			
	3	49,25	49,35	49,3	1908,902	656	0,34				80	20		
	4	49,4	49	49,2	1901,166	243	0,13				90	10		
	5	49,25	49,2	49,225	1903,099	756	0,40				80	20		
	6	48,7	48,8	48,75	1866,548	223	0,12				70	30		
	7	48,8	48,9	48,85	1874,213	172	0,09				50	50		
	8	50	50	50	1963,495	1372	0,70	80			20			
	9	50	50	50	1963,495	1398	0,71	100						
	10	50	50	50	1963,495	1214	0,62	90	10					
	11	50	50	50	1963,495	691	0,35	90	10					
	12	50	50	50	1963,495	1266	0,64	90	10					
67%	1	49,5	49,5	49,5	1924,422	904	0,47				80	20		
	2	49,65	49,7	49,675	1938,053	765	0,39				100			
	3	49,5	49,5	49,5	1924,422	813	0,42	100						
	4	49,4	49,65	49,525	1926,366	522	0,27	100						
	5	49,5	49,9	49,7	1940,004	882	0,45	100						
	6	50	49,65	49,825	1949,775	817	0,42	100						
	7	49,7	49,65	49,675	1938,053	1004	0,52				100			
	8	49,55	49,95	49,75	1943,91	696	0,36	100						
	9	49,65	49,6	49,625	1934,153	750	0,39	100						
	10	49,6	49,65	49,625	1934,153	784	0,41	100						
	11	49,6	49,7	49,65	1936,103	1202	0,62	100						
	12	49,65	49,4	49,525	1926,366	294	0,15	100						
100%	1	49,6	49,6	49,6	1932,205	663	0,34	100						
	2	49,9	49,8	49,85	1951,732	1090	0,56				100			
	3	50,1	49,85	49,975	1961,532	868	0,44	100						
	4	50	50	50	1963,495	1132	0,58	100						
	5	49,7	49,8	49,75	1943,91	629	0,32	100						
	6	49,9	49,9	49,9	1955,649	553	0,28	100						
	7	49,85	49,8	49,825	1949,775	422	0,22	80			20			
	8	49,6	49,8	49,7	1940,004	672	0,35	100						
	9	49,9	49,95	49,925	1957,609	694	0,35	100						
	10	49,9	49,95	49,925	1957,609	698	0,36	100						
	11	49,65	49,95	49,8	1947,819	718	0,37	100						
	12	49,7	50,1	49,9	1955,649	546	0,28	100						

Fonte: Autor (2018).

Tabela B14 – Dados brutos dos resultados de resistência de aderência à tração em alvenaria

	Corpo de Prova (mm)				Carga de ruptura (N)	Tensão de ruptura (Mpa)	Foma de ruptura (%)							
	#	d1	d2	dm			Área	Sub.	Sub/Chap	Chap.	Chap/Arg	Arg.	Ag/Cola	Cola/Past.
R	1			50	1963,495	335	0,17			100				
	2			50	1963,495	398	0,20			100				
	3			50	1963,495	1406	0,72			50	50			
	4			50	1963,495	249	0,13				100			
	5			50	1963,495	285	0,15			50	50			
	6			50	1963,495	800	0,41			50	50			
	7			50	1963,495	761	0,39		20	30	50			
	8			50	1963,495	644	0,33			50	50			
	9			50	1963,495	918	0,47		30	10	60			
	10			50	1963,495	593	0,30	10		50	40			
	11			50	1963,495	859	0,44		80		20			
	12			50	1963,495	859	0,44			60	40			
33%	1			50	1963,495	917	0,47			50	50			
	2			50	1963,495	612	0,31			50	50			
	3			50	1963,495	1128	0,57				100			
	4			50	1963,495	1443	0,73	30	40		30			
	5			50	1963,495	691	0,35			50	50			
	6			50	1963,495	1149	0,59		100					
	7			50	1963,495	1211	0,62	5	95					
	8			50	1963,495	640	0,33			50	50			
	9			50	1963,495	245	0,12			100				
	10			50	1963,495	742	0,38		90		10			
	11			50	1963,495	433	0,22	10	90					
	12			50	1963,495	297	0,15			60	40			
67%	1			50	1963,495	1196	0,61	15	85					
	2			50	1963,495	1529	0,78	80	20					
	3			50	1963,495	1109	0,56		20	40	40			
	4			50	1963,495	1301	0,66		20	40	40			
	5			50	1963,495	846	0,43			50	50			
	6			50	1963,495	630	0,32			50	50			
	7			50	1963,495	497	0,25			60	40			
	8			50	1963,495	1130	0,58		100					
	9			50	1963,495	674	0,34			50	50			
	10			50	1963,495	540	0,28			50	50			
	11			50	1963,495	701	0,36			60	40			
	12			50	1963,495	325	0,17			60	40			
100%	1			50	1963,495	920	0,47			50	50			
	2			50	1963,495	1123	0,57			100				
	3			50	1963,495	623	0,32		50	50				
	4			50	1963,495	352	0,18			50	50			
	5			50	1963,495	1179	0,60				100			
	6			50	1963,495	709	0,36			100				
	7			50	1963,495	421	0,21			90	10			
	8			50	1963,495	742	0,38			80	20			
	9			50	1963,495	419	0,21		85	15				
	10			50	1963,495	495	0,25			100				
	11			50	1963,495	692	0,35			70	30			
	12			50	1963,495	590	0,30			90	10			

