

UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOTECNIA,
ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL

**AVALIAÇÃO TÉCNICA DOS RESÍDUOS
GERADOS EM ETA COMO SUBSTITUTO
PARCIAL DE AGREGADOS EM
COMPONENTES CIMENTÍCIOS - PAVERS**

FLÁVIO DE CARVALHO ARAÚJO

D0162C17
GOIÂNIA
2017

**TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR
VERSÕES ELETRÔNICAS DE TESES E DISSERTAÇÕES
NA BIBLIOTECA DIGITAL DA UFG**

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD/UFG), regulamentada pela Resolução CEPEC nº 832/2007, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a Lei nº 9610/98, o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou *download*, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

1. Identificação do material bibliográfico: Dissertação Tese

2. Identificação da Tese ou Dissertação:

Nome completo do autor: Flávio de Carvalho Araújo

Título do trabalho: AVALIAÇÃO TÉCNICA DOS RESÍDUOS GERADOS EM ETA COMO SUBSTITUTO PARCIAL DE AGREGADOS EM COMPONENTES CIMENTÍCIOS - PAVERS

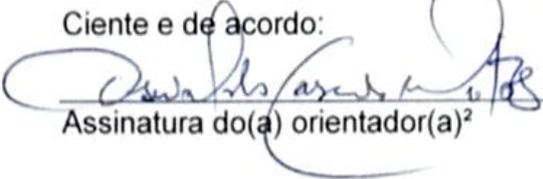
3. Informações de acesso ao documento:

Concorda com a liberação total do documento SIM NÃO¹

Havendo concordância com a disponibilização eletrônica, torna-se imprescindível o envio do(s) arquivo(s) em formato digital PDF da tese ou dissertação.


Assinatura do(a) autor(a)²

Ciente e de acordo:


Assinatura do(a) orientador(a)²

Data: 25 / 09 / 2017

¹ Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. A extensão deste prazo suscita justificativa junto à coordenação do curso. Os dados do documento não serão disponibilizados durante o período de embargo.

Casos de embargo:

- Solicitação de registro de patente;
- Submissão de artigo em revista científica;
- Publicação como capítulo de livro;
- Publicação da dissertação/tese em livro.

² A assinatura deve ser escaneada.

FLÁVIO DE CARVALHO ARAÚJO

**AVALIAÇÃO TÉCNICA DOS RESÍDUOS
GERADOS EM ETA COMO SUBSTITUTO
PARCIAL DE AGREGADOS EM
COMPONENTES CIMENTÍCIOS - PAVERS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil da Universidade Federal de Goiás para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de Concentração: Construção Civil

Orientador: Professor Doutor Oswaldo Cascudo

Co-orientador: Professor Doutor Paulo Sérgio Scalize

D0162C17
GOIÂNIA
2017

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFG.

Araújo, Flávio de Carvalho
AVALIAÇÃO TÉCNICA DOS RESÍDUOS GERADOS EM ETA COMO
SUBSTITUTO PARCIAL DE AGREGADOS EM COMPONENTES
CIMENTÍCIOS - PAVERS [manuscrito] / Flávio de Carvalho Araújo.
2017.
LXXXIX, 89 f.

Orientador: Prof. Dr. Oswaldo Cascudo; co-orientador Paulo Sérgio Scalize.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Civil e Ambiental (EECA), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - Geotecnia, Estruturas e Construção Civil, Goiânia, 2017.

Bibliografia. Apêndice.

Inclui siglas, abreviaturas, lista de figuras, lista de tabelas.

1. concreto. 2. cimento. 3. ETA. 4. resíduo. 5. RETA. I. Cascudo, Oswaldo, orient. II. Título.

CDU 624



PPG
GECON

Programa de Pós-Graduação em
Geotecnia, Estruturas e Construção Civil



Ata de Nº 0162 da sessão de julgamento da
Dissertação do aluno Flávio de Carvalho Araújo
da área de concentração Construção Civil do
PPG em Geotecnia, Estruturas e Construção
Civil.

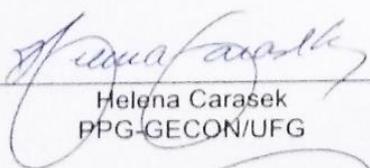
Aos 25 dias do mês de agosto de 2017, às 09h30, na Sala Caryocar, Bloco A, 2º andar da Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e Computação da UFG reuniu-se a banca examinadora designada na forma regimental pela Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil para julgar a Dissertação intitulada “**Avaliação Técnica dos Resíduos Gerados em ETA como Substituto Parcial de Agregados em Componentes Cimentícios - Pavers**”, apresentado pelo aluno **Flávio de Carvalho Araújo**, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de MESTRE, área de concentração Construção Civil. A Banca Examinadora foi Presidida pelo Prof. Dr. Oswaldo Cascudo (GECON/UFG), tendo como membros a Prof.^a Dr.^a Helena Carasek (GECON/UFG) e o Prof. Dr. Antônio João Carvalho de Albuquerque (DECA/UBI/COVILHÃ/Portugal). Aberta a sessão pública, o candidato teve a oportunidade de expor o trabalho. Após a exposição, o aluno foi arguido oralmente pelos membros da Banca, os quais concluíram pelos seguintes resultados:

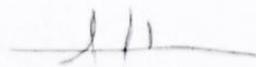
Membro	Instituição	Função	Resultado
Oswaldo Cascudo	GECON/UFG	Presidente	<u>APROVADO</u>
Helena Carasek	GECON/UFG	Examinadora Interna	<u>Aprovado</u>
Antônio João C de Albuquerque	(DECA/UBI/COVILHÃ- Portugal)	Examinador Externo	<u>Aprovado</u>

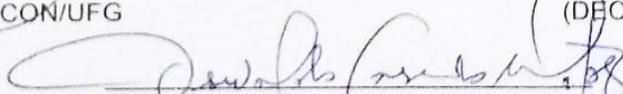
Tendo demonstrado suficiência de conhecimento e capacidade de sistematização no tema de sua Dissertação, a Banca Examinadora concluiu pela **aprovação** do candidato **sem restrições**.

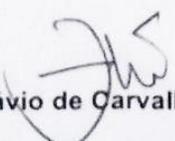
() Não tendo demonstrado suficiência de conhecimento e capacidade de sistematização no tema de sua Dissertação, a Banca Examinadora concluiu pela **reprovação** do candidato, conforme as seguintes justificativas:

Nos termos do Regulamento Geral dos Cursos de pós-graduação desta Universidade, foi lavrada a presente ata que, lida e julgada conforme, segue assinada pelos membros da **Banca Examinadora** e pelo **candidato**.


Helena Carasek
PPG-GECON/UFG


Antônio João Carvalho de Albuquerque
(DECA-UBI/Portugal)


Oswaldo Cascudo
PPG-GECON/UFG


Candidato: Flávio de Carvalho Araújo

Aos meus pais, Emanuel e Orlinda, pela dedicação e luta, à minha esposa Marina, pelo apoio e companheirismo, e às minhas filhas, pela motivação.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Emanuel e Orlinda, pela vida e luta irrestrita por minha formação.

À minha esposa Marina por sempre apoiar na dedicação contínua aos estudos e compreensão pelo tempo empregado à pesquisa.

Às minhas pequenas Maria Eduarda e Ana Laura fontes de inspiração constante e pela honra de ser pai.

Aos professores, Paulo Scalize, Oswaldo Cascudo pelo profissionalismo, dedicação e orientações. À professora Helena Carasek e Antônio Albuquerque por aceitarem o convite de participação da banca de defesa.

À todos os familiares que apoiaram e compreenderam minhas ausências nas reuniões familiares.

Aos amigos da SANEAGO: Sebastião Andrade, Godard Vieira, Romis Alberto, Mara Cristina, Lívia Dias, Júlio César, Gilmar Bernardes, Mauro Henrique, Débora de Paula, Paulo Rogério e a todos que apoiaram e contribuíram à pesquisa.

À SANEAGO pelo apoio à pesquisa.

À Enga. Helen e equipe da Goiarte Soluções pelo apoio e produção das peças de piso de concreto utilizados no desenvolvimento da pesquisa.

Aos colegas e coordenação da Escola de Arquitetura da PUC/GO.

Aos técnicos laboratoristas Vítor e Agnaldo.

“A gente tem é que sonhar,
Senão as coisas não acontecem”

Oscar Niemeyer

RESUMO

A presente pesquisa propõe uma avaliação técnica para utilização dos resíduos gerados na Estação de Tratamento de Água Eng^o. Rodolfo José Costa e Silva, que utiliza o sulfato de alumínio no tratamento e está localizada em Goiânia-Goiás, como substituto parcial dos agregados miúdos em componente cimentício - Paver. A pesquisa analisou a incorporação de resíduos, sob o ponto de vista da ciência dos materiais, por meio da caracterização física, química e mineralógica, bem como, com uma investigação referente à possibilidade de atividade pozolânica do material. Dessa maneira, os parâmetros encontrados nos ensaios, foram comparados às bases da literatura específica e normas vigentes, levantadas na revisão bibliográfica, e posteriormente o estudo avaliou a similaridade das características do resíduo com as matérias primas tradicionais utilizadas para produção de materiais cimentícios, como: areia, argila e pedra calcária, dentre outras; nesse sentido, foi elaborado um experimento com aplicação de resíduos de ETA em componente utilizado na construção civil: o piso de concreto Paver. Os resultados dos ensaios mecânicos foram analisados estatisticamente para perceber-se o grau de influência do teor de resíduo, idade e interação entre essas variáveis nos resultados. Constatou-se que a proporção de 5% de resíduo melhora significativamente a resistência mecânica dos Paviers (33,5%) aos 28 dias, em relação a amostra de controle, porém a absorção de água aumentou (68,8%). Assim, encontrou-se uma alternativa sustentável de inserção do resíduo na cadeia produtiva da construção, produzindo um elemento cimentício, e ao mesmo tempo contribuindo para reduzir o impacto ambiental causado pelo lançamento dos resíduos nos mananciais. Objetivando a redução do passivo ambiental da indústria da água, bem como a diminuição da extração de matéria prima para produção dos elementos cimentícios.

Palavras-chave: concreto; cimento; ETA; resíduo; RETA; sustentabilidade.

ABSTRACT

The present research proposes a technical evaluation for the use of the waste generated in the Water Treatment Plant, Eng. Rodolfo José Costa e Silva, located in the city of Goiânia, State of Goiás, Brazil, as a partial substitute for the fine aggregates of cementitious elements. The study conducted the analysis of the residues, from the material science point of view, through the physical and mineralogical characterization, as well as the investigation concerning the possibility of pozzolanic activity of the material. Therefore, the parameters found were compared based on specific literature and current normalizations, and the study evaluated the similarity between the residue characteristics and the traditional raw materials used in the production of cementitious materials, such as sand, clay, and limestone; in this context, an experiment was carried out with the application of WTP residues in a component used in construction: concrete floor (Paver). The results of the mechanical tests were statistically analyzed to see the influence of the residue, age and interaction between these variables in the results. It was found that the proportion of 5% of residue significantly improved the mechanical resistance of Pavers (33.5%) at 28 days in the control sample, but water absorption increased (68.8%). In this way, a sustainable alternative of insertion of the waste in the productive chain of the construction was sought, producing a cement element, and at the same time contributing to reduce the environmental impact caused by the release of the residues in the springs. Aiming at reducing the environmental liabilities of the water industry, as well as reducing the extraction of raw material for cement production.

Keywords: concrete; cement; WTP; residue; waste; sustainability.

LISTA DE FIGURAS

Capítulo 1

Figura 1.1 — Exemplos de diferentes desenhos de cidades: (a) Traçado desordenado da antiga Deli, na Índia, com desenvolvimento espontâneo; (b) Traçado moderno com configuração planejada	17
Figura 1.2 – Imagens de lançamentos de resíduos de ETAs sem tratamento em cursos de água	18
Figura 1.3 – Fluxograma de funcionamento de uma ETA de ciclo completo no Estado de Goiás até 2015	22
Figura 1.4 – (a) Imagem de decantador em manutenção; (b) Imagem de filtro em operação..	23
Figura 1.5 – Lagoa de secagem da ETA Eng.º Rodolfo José Costa e Silva em Goiânia.....	24
Figura 1.6 – (a) Imagem de prensa desaguadora do RETA; (b) RETA após desidratação	24
Figura 1.7 – (a) Bags desaguadores em ETA; (b) BAG saturado com RETA; (c) Bag rompido após saturação	25
Figura 1.8 – Micrografias da superfície de fratura de CP de concreto com 3% de lodo, obtidas por microscopia eletrônica de varredura	30
Figura 1.9 - Micrografias da superfície de fratura de CP de concreto com 4% de lodo, por microscopia eletrônica de varredura, mostrando a presença de etringita	31
Figura 1.10 - Difratometria de raio X do RETA tratado por 30 min à 400°C, 500°C, 600°C e 700°C. Q= Quartzo; C=Calcita; M= Mica; F=Feldspato; Cl=Clorito; N=Nefelina; Ca=Óxido de Cálcio	33
Figura 1.11 – Imagens de microscopia ótica das amostra de controle e com RETA dos clínqueres	34

Capítulo 2

Fig. 1. Localização da ETA Engenheiro Rodolfo J. Costa e Silva e das lagoas de secagem de RETA.....	43
---	----

Fig. 2. (a) Lagoa de secagem de RETA (cheia), antes da retirada para disposição em aterro; (b) Detalhe do resíduo; (c) Retirada do resíduo; (d) RETA coletado para análise	44
Fig. 3. Sequência da produção dos pavers: (a) carregamento das fôrmas; (b) prensagem dos pavers; (c) lote de pavers pós prensagem	47
Fig. 4. Ensaio de resistência à compressão: (a) Máquina utilizada; (b) Piso rompido durante o ensaio	50
Fig. 5. Determinação da absorção: (a) Pavers submersos por 24 horas; (b) Pavers em estufa até constância de massa.....	50
Fig. 6. Curvas de distribuição granulométrica do RETA estudado	53
Fig. 7. Difratometria de raios X do RETA	55
Fig. 8. Imagens do resíduo pelo MEV: (a) ampliação de 300 vezes e (b) 1500 veze	56
Fig. 9. (a) Micrografia do RETA estudado obtido com MEV; (b) Espectro de composição elementar do RETA obtido com EDS	57
Fig. 10. Resistência à compressão dos Pavers aos 7, 14, 28, 56 e 920 dias de fabricação em função da quantidade de RETA adicionada em substituição à areia.....	59
Fig. 11. Valores globais de resistência em função da idade	61
Fig. 12. Valores globais de resistência em função dos teores de RETA (As linhas pontilhadas demarcam os grupos que são distintos estatisticamente)	62
Fig. 13. Absorção de água média dos pavers em função do teor de RETA	63
Fig. 14. Valores globais de absorção em função da idade.....	64
Fig. 15. Valores globais de absorção em função dos teores de RETA.....	65
Fig. 16. Correlação entre absorção de água e resistência à compressão aos 28 dias do parver	66
Fig. 17. Correlação entre a resistência à compressão e a absorção de água em todas as idades	67
Fig. 18. Imagem em detalhe de uma peça da composição com 5% de RETA durante os ciclos de molhagem e secagem: a) Início do 1° ciclo; b) Início do 6° ciclo; c) Final do 12° ciclo	68
Fig. 19. Gráfico comparativo entre resistência com cura natural aos 920 dias e resistência após os ciclos de molhagem e secagem aos 945 dias	69

Fig. 20. Gráfico comparativo entre absorção de água com cura natural aos 920 dias e após os 12 ciclos de molhagem e secagem aos 945 dias 69

Fig. 21. Gráfico comparativo entre resistência à compressão das amostras com 0 e 5% de resíduo, com cura natural aos 920 e 1310 dias e após os 12 ciclos de molhagem e secagem, aos 945 e 1322 dias de idade dos pisos..... 71

Fig. 22. Gráfico comparativo entre absorção de água com cura natural aos 920 e 1310 dias e após os 12 ciclos de molhagem e secagem, aos 945 e 1322 dias de idade dos pisos 72

LISTA DE TABELAS

Capítulo 1

Tabela 1.1 – Estudos desenvolvidos com aplicação de RETA	26
Tabela 1.2 – Parâmetros de dosagem para o concreto de referência.....	28
Tabela 1.3 – Características e propriedades dos concretos frescos	29
Tabela 1.4 – Resultados de resistência à compressão	29
Tabela 1.5 - Resultados dos ensaios físicos nos concretos endurecidos	31
Tabela 1.6 - Análise quantitativa das fases nos clínquer obtidos a 1450°C.....	34