Fonte: Autor (2018).

Tabela B15 – Dados brutos dos resultados de resistência de aderência à tração em estrutura de concreto

	Corpo de Prova (mm)				Carga de ruptura (N)	Tensão de ruptura (Mpa)	Forma de ruptura (%)							
	#	d1	d2	dm			Área	Sub.	Sub/Chap	Chap.	Chap/Arg	Arg.	Ag/Cola	Cola/Past.
R	1			50	1963,495	1288	0,66	70	20		10			
	2			50	1963,495	480	0,24			10	90			
	3			50	1963,495	1774	0,90	10	40		50			
	4			50	1963,495	1680	0,86	30	20		50			
	5			50	1963,495	915	0,47	10	80		10			
	6			50	1963,495	837	0,43	10	80		10			
	7			50	1963,495	445	0,23			10	90			
	8			50	1963,495	1418	0,72		30		70			
	9			50	1963,495	1333	0,68		80		20			
	10			50	1963,495	641	0,33		50		50			
	11			50	1963,495	948	0,48			30	70			
	12			50	1963,495	980	0,50			5	95			
33%	1			50	1963,495	77	0,04		100					
	2			50	1963,495	243	0,12		80		20			
	3			50	1963,495	240	0,12		100					
	4			50	1963,495	829	0,42		100					
	5			50	1963,495	653	0,33		100					
	6			50	1963,495	1155	0,59		50		50			
	7			50	1963,495	1011	0,51		90		10			
	8			50	1963,495	241	0,12	15	70		15			
	9			50	1963,495	1232	0,63		95		5			
	10			50	1963,495	1282	0,65		95		5			
	11			50	1963,495	888	0,45		95		5			
	12			50	1963,495	1517	0,77		90		10			
67%	1			50	1963,495	1165	0,59	80	20					
	2			50	1963,495	1164	0,59	70	30					
	3			50	1963,495	590	0,30	95	5					
	4			50	1963,495	1480	0,75	10	45		45			
	5			50	1963,495	454	0,23	85	15					
	6			50	1963,495	893	0,45	70	30					
	7			50	1963,495	1743	0,89	40	20		40			
	8			50	1963,495	1006	0,51	20	80					
	9			50	1963,495	1178	0,60	15	85					
	10			50	1963,495	1432	0,73	15	85					
	11			50	1963,495	597	0,30	50	50					
	12			50	1963,495	872	0,44	40	60					
100%	1			50	1963,495	1342	0,68		60		40			
	2			50	1963,495	840	0,43		30		70			
	3			50	1963,495	1205	0,61		30		70			
	4			50	1963,495	207	0,11		5		95			
	5			50	1963,495	424	0,22		90		10			
	6			50	1963,495	659	0,34		50		50			
	7			50	1963,495	396	0,20		50		50			
	8			50	1963,495	1298	0,66				100			
	9			50	1963,495	1159	0,59		60		40			
	10			50	1963,495	1289	0,66		20		80			
	11			50	1963,495	1036	0,53		20		80			
	12			50	1963,495	126	0,06		5		95			

Fonte: Autor (2018).

Tabela B16 – Dados brutos de absorção de água por capilaridade e coeficiente de capilaridade

	R			33%			67%			100%		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
altura (mm)	40,15	39,9	39,8	39,9	40,1	40,1	40,25	40,2	40	40	40,1	40,3
largura (mm)	40,2	39,9	40,1	40	39,5	39,5	40,65	40,75	40,7	40,1	40	40
comprimento (mm)	160,1	160,1	160,05	161	161,2	160,55	160,2	160,55	160,09	159,9	160,15	160,2
massa (g)	480,95	483,26	486,62	493,62	478,47	496,84	504,74	505,7	501	483,98	492,05	492,7
volume (cm ³)	258,406203	254,880801	255,4366	256,956	255,3327	254,3032	262,1132325	263,005	260,6265	256,4796	256,8806	258,2424
densidade amostra (g/cm ³)	1,86	1,90	1,91	1,92	1,87	1,95	1,93	1,92	1,92	1,89	1,92	1,91
densidade média (g/cm ³)	1,89			1,92			1,92			1,90		
velocidade (m/s)	2812	2787	2837	3042	3002	3025	3200	3071	3137	3213	3143	2968
Ed amostral (GPa)	13,2	13,3	13,8	16,0	15,2	16,1	17,7	16,3	17,0	17,5	17,0	15,1
Ed médio (GPa)	13,4			15,8			17,0			16,6		
m0 (g)	492,02	493,42	494,83	481,36	482,72	481,23	479,42	486,75	481,42	478,72	486,6	492,4
m10 (g)	493,85	494,95	496,16	484,73	486,37	485,41	484,04	490,26	485,87	484,83	491,85	496,93
m90 (g)	497,87	498,45	499,14	490,77	492,37	492,24	491,09	495,78	493,09	494,95	498,51	503,15
A10 (g/cm ²)	0,11	0,10	0,08	0,21	0,23	0,26	0,29	0,22	0,28	0,38	0,33	0,28
	0,10			0,23			0,26			0,33		
DR(%)	17%	2%	15%	10%	2%	12%	10%	16%	6%	15%	1%	14%
nova média												
novo DR												
A90 (g/cm ²)	0,37	0,31	0,27	0,59	0,60	0,69	0,73	0,56	0,73	1,01	0,74	0,67
	0,32			0,63			0,67			0,81		
DR(%)	16%	1%	15%	6%	4%	10%	8%	16%	8%	25%	8%	17%
nova média										0,71		
novo DR										5% 5%		
Coef de cap © - g/dm ² .min ^{1/2}	4,0	3,5	3,0	6,0	6,0	6,8	7,0	5,5	7,2	10,1	6,7	6,2
	3,5			6,3			6,6			7,7		
DR(%)	15%	0%	15%	4%	5%	9%	7%	16%	9%	32%	13%	19%
nova média										6,44		
novo DR										3% 3%		

Fonte: Autor (2018).

Tabela B17 – Dados brutos dos resultados de variação dimensional e mássica.

	Variação dimensional				Variação mássica			
	R	33%	67%	100%	R	33%	67%	100%
1	-0,06405	-0,07057	-0,07626	-0,07549	-0,15963	-0,05493	-0,09144	-0,07539
2	-0,0399	-0,05656	-0,07624	-0,08474	-0,33281	-0,08069	-0,1018	-0,11365
3	-0,083	-0,06902	-0,08753	-0,09554	-0,11238	-0,09377	-0,07319	-0,12509

Fonte: Autor (2018).

ANEXO A – TERMOS USADOS NA LITERATURA PARA REPRESENTAR A SDA

- a) *Spray/spray-dry/dryer/drier absorber/atomization/absorption (SDA, SAV) sludge, ash, material, product, byproduct, by-product, end-product, waste, or residue;*
- b) *Semidry absorber/atomization/absorption (SDA) sludge, ash, material, product, byproduct, byproduct, end-product, waste, or residue;*
- c) *Spray absorption process (SAP) sludge, ash, material, product, byproduct, by-product, end-product, waste, or residue;*
- d) *Spray dryer (SPD) residue;*
- e) *Spray dryer by-product (SDB);*
- f) *Calcium spray dryer/drier ash, material, product, byproduct, by-product, end-product, waste, or residue;*
- g) *Lime spray dry/dryer/drier (LSD) ash, material, product, byproduct, by-product, end-product, waste, or residue;*
- h) *Advanced SO₂ control (ASC) ash, material, product, byproduct, by-product, end-product, waste, or residue;*
- i) *Sulfite-rich flue gas desulfurization sludge, ash, material, product, byproduct, by-product, endproduct, waste, or residue;*
- j) *Sulfite sludge;*
- k) *Scrubber residue or sludge;*
- l) *Dry flue gas desulfurization sludge, ash, material, product, byproduct, by-product, end-product, waste, or residue;*
- m) *Dry scrubber sludge, ash, material, product, byproduct, by-product, end-product, waste, or residue;*
- n) *Nonoxidized flue gas desulfurization sludge, ash, material, product, byproduct, by-product, endproduct waste, or residue;*
- o) *Flue gas desulfurization sludge, ash material, product, byproduct, by-product, end-product, waste, or residue (with no reference to the FGD process);*
- p) *Spent slurry.*