Capítulo 2

Tab. 1 – Resumo dos ensaios realizados, finalidade e referências normativas	45
Tab. 2 - Consumo de insumos por lote de pavers produzidos (porcentagens em massa)	47
Tab. 3 - Distribuição da granulometria dos agregados utilizados na fabricação dos pavers	48
Tab. 4 – Caracterização física, mecânica e química do cimento CP II Z-32 utilizado.....	49
Tab. 5 - Distribuição granulométrica do material constituinte do RETA	52
Tab. 6 – Índices de consistência, plasticidade e atividade do RETA	54
Tab. 7 – Composição química do resíduo em óxidos (%).....	56
Tab. 8 - Resultado da análise da espectrometria de absorção atômica.....	58
Tab. 9 – Resultado da ANOVA realizada para medidas de resistência	60
Tab. 10 – Teste de Duncan para resistência analisando-se o efeito da idade	61
Tab. 11 – Teste de Duncan para resistência analisando-se o efeito do teor de RETA	62
Tab. 12 – Resultado da ANOVA realizada para médias de absorção de água.....	64
Tab. 13 – Teste de Duncan para absorção analisando-se o efeito da idade.....	64
Tab. 14 – Teste de Duncan para absorção analisando-se o efeito dos teores do RETA.....	65

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

CNAE – Classificação Nacional de Atividades Econômicas

CP – Corpo de Prova

DRX – Difractometria de raio X

EAA – Espectrometria de Absorção Atômica

EDX – Espectroscopia de raio X

EEC – Escola de Engenharia Civil

ETA – Estação de Tratamento de Água

FRX – Fluorescência de raio X

FTIR - Fourier Transform Infrared

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

ICDD - International Centre for Diffraction Data

MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura

MO – Microscopia Ótica

NBR – Norma Brasileira

PNRS – Política Nacional de Resíduos Sólidos

PNSB – Plano Nacional de Saneamento Básico

RETA – Resíduos de Estação de Tratamento de Água

UTR – Unidade de Tratamento de Resíduo

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	16
1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO	16
1.2. JUSTIFICATIVA	21
1.3. GERAÇÃO DO RESÍDUO	23
1.4. ESTUDOS DE CASO DE USO E APLICAÇÃO DO RETA LEVANTADOS PELA LITERATURA	26
1.5. OBJETIVOS	35
1.6. ESTRUTURA DO TRABALHO	35
CAPÍTULO 2 – ARTIGO CIENTÍFICO	37
CAPÍTULO 3 – CONSIDERAÇÕES FINAIS	76
3.1. CONCLUSÕES	76
3.1.1. Caracterização Física, Química e Mineralógica do resíduo	76
3.1.2. Piso de concreto Intertravado Tipo Paver Produzidos com RETA.....	77
3.2. SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS.....	77
REFERÊNCIAS	79
APÊNDICE	85

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

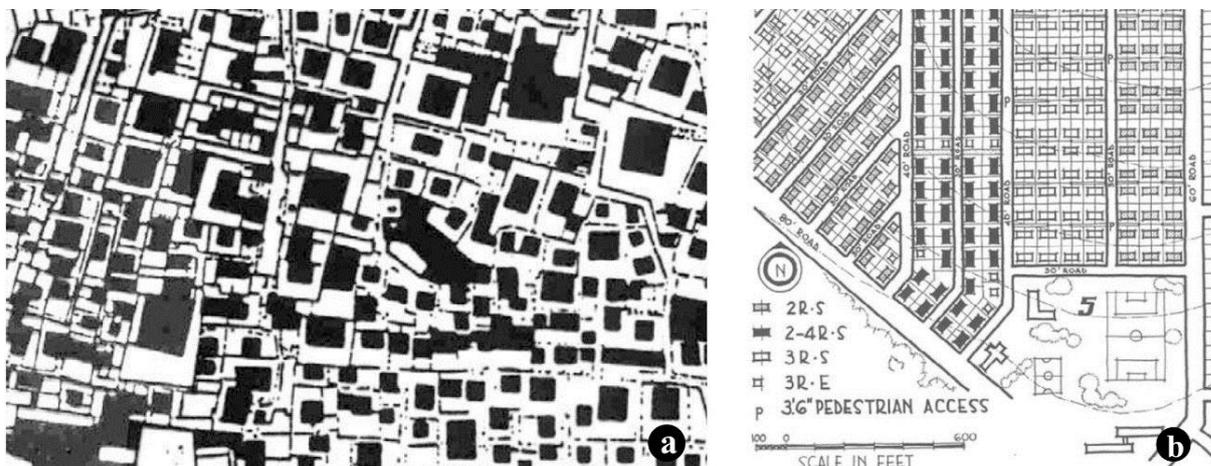
Este trabalho está relacionado diretamente com área de materiais, ao passo que aborda a influência da utilização de resíduo na durabilidade de material cimentício, sob a ótica da ciência dos materiais; relaciona-se também, com a engenharia ambiental no sentido que trata do aproveitamento de subproduto do saneamento.

1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO

A história revela que as cidades antigas tiveram um crescimento espontâneo, cujo desenvolvimento foi direcionado, principalmente, para proteção dos seus limites territoriais, sem controle do desenho urbano (Figura 1.1-a), de acordo com Thomas (2002). Segundo Lamas (2010), foi no período pós-revolução industrial que se observou uma maior preocupação voltada para a saúde dos espaços urbanos, como também para um cenário mais sanitarista, devido aos problemas no passado, com o surgimento e proliferação de epidemias, como a cólera e a peste negra, em razão da inexistência ou precariedade da infraestrutura de tratamento de água e esgoto, o que posteriormente determinou traçados mais ordenados (Figura 1.1-b). Porém, mesmo em pleno século XXI, ainda se percebem casos de cidades que estão em expansão sem a definição e utilização de um plano diretor pela gestão municipal, como é o caso, por exemplo, das megacidades de Deli na Índia, Lagos na Nigéria ou Daca em Bangladesh, que possuem os mais elevados índices de crescimento demográfico. Moor e Cousseran (2006) destacam que a rápida expansão das cidades normalmente acontece sem planejamento urbano e fiscalização das autoridades competentes do governo, estimulada pelo crescimento econômico e acompanhado pela deterioração do meio urbano.

Barros (2011) define a cidade como um organismo vivo, dinâmico, em evolução e que possui diversas funções. As diretrizes do plano diretor estabelecem e orientam o crescimento das cidades e são essenciais para a ordenação do traçado e da infraestrutura urbana, fundamentais para o funcionamento compatível entre os diversos setores, como os industriais, residenciais, zonas de proteção ambientais, dentre outros.

Figura 1.1 — Exemplos de diferentes desenhos de cidades: (a) Traçado desordenado da antiga Deli, na Índia, com desenvolvimento espontâneo; (b) Traçado moderno com configuração planejada (THOMAS, 2002)



Além da observação das diretrizes que norteiam o crescimento das cidades, outro aspecto importante, relacionado às atividades dos setores, é a gestão dos resíduos industriais e domésticos, denominados resíduos sólidos urbanos, conforme disposto na Política Nacional de Resíduos Sólidos – PNRS (BRASIL, 2010).

O setor de saneamento, objeto de interesse do presente trabalho por meio das Estações de Tratamento de Água (ETAs), também gera resíduos. As ETAs produzem a água potável e têm a obrigatoriedade de fornecê-la em conformidade com os padrões de potabilidade definidos pela Portaria 2.914 (BRASIL, 2011), para o abastecimento público. Durante esse processo de potabilização da água bruta, ocorre a remoção de impurezas por meio de processos químicos e físicos, gerando, principalmente nos filtros e decantadores, lodos ou resíduos, chamados de Resíduos de Estações de Tratamento de Água (RETA), também conhecidos como lodos de Estações de Tratamento de Água, que, segundo Hoppen *et al.* (2005), Reis *et al.* (2007) e Di Bernardo, Dantas e Voltan (2011), podem prejudicar os mananciais, pois o seu destino mais comum é o lançamento em corpos hídricos.

A Lei 11.445 (BRASIL, 2007) preconiza a universalização do acesso ao saneamento básico como um princípio fundamental e propõe diretrizes para o alcance de todos os cidadãos brasileiros. Isto posto, ocorre uma vocação de acréscimo de demanda por água tratada, o que gera, como consequência, uma maior quantidade de resíduos. Nesse sentido surgiram normas e Leis, tais como a NBR 10004 (ABNT, 2004) e o PNRS (BRASIL, 2010), que impõem dispositivos para classificar os resíduos e nortear o seu descarte de modo a não afetar o meio ambiente.

O volume de RETA gerado em território nacional é vultoso. Segundo a Pesquisa Nacional de Saneamento Básico – PNSB (IBGE, 2008), as ETAs Brasileiras geram em média 27 271 m³/mês do resíduo. Desse montante, a região Centro-Oeste produz 6,6% do total gerado no país. No cenário nacional, a disposição dos RETAs de maneira a não poluir os mananciais é recente. O Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE (2008) estima que apenas 6,38% dos municípios brasileiros possuem alguma forma de tratamento e disposição final do RETA, utilizando, como exemplo, aterros. Portanto, a maior parte dos municípios, cerca de 67,4%, faz o lançamento *in natura* em corpos hídricos (Figura 1.2), o que pode afetar a biota aquática. Segundo Di Bernardo, Dantas e Voltan (2011), isto acontece “devido à sua concentração de metais tóxicos nos bentos e diminuição significativa da luminosidade do meio, reduzindo a produtividade do fitoplâncton”, o que pode afetar diretamente a alimentação dos peixes. Reis *et al.* (2007) afirmam que o descarte em mananciais pode provocar também o assoreamento.

Figura 1.2 – Imagens de lançamentos de resíduos de ETAs sem tratamento em cursos de água (DI BERNARDO; DANTAS; VOLTAN, 2011)



Haja vista o passivo ambiental do Setor de Saneamento, Hoppen *et al.* (2006) ressaltam a importância da procura por caminhos e soluções para disposição do RETA que sejam viáveis do ponto de vista técnico e econômico, sugerindo, como possibilidade, sua utilização como matéria prima na Indústria da Construção Civil.

Um importante motivo para o reaproveitamento de resíduos, destacado por Safiuddin *et al.*¹ (2010 *apud* GONÇALVES, 2013), é a crescente escassez das matérias-primas, bem como o alto preço da energia, contribuindo para o crescente aumento do valor dos materiais produzidos. A questão da retirada indiscriminada das matérias-primas do meio natural para uso na construção civil, como exemplo, a extração de areias das jazidas, contribuem para ampliar o passivo ambiental do setor. Assim, percebe-se uma tendência, no contexto mundial, que reforça o intento da utilização de materiais alternativos na construção civil.

De acordo com a Classificação Nacional de Atividades Econômicas - CNAE (IBGE, 2003), a construção é classificada como as atividades de preparação do terreno, obras de engenharia civil, instalações de materiais e equipamentos necessários ao funcionamento do imóvel e obras de acabamento, abrangendo tanto construções novas, como grandes reformas, restaurações de imóveis e manutenção corrente.

O *Methodological Centre for Vocational Education and Training* (2008) afirma que o setor da construção é considerado um dos mais importantes pela União Europeia, gerando cerca de 10% do PIB e contribuindo para a geração de empregos e outras atividades da economia; é caracterizado por trabalhos cíclicos e por ser bastante sensível ao valor da matéria prima.

Para exercer as atividades de construção é necessário o uso de diversos materiais, dos quais se podem destacar como principais: rocha, gesso, cal, cimento, areia, madeira e aço. Para a fabricação e industrialização desses materiais, faz-se a extração de recursos naturais, como, por exemplo, a rocha calcária, árvores e minério de ferro. Visando à preservação desses recursos, surge a preocupação com a sustentabilidade.

O Relatório *Brundtland* lançou o termo sustentabilidade, que foi apresentado no *Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common Future* (UN, 1987), e definiu como desenvolvimento sustentável o modo de usufruto dos recursos naturais sem privar as gerações futuras de sua utilização. Esse documento define, ainda, que o objetivo do desenvolvimento econômico e social deve ocorrer em conformidade à sustentabilidade em todo o planeta, promovendo a consciência coletiva.

¹ SAFIUDDIN, M.; JUMAAT, M.; SALAM, M. A.; ISLAM, M. S.; HASHIM, R. Utilization of solid wastes in construction materials. *International Journal of the Physical Sciences* Vol. 5(13). Academic Journals, 2010, p. 1952-1963.

A utilização indiscriminada dos recursos naturais gera sequelas ambientais, que são de grande preocupação mundial de acordo com Freeman (2002). Schneider¹ (2003 *apud* GONÇALVES, 2013) afirma que apenas as atividades da indústria da construção civil consomem cerca de 50% dos recursos naturais extraídos do planeta. Tendo em vista que a obtenção de lucro é objetivo das organizações, demandando, assim, que estas sejam competitivas, estas utilizam a redução dos seus custos de produção como uma das estratégias que eficazmente colabora para promover tal competitividade. A incorporação dos resíduos gerados na indústria, convertendo-os em matéria prima para produção de materiais de construção, por exemplo, torna-se um importante caminho para a própria indústria reduzir os custos de produção e contribui também para diminuição de seu passivo ambiental. Dessa maneira, existem alguns resíduos que já são amplamente utilizados na indústria, como a escória de alto forno, empregados na produção do cimento Portland Composto com Escória (CP II-E) e, principalmente, na produção do cimento Portland de Alto Forno (CP III), neste último caso admitindo-se um percentual de 35% a 70% de escória na composição do cimento. Entretanto, para a utilização de forma segura de resíduos, faz-se necessário sua caracterização, com o propósito de compreender suas potencialidades sob a ótica das ciências dos materiais e, posteriormente, direcioná-los para emprego como insumos de materiais de características similares.

No caso do RETA, Hoppen *et al.* (2006) direcionaram a aplicação do resíduo como agregado em matriz de concreto, observando, entre outros aspectos, a composição granulométrica do material.

Os agregados são definidos como material granular usado juntamente com cimento para produção de concreto e argamassa, de acordo com Mehta e Monteiro (2006). Os materiais comumente utilizados como agregados são o cascalho originado da fragmentação da rocha pelo intemperismo, a rocha britada advinda da britagem industrial de rochas, pedregulhos ou grandes pedras; a areia, que é normalmente retirada de rios, considerada agregado miúdo resultante do intemperismo natural ou oriunda da britagem de rocha; a escória de alto forno, subproduto da indústria de aço obtido pela britagem da escória solidificada durante o processo de resfriamento lento sob condições atmosféricas; e resíduos da construção e demolição, referentes ao produto obtido pela reciclagem do concreto e argamassa, blocos ou escombros de rochas.

¹ SCHNEIDER, D. M. Deposições Irregulares de Resíduos da Construção Civil na Cidade de São Paulo. São Paulo, 2003. Dissertação de mestrado. Faculdade de Saúde Pública da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

Assim, o presente estudo propõe investigação dos resíduos gerados na ETA Eng.º Rodolfo José Costa e Silva, em Goiânia, analisando a sua natureza sob a ótica da ciência dos materiais e avaliando a sua aplicação em materiais cimentícios. O trabalho tem o intuito de contribuir, também, para a destinação sustentável do volume dos resíduos gerados.

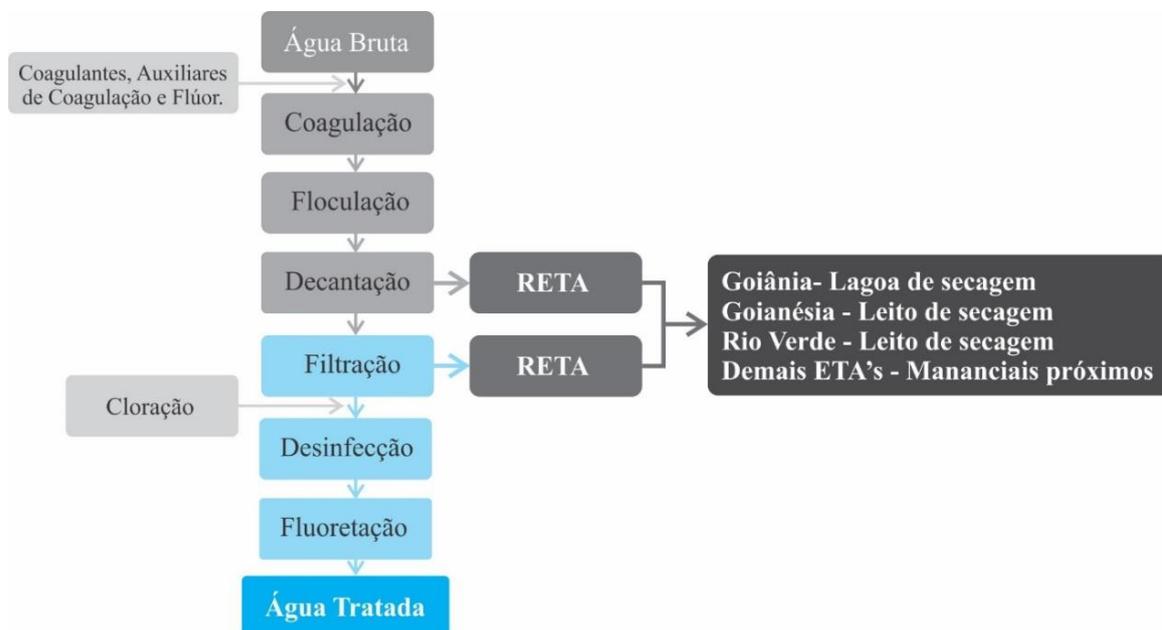
1.2. JUSTIFICATIVA

A geração do RETA durante o tratamento da água representa um passivo importante, pois se trata de uma realidade global que afeta as localidades que utilizam ETAs para produção de água tratada. No Brasil, cerca de 75% das 7500 ETAs utilizam o processo denominado convencional ou de ciclo completo para tratamento da água, consistindo principalmente nas etapas de coagulação, floculação e decantação, operações nas quais ocorre a produção de resíduos (BOTERO *et al.*, 2009).

Em Goiás, segundo a empresa Saneamento de Goiás (SANEAGO, 2015), existem 198 ETAs, onde 54% operam utilizando o ciclo completo de tratamento da água bruta (Figura 1.3), sendo o sulfato de alumínio e o cloreto férrico os coagulantes mais utilizados, definidos após ensaios de tratabilidade da água. Atualmente três ETAs da companhia operam com um sistema de tratamento do RETA, correspondente a 1,51% do total. Porém, observa-se a implantação de diretrizes prioritárias para promover o tratamento adequado desses resíduos das ETAs, por meio de unidades de tratamento de resíduo (UTR).

Sobre o Rio Meia-Ponte, que é o principal manancial explorado para produção de água em Goiás, Veiga *et al.* (2013) salientam que ele pertence à bacia hidrográfica do Meia-Ponte, que localiza-se no centro-sul do Estado de Goiás, ocupando uma área territorial de 3,6% do Estado, onde estão inseridos 38 municípios e onde se concentram 48% da população goiana. O rio Meia-Ponte é o manancial de onde a água bruta é captada e aduzida até a ETA Eng. Rodolfo José Costa e Silva (ETA Meia-Ponte), a qual realiza o tratamento e abastece cerca de 50% da região metropolitana.

Figura 1.3 – Fluxograma de funcionamento de uma ETA de ciclo completo no Estado de Goiás até 2015 (SANEAGO, 2017)



A Saneago (2015) estima a produção anual de RETA em cerca de 4000 m³ somente na ETA Eng. Rodolfo Costa e Silva. Moreira *et al.* (2009) estimam que, no Brasil, sejam despejadas 2000 m³/dia de RETA diretamente nos cursos d'água sem qualquer tratamento, propiciando a ocorrência de odores, o crescimento excessivo de algas e a mortandade de peixes devido à sua toxicidade crônica para os organismos aquáticos, como também a degradação da qualidade da água e dos sedimentos. Dessa maneira, percebe-se o desafio de se encontrar uma destinação sustentável, do ponto de vista ambiental, aos resíduos.

A tendência global é de que sejam ampliadas as infraestruturas de tratamento de água, tendo em vista sua crescente demanda. Como consequência, haverá o aumento da geração de RETA, apesar da busca por diminuição da geração dos resíduos por meio de novas tecnologias, da supervisão e aplicação de novas diretrizes e leis relacionadas aos resíduos sólidos urbanos, do controle do uso e ocupação do solo, ou ainda, pela utilização de mananciais menos afetados pelas atividades humanas. Logo, justifica-se a necessidade de avaliação de práticas alternativas para tratar e dispor os resíduo produzidos, com a menor geração de impacto possível.

A alternativa proposta neste trabalho tem relevância, pois envolve a ETA Meia-Ponte, que é a maior geradora de RETA do Estado de Goiás. A pesquisa também contribui em um contexto socioambiental, ao passo que auxilia na busca por possibilidades para disposição do resíduo, com sua aplicação na produção de materiais de construção e há, ainda, a contribuição em termos da redução da extração de matéria prima natural, substituindo-a pelo subproduto gerado na ETA

– o resíduo. Dessa maneira, o RETA deixaria de receber tratamento similar ao lixo comum, que prejudica o ambiente, pois diminui a vida útil dos aterros, como também de poluir os mananciais ao serem lançados diretamente neles.

Assim, aplicar o RETA em materiais de construção é valorizar o resíduo, equiparando-o à matéria prima compatível, o que configura uma destinação ambientalmente equilibrada.

1.3. GERAÇÃO DO RESÍDUO

As ETAs que promovem o lançamento dos resíduos diretamente nos mananciais não possuem uma etapa específica de tratamento dos resíduos após sua geração nos decantadores e filtros (Figura 1.4). Essa etapa ocorre em uma unidade dotada de sistema de deságue e adensamento do resíduo, denominada Unidade de Tratamento de Resíduo (UTR).

Assim, para que seja descontinuado o procedimento de despejo de resíduo em mananciais pelas ETAs, existe a necessidade de que os RETAs passem por um processo de desidratação, para redução de seus volumes e, posterior, destinação que não seja danosa ao meio ambiente.

Figura 1.4 - (a) Imagem de decantador em manutenção; (b) Imagem de filtro em operação (SANEPAR, 2010)



Uma das soluções adotadas para a desidratação dos RETAs é a utilização de lagoas de secagem. Em Goiânia, a ETA Rodolfo José Costa e Silva utiliza duas lagoas de secagem que operam alternadamente. Enquanto uma lagoa está em manutenção, para retirada e descarte dos RETAs desidratados, a outra entra em operação, recebendo e desidratando os resíduos em um ciclo que tem a duração de dois anos. A lagoa em operação é ilustrada pela Figura 1.5.

Figura 1.5 - Lagoa de secagem da ETA Eng. Rodolfo José Costa e Silva em Goiânia (GOOGLE EARTH, 2015)



Existem também outras maneiras empregadas para desidratação dos RETAs. As prensas desaguadoras, ilustradas na Figura 1.6-a, são uma tendência e seu uso já está em prática por algumas companhias de saneamento. Ela promove a desidratação do RETA de forma rápida (Figura 1.6-b), o que reduz a área necessária nas estruturas das ETAs com a eliminação das lagoas de secagem.

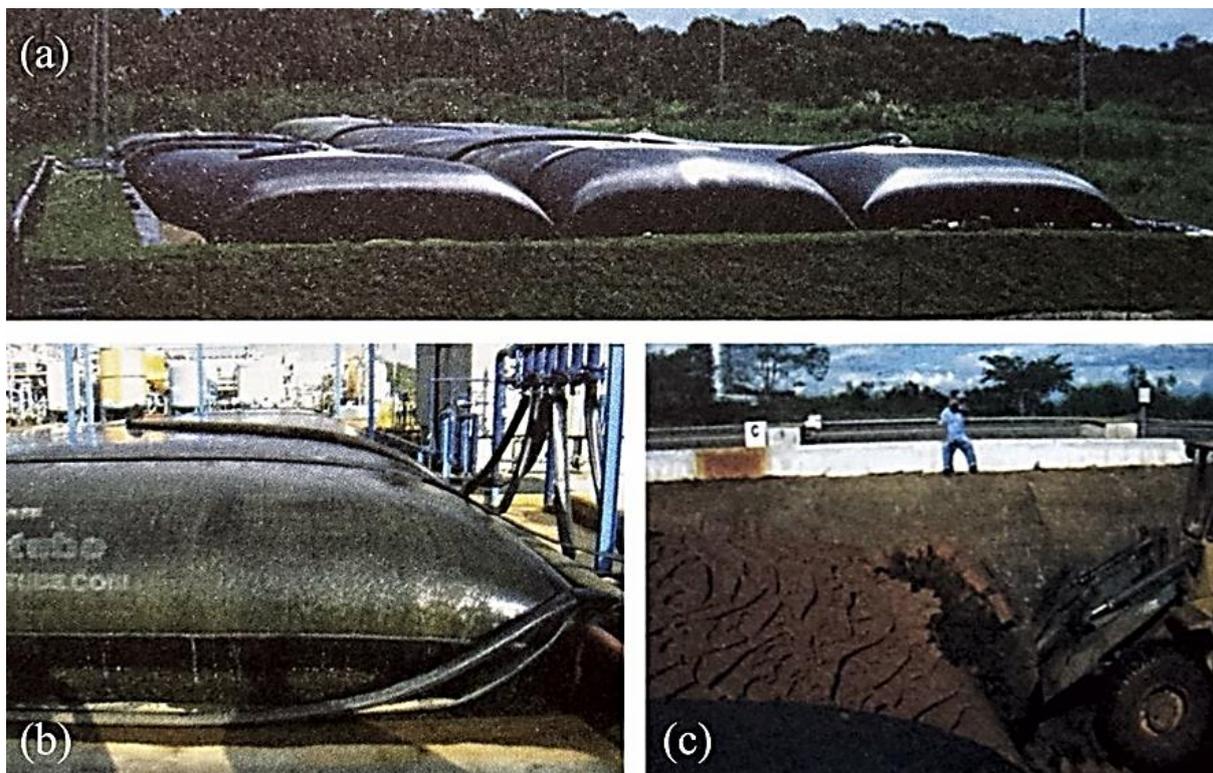
Figura 1.6 – Imagem de prensa desaguadora do RETA (a); RETA após desidratação (b) (GRATT, 2015)



Da mesma maneira, os BAGs desaguadores, apresentados na Figura 1.7, são comumente usados por sua eficácia na retirada da alta umidade dos RETAs, porém a disposição final dos resíduos continua a mesma, ou seja, os aterros.

Figura 1.7 – Bags desaguadores em ETA (a); BAG saturado com RETA (b); Bag rompido após saturação (c) (DI

BERNARDO *et al.*, 2012)



Tendo em vista as determinações das normas, como a NBR 10004 (ABNT, 2004) que trata da classificação dos resíduos sólidos e leis ambientais, e a Lei N° 12305 (BRASIL, 2010), que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), a tendência mais imediata das companhias de saneamento é suspender o lançamento dos resíduos nos mananciais e fazer a sua aplicação agrícola, para cultivo conforme BOTERO *et al.* (2009), para recuperação de áreas degradadas MOREIRA *et al.* (2009), dispô-los em aterros sanitários, entre outras soluções. Visto por essa perspectiva, a disposição em aterros sanitários é uma maneira controlada de descarte dos RETAs, porém, o custo de transporte do material e sua aplicação em um aterro é elevado. Considerando-se ainda o enorme volume gerado nas ETAs, ocorrerá a saturação do aterro em um curto período de tempo, o que acarretará a necessidade de criação de novos aterros, pois a produção de água tratada é plena e com demanda aumentando, conforme o crescimento das cidades.

1.4. ESTUDOS DE CASO DE USO E APLICAÇÃO DO RETA LEVANTADOS PELA LITERATURA

Foram levantados estudos de aproveitamento do RETA em diversos tipos de aplicações, conforme a tabela 1.1.

Tabela 1.1 – Estudos desenvolvidos com aplicação de RETA

Autores:	Cidade Origem do RETA:	Aplicação do RETA:	Percentuais utilizados
Hoppen <i>et al.</i> (2005)	Curitiba/ PR	Matriz de concreto	0, 3, 5, 7 e 10
Tartari <i>et al.</i> (2011)	Foz do Iguaçu/ PR	Aditivo em Massa Cerâmica	Apenas Caracterização
Teixeira <i>et al.</i> (2006)	Presidente Prudente/ SP	Material Cerâmico Estrutural	0, 10, 20 e 30
Vitorino, Monteiro e Vieira (2009)	Campos dos Goytacazes/ RJ	Cerâmica Argilosa	0, 3, 5, 7 e 10
Paixão <i>et al.</i> (2013)	Brumadinho/ MG	Cerâmica Argilosa	0, 2, 5 e 10
Oliveira, Machado e Holanda (2004)	Campos dos Goytacazes/ RJ	Cerâmica Argilosa	Apenas Caracterização
Hoppen <i>et al.</i> (2005)	Curitiba/ PR	Matriz de Concreto	0, 3, 4, 5, 7, 8, 10
Rodriguez <i>et al.</i> (2010)	Espanha	Clínquer de cimento	100%
Moreira <i>et al.</i> (2009)	ETA-RD/ DF	Áreas Degradadas	-
Botero <i>et al.</i> (2009)	Jaboticabal/ SP	Aplicação Agrícola	-

Os resíduos das ETAS possuem propriedades físico, química e mineralógicas próprias de acordo com cada região, assim, a natureza geológica da bacia hidrográfica a qual pertence o manancial, de onde é retirada a água bruta à ser tratada nas estações de tratamento de água, influencia de maneira importante nas características dos resíduos. Segundo Hoppen *et al.* (2004), no resíduo de ETA da região de campo dos Goytacazes (RJ), da bacia do Paraíba do Sul, são presentes: argilominerais, além de fases cristalinas referentes a caulinita, sílica, gibsitita e moscovita. O conhecimento desses aspectos é relevante no momento de direcionar o aproveitamento do material.

Outro aspecto importante é o custo com manuseio e transporte aliado às restrições ambientais vem condicionando as empresas de saneamento a buscarem alternativas para disposição final do RETA. De acordo com Hoppen *et al.* (2005), dentre as alternativas possíveis está a possibilidade de sua inserção na matéria prima de produtos da Indústria da Construção Civil, como fabricação de cimento, tijolos e reciclagem em matriz de concreto.

Nos estudos da tabela 1.1, que envolvem o setor cerâmico, os pesquisadores perceberam, um fator comum na caracterização dos resíduos: a composição da massa argilosa altamente heterogênea, sendo normalmente dosadas com mais de um tipo de argila.

“A etapa de queima do processamento da cerâmica pode promover a inertização de materiais potencialmente tóxicos por volatilização, transformação química e estabilização na fase vítrea que se forma pela participação de aluminossilicatos e fundentes na massa cerâmica” (VITORINO; MONTEIRO; VIEIRA, 2009).

Em estudo realizado por Oliveira, Machado e Holanda (2004), com amostras de RETA da região de Campos dos Goytacazes-RJ, foi observado que o resíduo possui características físico químicas e mineralógicas semelhantes às propriedades de algumas argilas cauliníticas da mesma região, utilizadas na fabricação de cerâmica vermelha. Dentre as informações obtidas, destaca-se a preocupação com o emprego moderado do RETA em função dos valores de Limite de Plasticidade (LP) de 53%, e do Índice de Plasticidade de 20%, obtidos por meio dos limites de consistência de Atterberg, determinados de acordo com as normas NBR 6459 (ABNT, 1984) e NBR 7180 (ABNT, 1988). Neste caso foi considerado que o valor de IP apresentado pela amostra está dentro dos parâmetros exigidos para o uso em cerâmica vermelha, já que o parâmetro para massas argilosas está entre 10% e 35%, no entanto o LP de 53% se mostra fora dos padrões aceitáveis cuja variação é de 18% até 30%.

De acordo com Vitorino, Monteiro e Vieira (2009), que também analisaram a incorporação do RETA na produção de cerâmica vermelha, utilizando amostras da ETA localizada no município de Campos de Goytacazes, com a inserção de mais de 3% do RETA na massa argilosa ocorre o aumento da absorção de água, refletindo também em um aumento da porosidade aberta da cerâmica. Isto pode ocorrer em função da elevada perda de massa durante a queima devido ao processo de combustão de matéria orgânica, eliminação de água de constituição da caulinita e dos hidróxidos. Este processo acarreta perda de resistência mecânica na cerâmica argilosa.

Na produção de concretos, em estudo desenvolvido por Hoppen *et al.* (2005), foi analisada a utilização do RETA *in natura* (obtido da centrífuga) sem a etapa de secagem, na substituição de um percentual do agregado miúdo. O estudo foi realizado com o uso do resíduo gerado na ETA Passaúna, localizada na região metropolitana de Curitiba-PR. Para a caracterização do resíduo, todos os dias durante dois meses foram retirados 2 kg de RETA da saída da centrífuga; posteriormente, os materiais coletados foram misturados e homogeneizados para sua caracterização física e química.

Utilizando um traço de concreto sem a inserção do RETA como referência, Tabela 1.2, foram desenvolvidos quatro composições com substituição da areia por diferentes percentuais de resíduo (3%, 5%, 7% e 10%). Os percentuais adotados são referentes à massa seca do agregado miúdo utilizado no traço de referência.

A relação cimento/agregados do concreto de referência foi definida tendo como objetivo a obtenção de um traço com consumo de cimento igual a 350 kg/m³, e a definição do teor ideal de areia foi considerada em função da trabalhabilidade, módulo de finura e relação água/cimento (a/c). Esta relação a/c foi definida, tendo como meta os índices necessários para produção de artefatos de concreto para redes de distribuição de energia.

Tabela 1.2 – Parâmetros de dosagem para o concreto de referência

Parâmetro de dosagem	Valor
Relação água/cimento (a/c)	0,5
Teor de agregados miúdos	40,4%
Teor de agregados graúdos	59,6%
Relação cimento/agregados totais	0,2 (ou 1:5)
Teor de lodo	0%

Fonte: Hoppen *et al.* (2005)

Na produção dos traços do concreto com inserção do RETA, a quantidade de água de amassamento foi corrigida conforme a massa e o teor de umidade presentes no resíduo. Conforme Hoppen *et al.* (2005), em cada traço produzido foram realizados ensaios para registro das medidas do abatimento do tronco de cone (*slump*), massa unitária, teor de ar incorporado e temperatura da mistura, de acordo com os procedimentos descritos pelas normatizações pertinentes. Para todos os traços produzidos foram moldados seis corpos de provas (CPs) cilíndricos de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura, conforme a NBR 5738 (ABNT, 2015), para serem rompidos aos 7 e aos 28 dias com objetivo de verificar a resistência à compressão.

As informações obtidas no estado fresco, Tabela 1.3, demonstram que na reação de hidratação do cimento nos concretos produzidos com a inserção do RETA, em comparação com o concreto de referência, existe um aumento da liberação de energia em forma de calor, sendo que a maior variação verificada ficou menor do que 3°C no concreto produzido com 10% do resíduo. Embora no estudo realizado por Hoppen *et al.* (2005) não haja uma explicação para este aumento, existe um entendimento de que a variação registrada não é suficiente para intensificar o surgimento de fissuras por retração térmica do concreto.

Tabela 1.3 – Características e propriedades dos concretos frescos

Teor de lodo (%)		0%	3%	5%	7%	10%
Dosagem		E-1038	E-1108	E-1109	E-1111A	E-1110
Temperatura do concreto (°C)		18,3	19,0	19,5	20,3	21,2
Traço	Cimento	1	1	1	1	1
	Areia média	2,02	1,96	1,92	1,88	1,82
	Brita 1	2,98	2,98	2,98	2,98	2,98
	Lodo ETA	-	0,06	0,10	0,14	0,20
Consumo (mg.m ⁻³)	Cimento	364	365	355	352	349
	Areia média	736	698	682	662	636
	Brita 1	1085	1061	1058	1049	1041
	Água	183	178	178	177	175
	Lodo ETA	-	22	36	50	70
Abatimento (mm)		65	17	10	06	00
Massa Unitária (kg/m ³)	Teórica	2373	2345	2326	2307	2280
	Real	2366	2319	2305	2293	2268
Teor de ar (%)	Teórica	0,3	1,1	0,9	0,6	0,5
	Real	-	2,0	1,5	1,5	1,0

Fonte: Hoppen *et al.* (2005)

Outra característica percebida através do ensaio de abatimento de tronco de cone foi a constante alteração da consistência do concreto, percebida pela redução do abatimento proporcional ao aumento da quantidade de RETA inserida, chegando ao abatimento nulo no traço com teor de 10%. Conforme Hoppen *et al.* (2005), esse processo de redução do abatimento está vinculado ao fato do resíduo apresentar maior área de superfície específica do que a areia, resultando em uma maior adsorção de água e, conseqüentemente, em uma retirada de parte da água de amassamento. No caso dos concretos produzidos com teor de RETA de 7% e 10%, o adensamento só foi possível em mesa vibratória, dificultando sua aplicação. Observando apenas o critério de trabalhabilidade, os traços produzidos com inserção de até 5% de resíduos podem ser utilizados na produção de blocos, peças e artefatos de concreto, inclusive de geometrias mais complexas, a despeito da significativa alteração de consistência em relação ao concreto de referência.

Nos ensaios de resistência à compressão axial simples, foi observado que proporcionalmente ao aumento do percentual de RETA na mistura, existe uma perda de resistência, registrada nos rompimentos dos corpos de prova com 7 e 28 dias, conforme demonstrado na Tabela 1.4.

Tabela 1.4 – Resultados de resistência à compressão

Teor de lodo ETA (% peso de areia)	0%	3%	5%	7%	10%
Resistência aos 7 dias (MPa)	27,3	26,1	25,4	22,1	9,7
Resistência aos 28 dias (MPa)	38,7	34,0	32,9	28,7	12,2

Fonte: Hoppen *et al.* (2005)

De acordo com a descrição de Hoppen *et al.* (2005), na análise visual dos corpos de prova (CPs), os que foram moldados para as misturas com teor de RETA de 10% apresentaram grande quantidade de ninhos de concretagem, sendo justamente o concreto que apresentou maior dificuldade de adensamento. Considerando os dados registrados, verifica-se que este é o traço com maior perda de resistência em relação ao concreto de referência. Já nos demais traços não existem relatos sobre problemas superficiais nos CPs, e embora perceba-se a redução de resistência, nota-se que mesmo no concreto com teor de 7% de resíduos, a resistência alcançada com 7 dias foi superior a 20 MPa.

Considerando os aspectos físicos referentes à absorção de água, massa específica e índice de vazios (Tabela 1.5), foi observado nos ensaios realizados que o aumento do percentual de absorção de água é proporcional ao aumento da quantidade de RETA na mistura, restringindo a utilização do concreto em ambientes agressivos em função da redução de sua durabilidade. Também houve um aumento no índice de vazios, sendo mais acentuado nas misturas com teores de resíduos superiores a 5%. Hoppen *et al.* (2005) creditam as duas variações ao fato das partículas do argilomineral adsorverem mais água em sua superfície uma vez que possuem maior área específica. Já em relação à massa específica do concreto endurecido, houve uma redução nos que foram produzidos com a introdução do RETA, sendo considerada mais significativa no traço com teor de 3% e praticamente constante nos demais teores. Essa redução é creditada ao fato do resíduo possuir menor densidade que a areia e ao aumento da quantidade de vazios, conforme pode ser verificado na Figura 1.8.

Figura 1.8 – Micrografias da superfície de fratura de CP de concreto com 3% de lodo, obtidas por microscopia eletrônica de varredura (HOPPEN *et al.*, 2005), destacando a presença de vazios

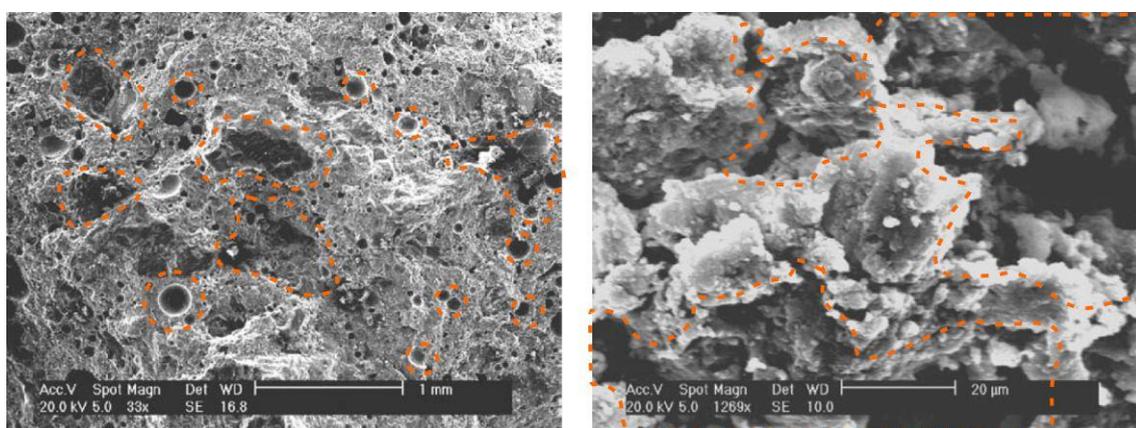


Tabela 1.5 - Resultados dos ensaios físicos nos concretos endurecidos

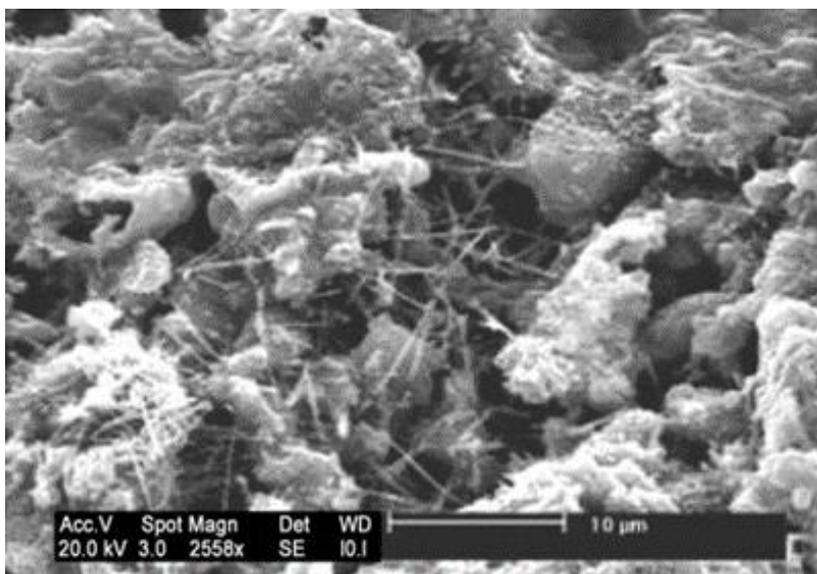
Teor de lodo (% em massa de areia)		0%	3%	5%	7%	10%
Absorção (%)	Após imersão em água	7,14 (5,37)	7,76 (5,83)	7,80 (5,86)	8,62 (6,48)	8,94 (6,72)
	Após imersão e fervura	7,44 (5,59)	7,87 (5,92)	9,18 (6,90)	9,39 (7,06)	9,36 (7,24)
Massa específica (kg/dm ³)	Real	2,70	2,54	2,54	2,53	2,54
	Seca	2,25	2,12	2,06	2,05	2,05
	Após saturação	2,41	2,28	2,22	2,22	2,23
	Após saturação e fervura	2,42	2,28	2,25	2,24	2,24
Índice de vazios (%)	Após saturação	16,13	16,40	16,51	17,87	18,45
	Após saturação e fervura	16,72	17,62	19,26	15,52	19,95

Os demais valores correspondem aos critérios da NBR 9778/2005 a qual foi utilizada como referência para o ensaio, utilizando-se o recurso da fervura dos corpos-de-prova.

Fonte: Hoppen *et al.* (2005)

Conforme a Figura 1.9, em que se tem a imagem obtida por microscopia eletrônica de varredura e análises por microsonda analítica de raios X, não foram identificadas fases químicas e microestruturas incomuns à massa de concreto (HOPPEN *et al.*, 2005).

Figura 1.9 - Micrografias da superfície de fratura de CP de concreto com 4% de lodo, por microscopia eletrônica de varredura, mostrando a presença de etringita (HOPPEN *et al.*, 2005)



Ainda segundo os autores, considerando os dados produzidos no estudo, conclui-se que os traços de concreto contendo até 5% de lodo podem ser aplicados em situações que vão desde a fabricação de artefatos, blocos e peças de concreto, até a construção de pavimentos em concreto de cimento Portland (pavimento rígido). Para as misturas com teores maiores do que 5%, a

utilização deve ser restringida para situações onde a trabalhabilidade não é necessária, como na execução de blocos e placas de vedação.

Em um estudo complementar realizado por Hoppen *et al.* (2006), a conclusão continua sendo de que o uso do lodo em concreto é tecnicamente viável, no entanto aparece mais explicitamente a preocupação em direcionar seu uso para concretos não-estruturais, em função de não se conhecer seu desempenho ao longo do tempo.

Rodríguez *et al.* (2011) estudaram a substituição de argila por RETA para produção de clínquer de cimento Portland, avaliando os resultados em comparação com a amostra de controle. Salienta-se que as matérias primas tradicionais (pedra calcária, argila e areia) e o RETA foram moídos para adquirirem a mesma finura (granulometria) em todas as misturas.

Foram elaboradas duas composições, com as mesmas características, para elaboração de duas misturas. Sendo que a mistura de controle, sem resíduo, foi denominada M1 e a Mistura com emprego de resíduo, denominada M2:

Módulo de sílica: $MS = SiO_2 / (Al_2O_3 + Fe_2O_3) = 2,30$

Fator de saturação de cal: $FSC = CaO / (+ 2.8SiO_2 1.18Al_2O_3 0.65Fe_2O_3 +) = 0,98$

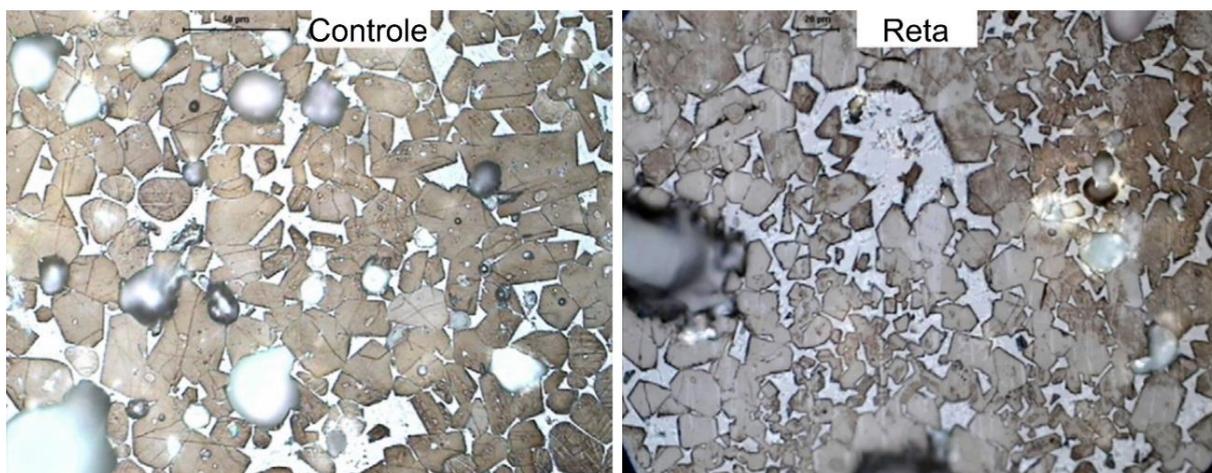
Fluxo do módulo: $FM = Al_2O_3 / Fe_2O_3 = 1,50$

A cal livre nas duas misturas foi medida depois de clinquerização, a 1400°C, 1450°C e 1500°C, durante 30 minutos. Os clínqueres obtidos a 1450°C foram caracterizados por meio de: FRX, DXR, FTIR, MO e MEV / EDX.

As duas misturas foram proporcionadas, sendo que a amostra de controle continha 82,32% de calcário, 16,14% de argila, 0,6% de areia e 0,94% de Fe₂O₃; já a M2, continha 80,13% de calcário, 12,81% de RETA, 5,8% de areia e 1,23% de Fe₂O₃. O RETA substituiu a argila inteiramente. Uma vez que a proporção de areia é maior na mistura M2, a reatividade desta mistura pode ter sido inferior.

Na DRX da Figura 1.10, não foi observada nenhuma diferença entre os difratogramas para os resíduos de ETA original e a amostra aquecida a 400°C. O clorito (clinochloro) desapareceu no padrão de DRX para a amostra de 500°C e manteve-se ausente nas temperaturas mais altas. Os picos típicos da calcita (CaCO₃) diminuíram na amostra aquecida a 600°C, e os picos de mica e feldspato desapareceram no material a 700°C, enquanto que o pico de quartzo e, especialmente o de calcita, diminuíram. Os novos picos observados foram atribuídos a um produto da reação entre os silicoaluminatos (nefelina: NaAlSiO₄).

al., 2011)



De acordo com os quantitativos observados na Tabela 1.6, da DRX, ambos os clínques continham percentagens muito elevadas e similares de alita e uma proporção relativamente baixa de belita. No entanto, as composições das respectivas fases intersticiais variaram substancialmente, com um nível muito elevado de aluminato e baixo teor de ferrita no clínquer com RETA, e as proporções mais próximas dos cálculos da fórmula de Bogue no caso da amostra de controle.

Tabela 1.6 - Análise quantitativa das fases nos clínques obtidos a 1450°C

Composto (%)	Clinquer (M2)		Clinquer (controle)	
	DRX	FRX (Bogue)	DRX	FRX (Bogue)
C ₃ S (Ca ₃ SiO ₅)	72,1	64,50	73,4	65,57
C ₂ S (Ca ₂ SiO ₄)	4,6	11,35	7,3	10,25
C ₃ A (Ca ₃ Al ₂ O ₆)	18,0	7,90	5,4	8,42
C ₄ AF (Ca ₄ Al ₂ Fe ₂ O ₁₀)	3,8	11,13	13,9	11,61
SiO ₂	0,7			
CaO	0,8	1,99		0,46

Fonte: Rodríguez *et al.* (2011)

O clínquer obtido após a queima com 12% de RETA na mistura a 1450°C, durante 30 min, continha mais de 75% de silicatos de cálcio, sendo 22% na fase intersticial. A análise microestrutural não mostrou diferenças em tamanho de cristal de silicato ou na composição entre o clínquer com RETA e o de controle. Assim, o RETA estudado pode ser usado como uma matéria prima na fabricação de cimento Portland, como substituto total da argila e parcial do calcário. É importante um estudo mais aprofundado para avaliar a probabilidade de ocorrer

expansão em concretos que utilizarem o cimento com clínquer M2, devido o percentual elevado de CaO (1,99%).

1.5. OBJETIVOS

O objetivo geral da presente pesquisa é avaliar a viabilidade técnica do emprego dos resíduos gerados na ETA Eng. Rodolfo José Costa e Silva (ETA Meia-Ponte), localizada em Goiânia, em substituição aos agregados miúdos em pisos intertravados de concreto (pavers), empregados na construção. Os resíduos utilizados nesta pesquisa são oriundos do processo de potabilização da água, onde é aplicado o coagulante sulfato de alumínio, que gera, portanto, um resíduo aluminoso.

São objetivos específicos da pesquisa:

- aprofundar-se no estudo e conhecimento do resíduo gerado na ETA Eng. Rodolfo José Costa e Silva, baseado em caracterização física, química e mineralógica, de modo a subsidiar a análise de viabilidade técnica da aplicação do resíduo em materiais de construção;
- analisar o potencial de utilização do RETA em substituição parcial ao agregado miúdo em pavers de concreto;
- avaliar se pavers confeccionados com o RETA possuem propriedades mecânicas semelhantes aos materiais sem o resíduo.

1.6. ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho foi ordenado em quatro capítulos. O presente capítulo apresenta uma introdução ao tema da dissertação, com a contextualização do tema abordado, justificativa, a geração do resíduo, estudos de caso e a estrutura do trabalho.

O segundo capítulo trata do artigo científico, onde serão apresentadas e discutidas as análises dos resultados encontrados, conforme a metodologia da investigação da pesquisa, com a produção do piso de concreto (paver) com inserção do RETA, tendo-se como parâmetro os aspectos normativos de produção do piso, bem como a amostra de controle, que não possui o resíduo.

No terceiro capítulo são apresentadas as conclusões e as considerações finais do trabalho, além das sugestões para novas pesquisas relacionadas ao tema em estudo.

No final, constam as referências gerais de toda a pesquisa, ou seja, do trabalho como um todo.

CAPÍTULO 2 – ARTIGO CIENTÍFICO

Neste capítulo será apresentado o artigo científico produzido como resultado do trabalho realizado. Essa pesquisa será submetida ao periódico *Journal of Cleaner Production*, estando sua formatação, tópicos e desenvolvimento atrelados às exigências dessa revista.

USE OF WATER TREATMENT PLANT SLUDGE IN INTERLOCKING CONCRETE PAVERS

Flávio Carvalho de Araújo¹, Oswaldo Cascudo² and Paulo Sergio Scalize³

^{1,2,3} Universidade Federal de Goiás – UFG, Goiânia, Goiás, 74605-220, Brazil

Flávio Carvalho de Araújo is an architect at SANEAGO, and a Professor at the Pontifical Catholic University of Goiás (Pontifícia Universidade Católica de Goiás – PUC-GO), Goiânia, GO, Brazil. He received his BS in architecture from PUC, GO, Brazil, in 2000; his specialization from UNIFAN, GO, Brazil in 2011, and his MS from UFG, GO, Brazil, in 2017. His research interests include concrete durability and development of new sustainable materials.

Oswaldo Cascudo is a Professor at the Federal University of Goiás (Universidade Federal de Goiás - UFG), Brazil. He received his B.Eng from UFPB, PB, Brazil, in 1987; his MS and PhD from USP, SP, Brazil, in 1991 and 2000, respectively. He made postdoctoral research at INSA - Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse - France, in 2003-2004. His research interests include technology and durability of concrete, reinforcement corrosion and science of construction materials.

Paulo Sergio Scalize is a Professor at the Federal University of Goiás (Universidade Federal de Goiás – UFG), Brazil. He received his BS in Biology and Medical Biochemistry from CBM, SP, Brazil, in 1991; his BS in civil engineering from FECA, SP, Brazil in 2004; his MS and PhD in sanitation from USP, SP, Brazil, in 1997 and 2003, respectively. His research interests include water quality, treatment and destination of the residue from water treatment stations.

RESUMO

O presente trabalho propõe uma avaliação técnica para utilização dos resíduos gerados na

Estação de Tratamento de Água (ETA) Eng. Rodolfo José Costa e Silva, localizada em Goiânia-Goiás, como substituto parcial dos agregados miúdos de elementos cimentícios. A pesquisa executou a caracterização físico-química e mineralógica do resíduo, bem como a investigação quanto à possibilidade de atividade pozolânica do material. Baseado em literatura específica e normas vigentes sobre o tema, comparou-se as características do resíduo com as matérias primas tradicionais utilizadas para produção de componentes cimentícios. Nesse sentido, foi elaborado um estudo com aplicação de resíduos da ETA em pisos intertravados de concreto (pavers) utilizados na construção civil. Foram avaliadas características mecânicas e físicas dos componentes produzidos, de resistência à compressão, absorção de água e ciclos de molhagem e secagem a fim de comparar seu desempenho com materiais produzidos na indústria, verificando-se que o resíduo demonstrou comportamentos similares ou superiores aos dos blocos tradicionais nesses quesitos.

Keywords: concreto; cimento; paver; ETA; resíduo; lodo.

HIGHLIGHTS:

- Sustainable use of WTP residues.
- Replacement of small aggregate of concrete by WTP residue.
- Concrete floors with optimum 5% WTR content.

1. INTRODUÇÃO

A história revela que as cidades antigas tiveram um crescimento espontâneo, contudo sem controle do desenho urbano, passando a ter uma preocupação sanitária de seus espaços somente no período pós revolução industrial. O crescimento territorial e industrial, como também o sanitário, estão diretamente ligados ao setor da construção civil, pois foi o desenvolvimento desse setor que permitiu esse progresso. Para exercer as atividades de construção é necessário o uso de diversos materiais, dos quais se pode destacar o uso do gesso, cal, cimento e aço.

Todavia, para produção desses materiais é necessário o uso de matéria prima natural, colocando a construção civil como a indústria que mais consome recursos naturais, causando grandes impactos negativos no meio ambiente, devido à extração desses recursos, como também pela geração de 50% de todo resíduo sólido urbano, o qual é descartado, em grande parte, em lugares inapropriados (Contreras et al., 2016). Somado a isso, têm-se também detritos produzidos pelas estações de tratamento de água, as quais possuem um alto número de resíduos gerados que não são descartados adequadamente (Frias et al., 2013).

A fim de minimizar esse efeito negativo, vários estudos vêm sendo desenvolvidos para o aproveitamento de resíduos na produção de materiais e componentes de construção civil, contribuindo tanto para diminuição do uso de matérias prima naturais, quanto para a solução do passivo ambiental relacionado ao seu descarte. Em sua maioria, as pesquisas utilizam resíduos do próprio setor da construção civil, como é o caso dos resíduos de construção e demolição, mas diversos outros resíduos são empregados, sendo desenvolvidos estudos variados, com aplicações na produção de concreto (Aliabdo et al., 2014; Bravo et al., 2016), na produção de blocos de concreto (Poon e Chan, 2006; Poon e Lam, 2008), como adição pozolânica no cimento (Asensio et al., 2016), em misturas asfálticas (Gómez-Mejide et al., 2016; Ossa et al., 2016), como constituintes da base para pavimentação (Xuan et al., 2015) e na criação de novos materiais e componentes de construção (Mymrin et al., 2015), entre outros. Todavia, mesmo com o alto potencial de uso e o elevado volume de detritos produzidos por diversos tipos de fontes industriais, poucas pesquisas vêm sendo desenvolvidas para utilização desses resíduos, das quais pode-se citar a produção de concreto usando cinzas e areia de fundição como substituição parcial de agregados miúdos naturais (Aggarwal e Siddique, 2014), pasta de cimento produzida com o uso de diferentes lodos (Yen et al., 2011), e a utilização de resíduo de estação de tratamento de água no concreto (Lee et al., 2012).

O resíduo produzido em estação de tratamento de água (RETA) é a parte sólida retirada nos processos de decantação e filtração da água. De forma geral, as estações que utilizam o processo convencional para tratar a água, recebem, em primeiro momento, a água bruta que passa inicialmente pelo processo de coagulação, o qual implica na aplicação de produtos químicos para precipitação de compostos em solução e desestabilização de suspensões coloidais de partículas sólidas; em seguida, passa-se para fase de floculação da água, que consiste em sua agitação por meio de um agitador mecânico, o qual promove a formação de flocos; a próxima etapa, chamada de decantação, trata da separação da parte sólida e líquida, onde os flocos formados se sedimentam devido à diferença de densidades, e são removidos e conduzidos para seu descarte; a etapa de filtração, imediatamente posterior à decantação, retira o restante das partículas sólidas de menor dimensão que não foram removidas na etapa anterior. O resíduo resultante de ambos os processos, decantação e filtração, é então encaminhado a lagoas de secagem, onde ocorre a evaporação da água, restando somente a parte sólida, ou seja, o RETA. Salienta-se que esse tipo de destinação e tratamento adequados acontece de forma ainda muito tímida no Brasil.

Em termos de mensuração da produção do RETA e de seu descarte, Moreira et al. (2009) estimam que, no Brasil, sejam despejadas 2000 m³/dia de RETA diretamente nos cursos d'água sem qualquer tratamento, propiciando a ocorrência de odores, o crescimento excessivo de algas e a mortandade de peixes devido à sua toxicidade crônica para os organismos aquáticos, como também à degradação da qualidade da água e dos sedimentos. Tratando-se especificamente da estação de tratamento de água em estudo, ETA Eng^o. Rodolfo Costa e Silva, infere-se que a produção anual de RETA alcança cerca de 4000 m³ e que este é depositado em aterro sanitário (Saneago, 2015).

Dentro do setor da construção civil o RETA pode ser utilizado para diversas finalidades, como na produção de matriz de concreto (HOPPEN et al. 2005), de tijolos cerâmicos (TARTARI et

al. 2011, PAIXÃO et al. 2013), de Clínquer de cimento (RODRIGUEZ et al. 2010). Neste sentido, foi observado que não se têm estudos aprofundados a respeito do uso do resíduo em elementos de concreto. Assim, o objetivo geral do presente trabalho é avaliar a viabilidade técnica do emprego dos resíduos gerados na Estação de Tratamento de Água Eng^o. Rodolfo J. Costa e Silva (ETA Meia-Ponte), localizada em Goiânia, Goiás, Brasil, em substituição aos agregados miúdos em pisos intertravados de concreto.

Os objetivos específicos são:

- aprofundar-se no estudo e conhecimento do resíduo gerado na ETA Eng. Rodolfo José Costa e Silva, baseado em caracterização física, química e mineralógica, de modo a subsidiar a análise de viabilidade técnica da aplicação do resíduo em materiais de construção;
- analisar o potencial de utilização do RETA em substituição parcial ao agregado miúdo em pavers de concreto;
- avaliar se pavers confeccionados com o RETA possuem propriedades mecânicas semelhantes aos materiais sem o resíduo.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Caracterização físico química e mineralógica do RETA

O resíduo utilizado para a caracterização física e química foi obtido da ETA Engenheiro Rodolfo J. Costa e Silva, conforme implantação na Figura 1, localizada na cidade de Goiânia, no estado de Goiás, Brasil.



Fig. 1. Localização da ETA Engenheiro Rodolfo J. Costa e Silva e das lagoas de secagem de RETA.

Primeiramente foi realizada a coleta composta de amostras dos resíduos, em três pontos distintos da lagoa de secagem, ilustrada na Figura 2 (a), a qual é gerenciada pela empresa Saneamento de Goiás S.A. (Saneago). A escolha dos pontos visou compor amostras que apresentassem homogeneidade, minimizando, em sua constituição, a concentração de elementos que eventualmente se agruparam em determinado ponto da lagoa de secagem durante a sedimentação do RETA, ao longo do ciclo de dois anos. Dos pontos escolhidos foram retirados 200kg de resíduo, de uma profundidade de até 80cm. Em seguida, as três amostras foram destorroadas, por processo mecânico com equipamento de trituração, e misturadas, com ferramentas estéreis livres de contaminação por outros elementos.



Fig. 2. (a) Lagoa de secagem de RETA (cheia), antes da retirada para disposição em aterro; (b) Detalhe do resíduo; (c) Retirada do resíduo; (d) RETA coletado para análise

Os resíduos foram submetidos a ensaios para caracterização física, química e mineralógica, conforme o resumo da Tab. 1, a qual engloba, em suma, na parte física, determinações da massa específica conforme a NBR 16097 (ABNT, 2012), da composição granulométrica, de acordo com a NBR 7181 (ABNT, 2017) e, como as amostras de resíduo eram compostas de agregações, foi efetuada uma análise complementar, por meio de granulometria a laser, utilizando o aparelho S 3500 da MICROTRAC. A metodologia da NBR 6459 (ABNT, 2017) propiciou a determinação dos índices de consistência do resíduo e do limite de liquidez, e a NBR 7180 (ABNT, 2016) possibilitou mensurar o limite de plasticidade do resíduo. Quimicamente, verificou-se a concentração dos elementos químicos pela análise da espectrometria de absorção atômica (EAA), além da análise de compostos químicos, utilizando-se o método do pó, e a caracterização mineralógica foram ensaiadas pela análise de difração de raios X (DRX) em difratômetro Shimadzu XRD 700, e para a verificação da atividade pozolânica foi adotado o método Chapelle modificado, conforme a NBR 15895 (ABNT, 2010), o qual compreende a

agitação do resíduo com óxido de cálcio em água, durante 16 horas com temperatura controlada de $(90\pm 5)^{\circ}\text{C}$, chegando-se ao resultado pela quantidade de hidróxido de cálcio consumido ou fixado pelo RETA. A análise morfológica foi realizada por meio de microscopia eletrônica de varredura (MEV), com microanálises executadas por Energia Dispersiva de raios X (EDS). As análises de MEV foram realizadas empregando-se Jeol, JSM – 6610, equipado com EDS, Thermo Scientific NSS Spectral Imaging, que possibilitou a caracterização morfológica do material, juntamente com uma análise qualitativa dos resíduos e mapeamento de seus picos cristalinos, indicativos dos elementos químicos identificados.

Tab. 1 – Resumo dos ensaios realizados, finalidade e referências normativas

Análise Física		
Ensaio	Finalidade	Norma/ Métodos
Granulometria método tradicional	Composição granulométrica do resíduo	NBR 7181 (ABNT, 2009),
Granulometria via granulômetro a laser	Composição granulométrica da fração fina	Granulômetro a laser não normalizado.
Classificação granulométrica	Determinar a classificação para emprego em concreto	NBR 7211 (ABNT, 1999)
Massa Específica	Determinação da massa específica	NBR 6408 (ABNT, 1984)
Índices de consistência	Determinação dos índices de Atterberg	NBR 6459 (ABNT, 1984)
Limite de plasticidade	Classificação plástica do resíduo	NBR 7180 (ABNT, 1988)
Análise Química		
Ensaio	Finalidade	Norma/Métodos
Análises químicas	Determinação da composição química na forma de óxidos	-
Chapelle	Verificação de atividade pozolânica	NBR 15895 (ABNT, 2010)
Análise Mineralógica		
Ensaio	Finalidade	Norma/Métodos
Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	Análise da morfologia do resíduo	-
Microsonda (EDS)	Identificação de elementos químicos (picos cristalinos)	-
Difratometria (DRX)	Análise mineralógica qualitativa, Fases cristalinas da amostra	-
Espectrometria de Fluorescência de Raio X (ED-FRX)	Análise de composição química, quantitativa e qualitativa	NBR 16137 (ABNT, 2013)

2.2. Caracterização da produção do PAVER

O objeto de estudo deste trabalho é o componente cimentício piso intertravado de concreto (paver) com o emprego do RETA em sua composição. A definição desse tema aconteceu por meio da constatação da fração de areia presente no resíduo, observada durante os ensaios de caracterização física, fato que levantou a hipótese de que o RETA poderia substituir parcialmente a areia utilizada na confecção dos pavers.

Os pavers foram produzidos em uma tradicional fábrica de artefatos de concreto, localizada na região metropolitana da cidade de Goiânia, Goiás, Brasil, a qual produz e comercializa esse tipo de componente em larga escala.

2.2.1. Definição do proporcionamento para produção dos pavers

A composição dos lotes para a produção dos pisos intertravados foi feita adotando-se o proporcionamento utilizado pela empresa de artefatos, com proporção em massa de 1:5 (1 parte de cimento e 5 de agregados), sendo que do proporcionamento total de agregados em massa 3,75 são referentes ao uso de areia média seca lavada e 1,25 refere-se à parcela de pedrisco.

O RETA foi inserido em substituição à fração de areia, como agregado miúdo, em percentuais em massa de 0%, 5%, 10%, 15%, 20% e 25%. O fator água/ cimento foi diferente para cada composição, pois na medida em que se aumentava o teor de resíduo, havia necessidade de acréscimo da quantidade de água, devido ao quantidade de finos presentes no resíduo. Os corpos de prova foram submetidos aos ensaios de resistência à compressão, de absorção de água e molhagem e secagem acelerado, para verificação da durabilidade, no laboratório de materiais de construção da Escola de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Goiás – EECA-UFG, conforme os parâmetros estabelecidos na NBR 9781 (ABNT, 2013).

O consumo dos materiais está listado na Tabela 2, que relaciona a quantidade aplicada de cada elemento de composição no seu respectivo proporcionamento.

Tab. 2 - Consumo de insumos por lote de pavers produzidos (porcentagens em massa)

Proporcionamento dos Pavers	Areia (%)	Pedrisco (%)	Cimento (%)	RETA (%)	A/C
PVR ₀	62,5	20,83	16,6	0	0,5
PVR ₅	57,5	20,83	16,6	5	0,6
PVR ₁₀	52,5	20,83	16,6	10	0,65
PVR ₁₅	47,5	20,83	16,6	15	0,7
PVR ₂₀	42,5	20,83	16,6	20	0,75
PVR ₂₅	37,5	20,83	16,6	25	0,8

2.2.2. Produção dos corpos de prova - PAVERS

Foram produzidos componentes de pisos intertravados de concreto, do tipo I e dimensões regulares, conforme definições da NBR 9781 (ABNT, 2013), com medidas nominais de 60mm x 100mm x 200 mm, o que gera uma massa aproximada de 2,5 kg por unidade.

A confecção dos componentes intertravados de concreto foi conduzida de acordo com a sequência apresentada na Figura 3, que ilustra o carregamento das fôrmas com o concreto (Fig. 3a), proporcionado conforme Tab2, e posteriormente prensagem (Fig.3b) e os pavers prensados (Fig. 3c).



Fig. 3. Sequência da produção dos pavers: (a) carregamento das fôrmas; (b) prensagem dos pavers; (c) lote de pavers pós prensagem.

2.2.3. Caracterização física dos agregados areia e pedrisco

Para determinação das composições granulométricas da areia e do pedrisco, utilizou-se o método prescrito na NM 248 (ABNT, 2003) de agregados graúdos e miúdos para concreto, sendo seus resultados expostos na Tabela 3.

Salienta-se que também foram determinados a dimensão máxima característica e módulo de finura dos dois insumos, chegando-se ao valor de 9,5 mm e 4,8 mm, e MF de 5,25 e 2,77, para brita e areia, respectivamente.

Tab. 3 - Distribuição da granulometria dos agregados utilizados na fabricação dos pavers

Fração	Diâmetro da peneira (mm)	Agregado miúdo		Agregado graúdo	
		Material retido na peneira (%)		Material retido na peneira (%)	
Graúda	9,5	0,00		5,1	
	4,8	2,40	9,5	38,3	89,9
	2,4	7,10		46,5	
Miúda	1,2	16,30		6,5	
	0,6	31,0		1,6	
	0,42	18,0		0,4	
	0,3	12,1	90,5	0,2	10,1
	0,25	7,20		0,4	
	0,16	3,60		0,2	
	0,075	1,2		0,3	
	< 0,075	1,1		0,5	

2.2.4. Caracterização física e química do cimento

O cimento utilizado foi o Ciplan CP II Z-32, cimento Portland composto com pozolana, conforme a especificação da NBR 11578 (ABNT, 1991), sendo sua caracterização física e química fornecida pela fábrica e apresentada na Tabela 4.

Tab. 4 – Caracterização física, mecânica e química do cimento CP II Z-32 utilizado

Cimento tipo CP II Z - 32			
Propriedades determinadas		(%)	Limites
Massa específica (g/cm ³)		2,97	-
Finura	Retido na peneira 200 (%)	0,4	≤ 12
	Retido na peneira 325 (%)	-	≤ -
Área específica (cm ² /g)		5490	≥ 2600
Resistência à compressão (Mpa)	3 dias	20,7	≥ 10
	7 dias	27,6	≥ 20
	28 dias	35,8	≥ 32 e ≤ 49
Perda ao fogo		1,45	≤ 6,5
Resíduo insolúvel		1,99	≤ 2,5
Trióxido de enxofre (SO ₃)		3,09	≤ 4,0
Óxido de magnésio (MgO)		1,23	≤ 6,5
Dióxido de Silício (SiO ₂)		17,11	-
Óxido de ferro (Fe ₂ O ₃)		2,42	-
Óxido de alumínio (Al ₂ O ₃)		3,65	-
Óxido de cálcio (CaO)		60,64	-
Óxido de cálcio livre (CaO)		2,3	-
Álcalis totais	Óxido de sódio (Na ₂ O)	0,09	-
	Óxido de potássio (K ₂ O)	0,22	-
	Equivalente Alcalino	0,23	-
Álcalis solúveis em água	Óxido de sódio (Na ₂ O)	0,01	-
	Óxido de potássio (K ₂ O)	0,14	-
	Equivalente Alcalino	0,10	-
Sulfato de cálcio (CaSO ₄)		2,25	-

Ainda de acordo com a NBR 11578 (ABNT, 1991), o Cimento Portland composto com pozolana possui em sua composição o clínquer com teor predominante entre 76 e 94%, sulfato de cálcio (≤ 4,0%) e material pozolânico entre 6 e 14%.

2.3. Caracterização físico-mecânica do paver

2.3.1. Ensaio de resistência mecânica

O ensaio de resistência à compressão foi realizado no Laboratório de Materiais de Construção da EEC/UFG, conforme metodologia da NBR 9781 (ABNT, 2013) e ilustração da Figura 4.



Fig. 4. Ensaio de resistência à compressão: Piso rompido durante o ensaio

Foram realizados com as idades de 7, 14, 28, 56 e 920 dias, sendo a tensão de ruptura calculada, através da média de três pavers de cada composição (0%, 5%, 10%, 15%, 20% e 25% de RETA).

2.3.2. Ensaio de absorção de água

A absorção de água de cada lote dos pavers foi determinada pela diferença entre sua massa úmida (saturada) e massa seca, em relação à massa seca. Para tanto, realizou-se as médias de três corpos de prova de cada lote, sendo que o ensaio foi repetido para as idades de 7, 14, 28, 56 e 920 dias. A Figura 5 ilustra a realização do ensaio.



Fig. 5. Determinação da absorção: (a) Pavers submersos por 24 horas; (b) Pavers em estufa até constância de massa

2.3.3. Ensaio acelerado de durabilidade – Molhagem e secagem

A repetição dos ensaios aos 920 dias de idade permitiu perceber se ocorreram reações deletérias no concreto ao longo de um período maior de tempo, após o intervalo em que ocorrem mais reações químicas de cura do concreto. Posteriormente a essa idade, foi executado o ensaio de molhagem e secagem acelerado, que consistiu na verificação do surgimento de neo-formados (eflorescências) ou de anomalias nos componentes, como fissuras, desagregação, formação de vesículas, bem como alterações nos valores de absorção de água e de tensão de ruptura a partir da realização de 12 ciclos de molhagem e secagem dos pavers, sendo os ciclos conduzidos da seguinte forma: 24 horas de imersão em água seguidas de 24 horas de secagem em estufa a 60°C, até atingirem a constância de massa e perfazendo assim um ciclo completo (dois dias). Ao final dos ciclos os pisos foram rompidos para verificação de alterações da resistência à compressão, aos 945 dias.

Aos 1310 dias foram repetidos os ensaios de secagem e molhagem, com ciclos de molhagem e secagem em 24 horas com temperatura da estufa à 90°C, até a constância de massa das amostras. As 12 ciclos foram realizados apenas com as amostras de 0% (controle) e 5% de resíduo, pois conforme os resultados de resistência mecânica anteriormente obtidos, observou-se ganho de resistência da amostra de 5% superior à amostra de controle, e também, para avaliação comparativa de durabilidade, com idade mais avançada. Foram realizados ensaios de resistência à compressão e absorção de água ao final dos 12 ciclos, aos 1322 dias.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Caracterização do resíduo

3.1.1. Composição granulométrica

Se o RETA for analisado como agregado miúdo para argamassas e concretos, tem-se que este apresenta dimensão máxima característica (DMC) de 2,0 mm, módulo de finura (MF) de 0,77

e teor de material pulverulento (% que passa na peneira 0,075 mm) superior a 76%, como pode ser observado na Tabela 6.

Tab. 5 - Distribuição granulométrica do material constituinte do RETA

Fração	Diâmetro da peneira(mm)	% retido	% acumulado	
Graúda	9,5	0,00	0,00	
	4,8	0,00	0,00	2,98
	2,0	2,98	2,98	
Miúda	1,2	2,81	5,79	
	0,6	4,72	10,51	
	0,42	2,43	12,94	
	0,30	2,52	15,46	
	0,25	1,40	16,86	97,02
	0,16	3,87	20,73	
	0,075	3,53	24,26	
	< 0,075	75,74	100,00	

Fazendo-se uma análise comparativa dos resultados apresentados nas Tabelas 3 e 5, é possível visualizar que o RETA possui 24,26% de partículas compatíveis com a areia, porém com uma quantidade muito superior de matéria com diâmetro inferior a 0,075 mm. Infere-se que essa variação granulométrica e o acréscimo de grãos miúdos do resíduo auxilie para uma melhor coesão do concreto que compõe o paver, fechando os espaços entre os grãos maiores (efeito fíler).

As curvas de distribuição granulométrica do material são apresentadas na Figura 6, em que podem ser observadas três curvas distintas, sendo uma determinada via ensaio tradicional, por peneiramento e sedimentação, conforme NBR 7181 (ABNT, 2017), e as outras duas obtidas via ensaio a laser sem e com a aplicação de ultrassom.

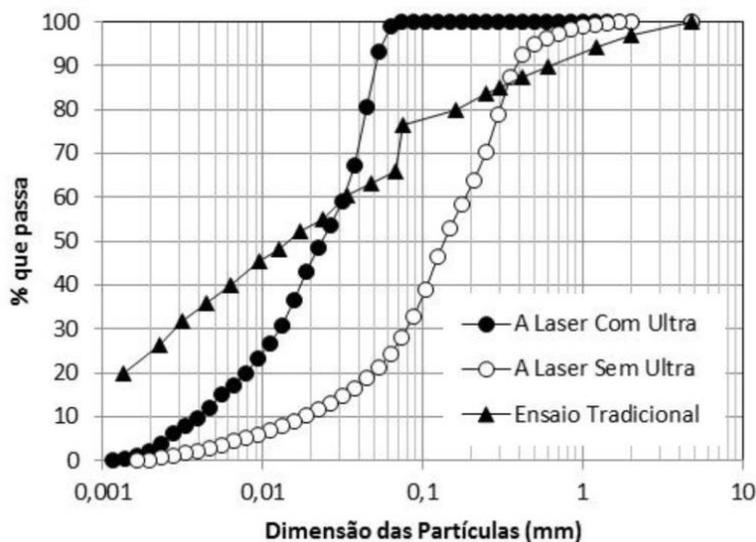


Fig. 6. Curvas de distribuição granulométrica do RETA estudado

A curva obtida por meio de granulômetro a laser com ultrassom mostrou que a quantidade de finos aumentou comparando-se com o método tradicional (pelo menos em uma faixa entre 0,03mm a 1mm), o que indica a existência de agregações no material. Pelo método tradicional, considerando apenas as dimensões das partículas do resíduo, o material seria enquadrado como um silte arenoso (com aproximadamente 41% de silte, 32% de areia, 24% de argila e 3% de pedrisco). Já na classificação por granulômetro a laser sem ultrassom utilizada pelo sistema unificado de classificação dos solos (SUCS), a qual leva em consideração o comportamento plástico, o resíduo é classificado como um silte inorgânico de alta compressibilidade.

Em relação a outros estudos feitos com o RETA, Tilshall e Hughes (2005) encontraram valores semelhantes do resíduo produzido pela Midvaal Water Company, em Londres, no que tange à composição granulométrica, com 37,5% de areia, 33,42% de silte e 29,1% de argila. Outro resultado similar foi encontrado por Oliveira, Machado e Holanda (2004), os quais verificaram que o resíduo proveniente da ETA de Campos de Goytacazes, também apresentou alto teor de materiais pulverulentos, em torno de 45%.

3.1.2. Consistência, plasticidade e atividade

Em relação às propriedades que expressam a consistência plástica do material encontrado no resíduo da ETA Meia Ponte, este foi classificado como silte inorgânico de média plasticidade

conforme o índice de plasticidade $IP = 16\%$. O teor de matéria orgânica encontrado foi de 2,30% e o pH de 6,7. Os resultados dos índices de consistência do lodo e o índice de atividade da fração argila presente no resíduo, os quais estão discriminados na Tabela 6. Ressalta-se que a atividade da argila, medida através do índice de atividade (IA) reporta-se ao comportamento de coesão do material, em função da atividade da fração de argila.

Tab. 6 – Índices de consistência, plasticidade e atividade do RETA

Umidade <i>in situ</i> w (%)	Limite de liquidez w_L (%)	Limite de plasticidade w_P (%)	Índice de plasticidade I_P (%)	Índice de atividade I_a
24,3	56	40	16	0,80

Pela análise da Tabela 5 é possível notar que o teor de umidade (w) do material *in situ* foi de 24,3%, valor esse relativamente alto, mas condizente com materiais de elevados teores de finos, que tem dificuldade de perder água. O índice de plasticidade (IP) de 16% define o material como de plasticidade média, segundo a classificação qualitativa de Oliveira, Machado Holanda (2004), definida para o intervalo de IP entre 10% e 20%. Cabe salientar que quanto maior for o intervalo plástico, ou seja, o valor do IP, mais plástico será o material. Segundo Das (2007), o material é considerado como de atividade normal quando o índice de atividade se situa entre 0,75 a 1,25, inativa quando menor que 0,75 e ativa quando maior que 1,25. Dessa forma, o índice de atividade do material (I_a) dado pela relação entre o IP e a porcentagem de material com dimensão inferior a 0,002 mm (fração argila) foi de 0,80, enquadrando o material como de atividade normal, referente à coesão do resíduo.

O valor de I_P encontrado nessa pesquisa foi próximo ao determinado por Oliveira, Machado e Holanda (2004) e acima do valor encontrado por Tartari et al. (2011), o que evidencia uma certa variação nas características dos resíduos gerados em ETAs em função dos produtos empregados no processo de decantação e da natureza mineralógica dos sedimentos de solo presentes na

água, mostrando a necessidade de uma caracterização ampla para fins de utilização do resíduo como matéria prima para a construção civil.

3.1.3. DRX, MEV e EDS

Aplicando-se a difratometria de raio X em uma amostra do RETA, conforme ilustração da Fig. 8, foi possível observar a presença das fases cristalinas de Haloisita, Caulinita, Quartzo e Muscovita, sendo esses resultados similares aos encontrados por Tartari et al. (2011).

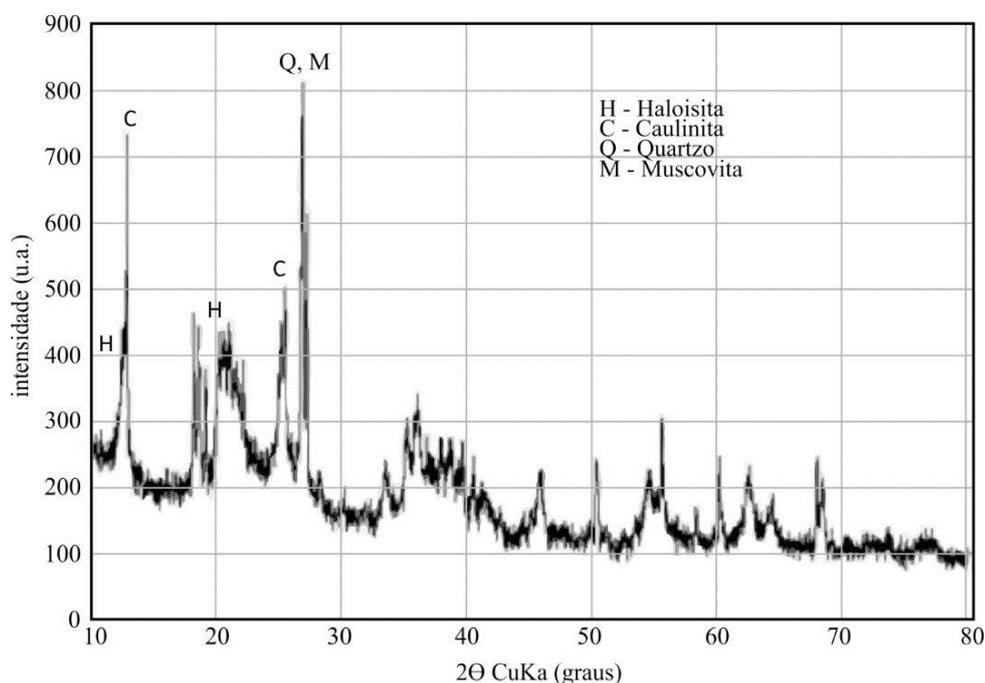


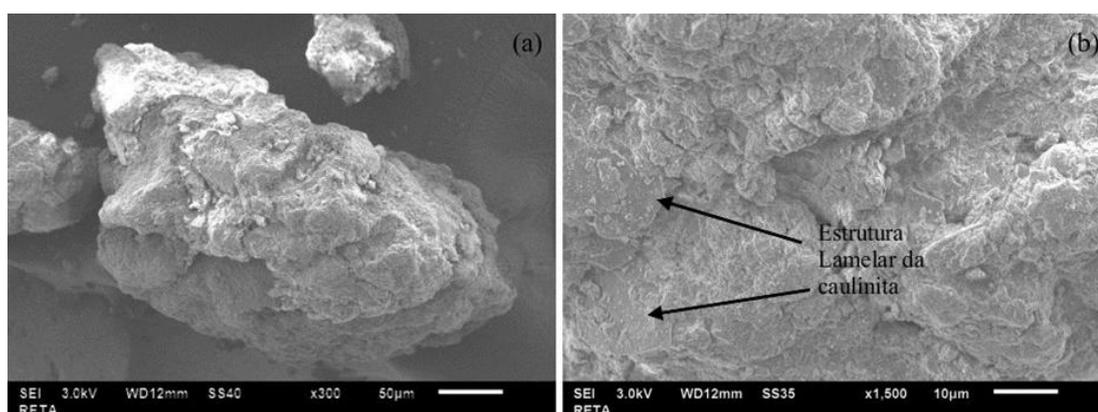
Fig. 7. Difratometria de raios X do RETA

O resultado da composição química feita pelo ED-FRX, expressa em óxidos e apresentado na tabela 7, concede o apoio para análise mineralógica do DRX (Fig. 7). Observa-se que os percentuais dos óxidos Al_2O_3 (40,04%), SiO_2 (37,52%) e Fe_2O_3 (18,25%) são majoritários, e suas proporções coerentes com os compostos na forma de $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ (Caulinita), $\text{Al}_5\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (Haloisita), SiO_2 (Quartzo). Verifica-se a presença em baixa concentração do óxido de alcalinos K_2O (0,70%) existente no composto $\text{KAl}_2\text{Si}_3\text{AlO}_{10}(\text{OH},\text{F})_2$ (Muscovita).

Tab. 7 – Composição química do resíduo em óxidos (%)

Óxidos	RETA GO
Na ₂ O	0,53
MgO	1,02
Al ₂ O ₃	40,04
SiO ₂	37,52
P ₂ O ₅	0,50
SO ₃	0,55
K ₂ O	0,70
CaO	-
TiO ₂	0,89
Fe ₂ O ₃	18,25

Com a execução da Microscopia Eletrônica de Varredura, chegou-se às imagens do RETA com 300 e 1500 vezes de ampliação (Fig. 8), onde é possível constatar a superfície irregular dos grãos presentes e sua forma não esférica, bem como a estrutura lamelar do argilomineral caulinita, muito comum nos solos tropicais.

**Fig. 8.** Imagens do resíduo pelo MEV: (a) ampliação de 300 vezes e (b) 1500 vezes

Em outra imagem gerada pelo MEV, Fig. 9, que ilustra a estrutura morfológica do RETA, é possível notar a presença concentrada de alumínio a partir da análise da microsonda. A hipótese para tal constatação se dá pelo fato de que o sulfato de alumínio é utilizado como

coagulante no tratamento da água bruta, além dos hidróxidos de alumínio presentes nas partículas de solo tropical intemperizado. A análise da microsonda Fig. 9 constata ainda um espectro de raios X, obtido da microanálise por EDS, no qual se vê, em um ponto da amostra, a presença de Al, Si e Fe, além do oxigênio. Isso está de acordo com a análise química apresentada na tabela 7 (em que se identificou alumina, sílica e ferro) estando também coerente com a caracterização mineralógica (DRX), que identificou, principalmente, quartzo, muscovita, caulinita e haloisita.

A espectrometria de absorção atômica permitiu não somente identificar os elementos presentes no RETA, mas também verificar suas proporções, como a presença em grandes parcelas de alumínio e ferro (386.39 e 212.47 mg/kg), conforme a Tabela 8.

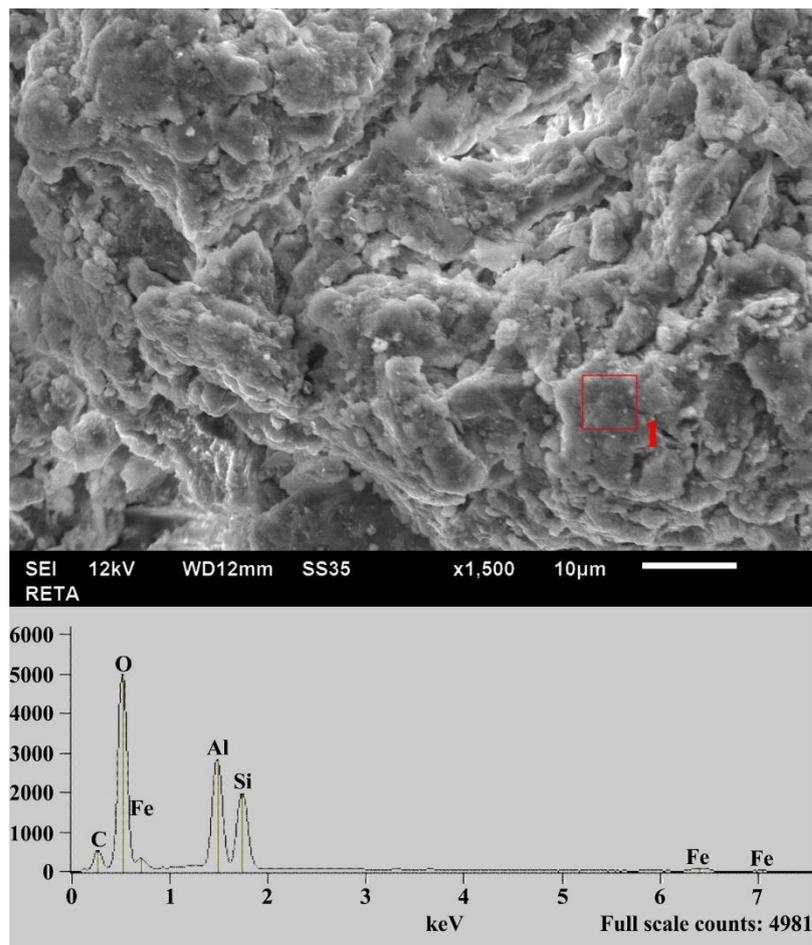


Fig. 9. (a) Micrografia do RETA estudado obtido com MEV; (b) Espectro de composição elemental do RETA obtido com EDS.

Tab. 8 - Resultado da análise da espectrometria de absorção atômica

Elemento	Resultado (mg/kg)	LQ (mg/kg)	Elemento	Resultado (mg/kg)	LQ (mg/kg)
Alumínio	386.39	0.003	Lítio	0.083	0.001
Antimônio	< 0.005	0.005	Magnésio	12.85	0.01
Arsênio	< 0.005	0.005	Manganês	9.132	0.007
Bário	1.291	0.003	Mercúrio	< 0.0002	0.0002
Berílio	0.0019	0.0004	Molibdênio	< 0.007	0.007
Boro	0.497	0.007	Níquel	0.273	0.007
Cádmio	< 0.001	0.001	Potássio	11.449	0.005
Cálcio	14.93	0.01	Prata	< 0.005	0.005
Chumbo	< 0.005	0.005	Selênio	< 0.01	0.01
Cobalto	<0.003	0.003	Sódio	4.19	0.01
Cobre	0.465	0.002	Tálio	< 0.001	0.001
Cromo	< 0.003	0.003	Urânio	< 0.01	0.01
Estrôncio	< 0.001	0.001	Vanádio	< 0.03	0.03
Ferro	212.47	0.01	Zinco	0.18	0.02

*LQ - Limite de quantificação

As concentrações dos elementos químicos reforçam os resultados do ED-FRX da Tabela 7, com as concentrações dos óxidos e dos elementos evidenciados na análise da microsonda (EDS) da Fig. 9, dessa maneira observa-se a maior quantidade de alumínio e ferro.

3.2. Ensaio de Chapelle modificado

O ensaio de verificação da atividade pozolânica, descrito na NBR 15895 (ABNT, 2010), determina o teor de hidróxido de cálcio fixado e é conhecido como método Chapelle modificado, encontrou o resultado de 506 mg Ca(OH)_2 / g de resíduo. Indicando um índice superior ao limite da norma de 436 mg Ca(OH)_2 , sendo 13,8% superior, corroborando seu potencial aproveitamento como adição pozolânica. Porém, apesar dessa atividade pozolânica evidenciada, não se conta com efetivas contribuições desse efeito, em virtude do fato do resíduo não ser incorporado na mistura cimentícia com alta finura, ou seja, no padrão de superfície específica muitas vezes superior àquela típica do cimento Portland, que caracteriza as

superpozolanas capazes de substituir parte do cimento em concretos e argamassas. Como a finura do RETA é relativamente baixa (é mais fino que areia, porém mais grosso do que o cimento), não se tem no efeito pozolânico uma grande expectativa, já que essas reações químicas demandam alta finura (são reações de superfície) para que apresentem altas taxas.

3.3. Resistência à compressão dos pavers

Nos ensaios para aferição da resistência à compressão dos pavers, percebeu-se que a inserção do RETA nos componentes de piso diminuiu a resistência mecânica em função do aumento da quantidade de resíduo adicionado, com exceção do lote com a proporção de 5% adicionados, onde a resistência aumentou quando comparado ao 0%, isto é, aquele que não recebeu RETA. Tal constatação pode ser verificada na Fig. 10.

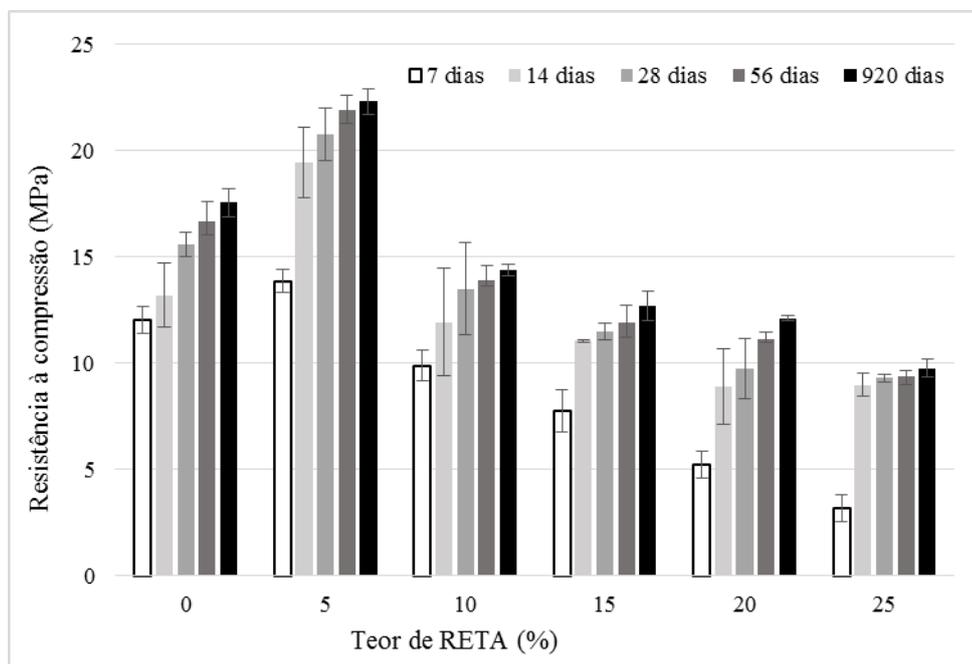


Fig. 10. Resistência à compressão dos Pavers aos 7, 14, 28, 56 e 920 dias de fabricação em função do teor de RETA adicionada em substituição à areia

Pela análise da Fig. 10, fica evidente o ganho de resistência com o passar do tempo, como também o declínio da tensão para os lotes com 10%, 15%, 20% e 25% de RETA em relação aos lotes com 0% e 5%. Quando se comparam esses valores aos relatados por Hoppen *et al.*

(2005), nota-se que houve um aumento de resistência superior a 15% com a inserção de 5% de RETA no mesmo intervalo de tempo analisado, estabelecendo-se assim uma possível tendência para essa proporção de 5% de RETA.

Partindo-se para uma análise estatística de variância (ANOVA), apresentada na Tab. 9, foi possível observar que as variáveis idade e teor de resíduo exercem influências significativas na resistência à compressão, o que também ocorre com a interação dessas variáveis, o que indica haver sinergia, ou seja, o efeito que uma variável exerce isoladamente sobre a resistência sofre influência da outra variável e vice-versa. O modelo foi significativo para todas as variáveis. Salienta-se que essa interpretação se dá quando o valor de F_{val} (valor crítico) for maior que o F_{tab} , e o modelo é aceito como significativo, para um nível de significância de 1%.

Tab. 9 – Resultado da ANOVA realizada para medidas de resistência

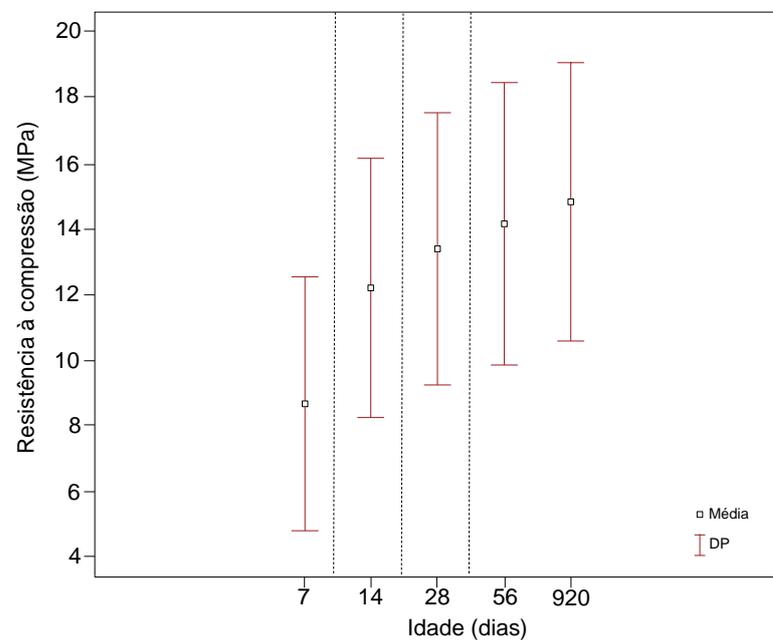
	GL	SQ	MQ	F_{val}	F_{tab}	Resultado	p-value
Modelo	3	1858,2	598,83	39,85	2,758	Significativo	$3 \times 10^{-16}^*$
Idade	4	425,2	106,31	103,29	2,525	Significativo	$2 \times 10^{-16}^{***}$
Teor de resíduo	5	1.328,6	265,73	258,19	2,368	Significativo	$2 \times 10^{-16}^{***}$
Idade * Teor de resíduo	20	42,6	2,13	2,07	1,747	Significativo	0,0159*
Erro (resíduos)	60	61,8	1,03				

Onde:*** é significativo a 0,001; e * é significativo a 0,01. $R^2 = 0.9668$

A partir dos resultados da Tabela 9 e do teste de Duncan (comparação múltipla de médias), o qual consiste em analisar múltiplas amplitudes e comparar com as médias de cada composição, foi estabelecida uma conclusão sobre o efeito da idade na resistência, chegando-se em 4 grupos distintos de resistência, sendo as datas de 7, 14 e 28 dias independentes e com efeitos crescentes na resistência, e as datas posteriores classificadas em um único grupo com resistências semelhantes e superiores às demais. Os grupos formados podem ser observados na Tab. 10 e Fig. 11.

Tab. 10 – Teste de Duncan para resistência analisando-se o efeito da idade

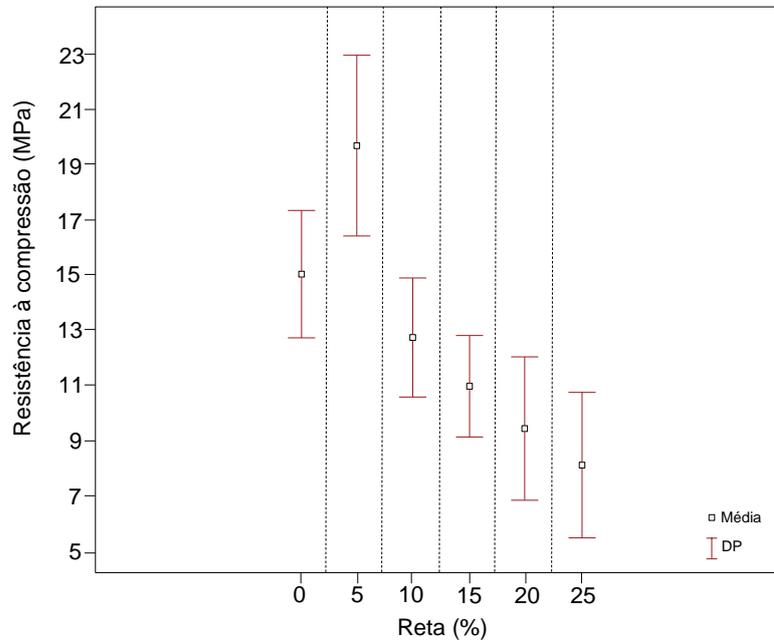
Idade (dias)	Resistência (MPa)	Grupos			
		1	2	3	4
7	8,654	✓			
14	12,254		✓		
28	13,395			✓	
56	14,150				✓
920	14,817				✓

**Fig. 11.** Valores globais de resistência em função da idade

Em relação ao efeito do RETA sobre a resistência à compressão, o teste de Duncan classificou os dados em 6 grupos distintos, como expresso na Tabela 11. Pode-se verificar, na Fig. 12, que a adição de 5% na mistura ocasionou um aumento significativo na resistência à compressão (de 15 MPa para cerca de 20 MPa) enquanto as outras misturas testadas resultaram em decréscimo de resistência em relação à situação de referência. Ressalta-se que, a ANOVA (Tab. 9), o efeito do teor de RETA na resistência à compressão foi mais pronunciado do que o efeito da idade (embora os dois efeitos tenham resultado significativos, estatisticamente), haja vista que o valor de F_{val} para o teor de resíduo foi superior ao valor de F_{val} para a idade.

Tab. 11 – Teste de Duncan para resistência com efeito do RETA

RETA (%)	Resistência (MPa)	Grupos					
		1	2	3	4	5	6
0	15,012	✓					
5	19,668		✓				
10	12,725			✓			
15	10,981				✓		
20	9,415					✓	
25	8,124						✓

**Fig. 12.** Valores globais de resistência em função dos teores de RETA (As linhas pontilhadas demarcam os grupos que são distintos estatisticamente)

3.4. Absorção de água dos Pavers

A NBR 9781 (ABNT, 2013) estabelece que as peças de piso intertravado não podem possuir índice de absorção superior a 6% aos 28 dias. Diante disso, a fim de atender suas exigências, foi executado o ensaio prescrito por ela, e seus resultados médios estão compilados na Figura 13.

Pela análise da Figura 13, pode ser observado que nenhum dos lotes contendo RETA atendeu ao percentual máximo prescrito de absorção, sendo a menor absorção obtida nos lotes com 0% e 5% de RETA, com valores de 4,5% e 7,6%, respectivamente, aos 28 dias de idade. Portanto, só o lote de referência (sem RETA) atendem à essa prescrição. O aumento do resíduo nas composições com 10%, 15%, 20% e 25% resultou no acréscimo da absorção de água, e o percentual mais alto foi na amostra contendo 25% de RETA cuja absorção foi igual a 13,6% a 28 dias. É importante enfatizar que a absorção diminui significativamente com o passar dos dias para todos os casos, atingindo seu valor mínimo aos 920 dias. Infere-se que a redução da absorção de água ao longo das idades das peças acontece pela contínua hidratação do cimento residual do concreto, dado o seu processo de cura, que leva à consolidação da pasta de cimento e à redução da porosidade da estrutura interna do concreto.

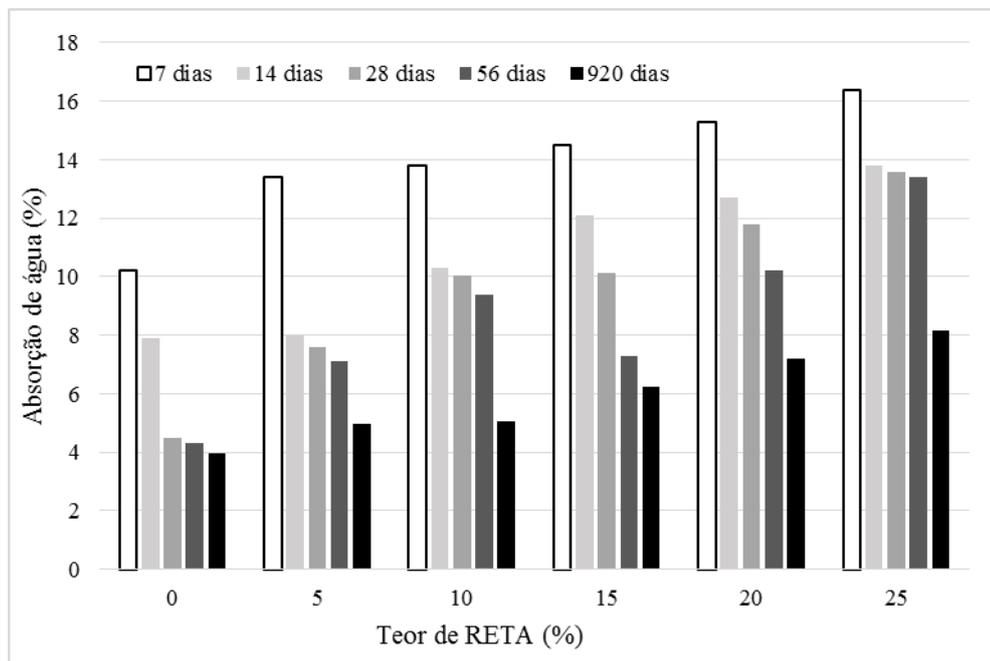


Fig. 13. Absorção de água média dos pavers em função do teor de RETA

Com a realização da análise estatística por meio da ANOVA, em relação às medidas de absorção, chegou-se aos resultados expostos na Tab. 12, onde as variáveis idade, teor de resíduo e a sua interação foram significativas, com maior influência para a idade.

Tab. 12 – Resultado da ANOVA realizada para medidas de absorção

	GL	SQ	MQ	F _{val}	F _{tab}	Resultado	p-value
Modelo	3	1134,2	373,50	67,21	2,758	Significativo	$2 \times 10^{-22***}$
Idade	4	626,1	156,51	687,03	2,525	Significativo	$2 \times 10^{-16***}$
Teor de resíduo	5	435,0	87,00	381,90	2,368	Significativo	$2 \times 10^{-16***}$
Idade * Teor de resíduo	20	59,4	2,97	13,05	1,747	Significativo	$5 \times 10^{-15***}$
Erro (resíduos)	60	13,7	0,23				

Onde: *** é significativo a 0,001. R² = 0,9879 e Ra = 0,9821

Na comparação múltipla de médias pelo teste de Duncan, todas as idades foram classificadas em grupos estatisticamente diferentes, sendo observado, em todos casos, a diminuição da absorção com a idade do concreto, conforme Tabela 13 e Figura 14.

Tab. 13 – Teste de Duncan para absorção analisando-se o efeito da idade

Idade (dias)	Absorção (%)	Grupos				
		1	2	3	4	5
7	13,933	✓				
14	10,800		✓			
28	9,577			✓		
56	8,600				✓	
920	5,899					✓

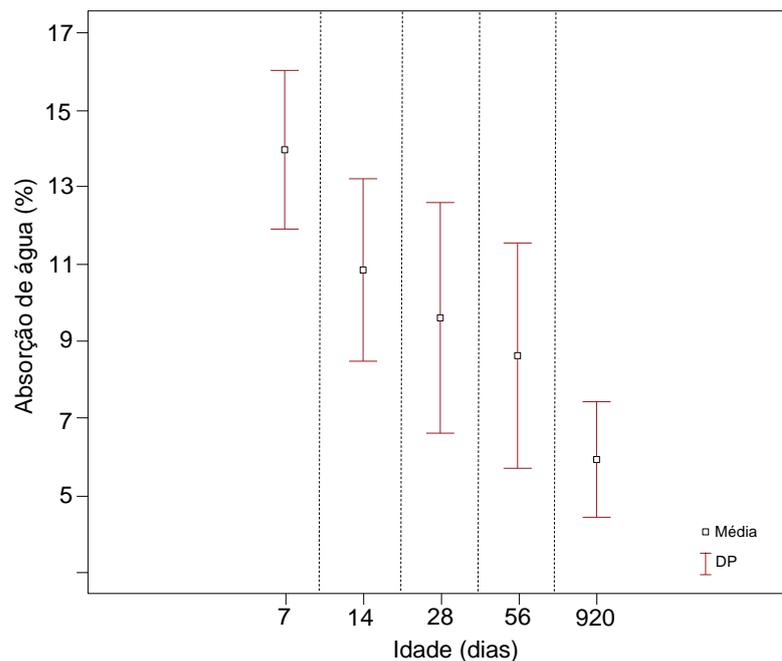
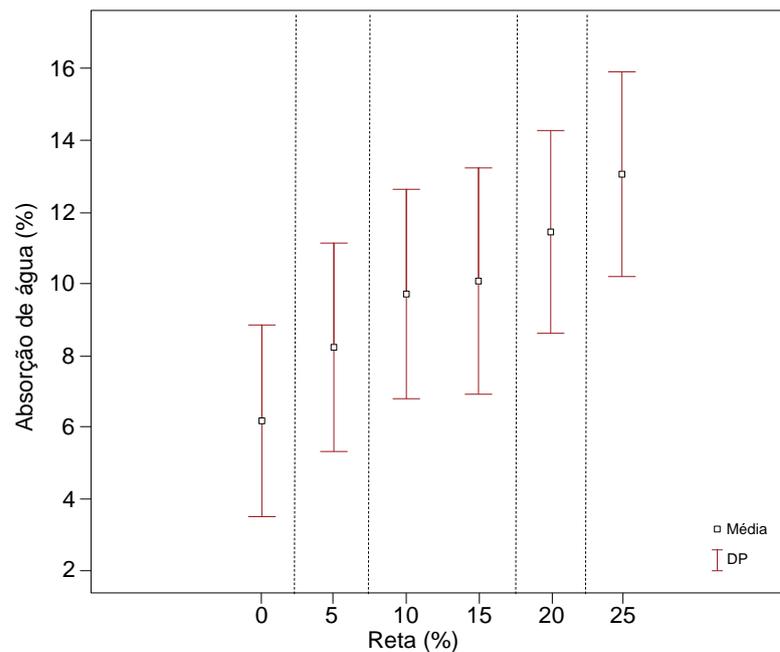


Fig. 14. Valores globais de absorção em função da idade

Quanto ao efeito dos teores de resíduo, cuja influência na absorção foi significativa pela ANOVA, o teste de Duncan agrupou os teores de 10% e 15% em um único grupo, sendo os demais associados em grupos distintos, conforme resultado exposto na Tabela 14 e Figura 15.

Tab. 14 – Teste de Duncan para absorção com efeito do RETA

RETA (%)	Absorção (%)	Grupos				
		1	2	3	4	5
0	6,152	✓				
5	8,213		✓			
10	9,706			✓		
15	10,040			✓		
20	11,420				✓	
25	13,040					✓

**Fig. 15.** Valores globais de absorção em função dos teores de RETA

De modo geral (exceto nos teores de 10% e 15% de RETA), a incorporação do resíduo no traço do concreto, de forma crescente, implica no aumento da absorção de água. A adição de mais um insumo, de composição mineralógica variada como é o caso do RETA, introduz heterogeneidades na mistura. Certamente o prejuízo que se teve na trabalhabilidade da mistura,

trouxe à microestrutura do material com RETA uma maior porosidade, que interferiu nos resultados de absorção e de resistência mecânica.

3.5. Correlação entre resistência à compressão e absorção nos pavers

Analisando-se a relação entre a absorção de água dos pavers e sua resistência à compressão, percebe-se que a amostra com 5% de RETA na composição, comparando-se com o controle, sofre um significativo acréscimo (25,10%) quanto à tensão de ruptura, com posterior declínio progressivo, enquanto a absorção sofre um aumento progressivo passando por todas as composições. Diante disso, infere-se que se tem uma tendência inversamente proporcional entre essas duas propriedades à medida que se aumenta a substituição dos agregados pelo resíduo, como pode ser observado na **Fig. 16**.

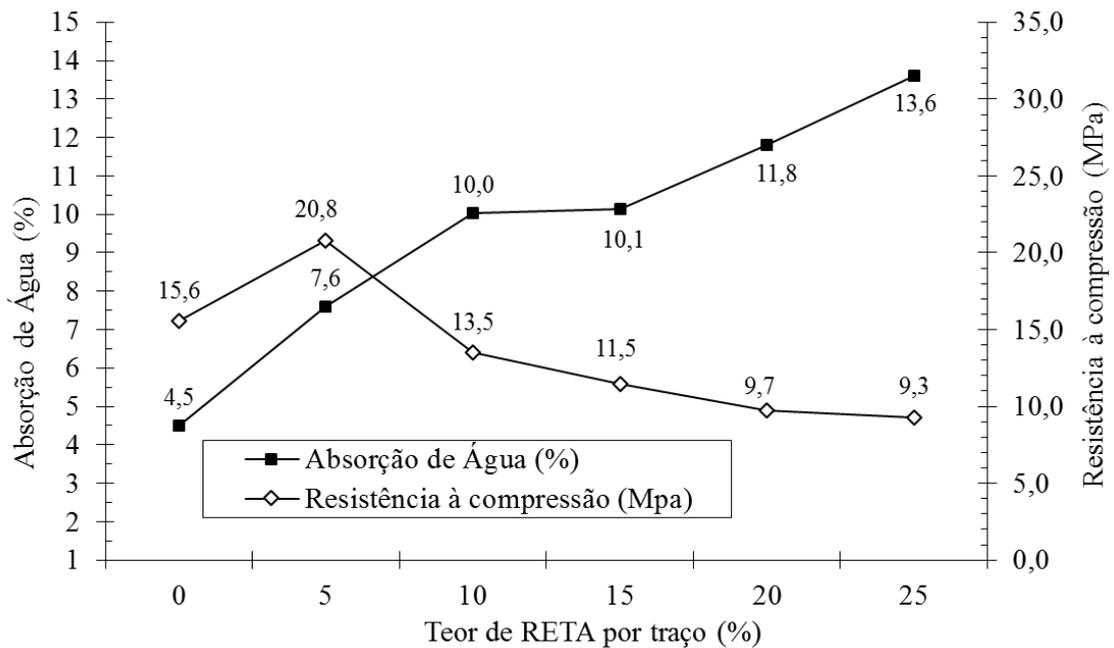


Fig. 16. Relação entre absorção de água e resistência à compressão aos 28 dias dos pavers

Efetuada-se uma correlação entre essas duas variáveis, chegou-se em um coeficiente de determinação (R^2) de aproximadamente 60%, o que evidencia que há uma relação inversa razoável entre as duas propriedades, como ilustrado na **Fig. 17**.

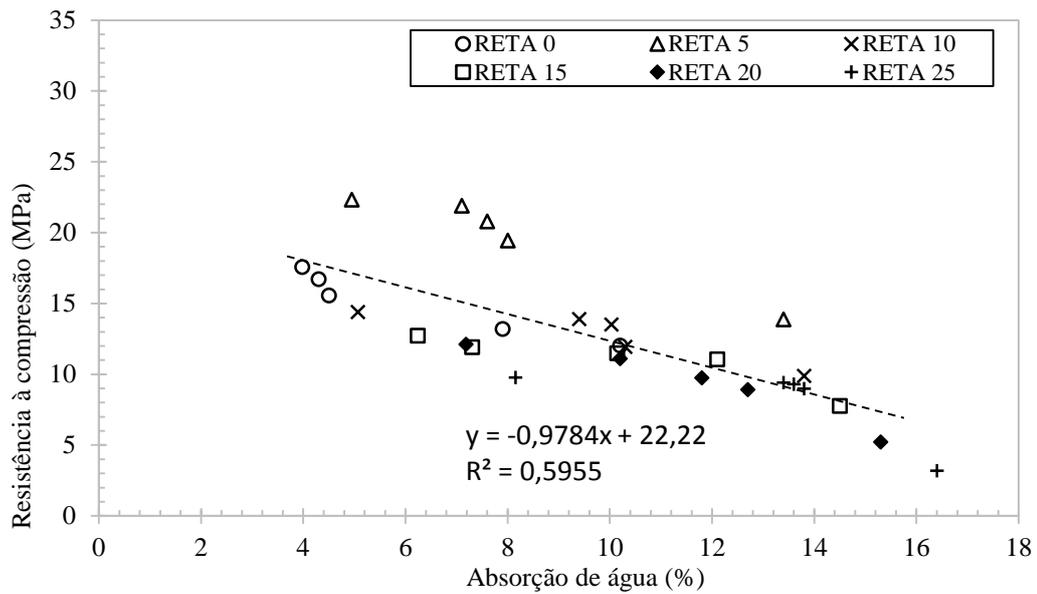


Fig. 17. Correlação entre a resistência à compressão e a absorção de água considerando os dados de todas as idades

Exceto para a resistência com a mistura contendo 5% de RETA, na qual a resistência cresce, em geral o comportamento é de queda na resistência e de acréscimo na absorção, conforme se aumenta o teor de resíduo na mistura. Como discutido anteriormente, uma microestrutura mais heterogênea e com claros prejuízos reológicos, quando da incorporação de teores cada vez maiores de RETA, implicando assim em maior porosidade, são alguns argumentos plausíveis para explicar esses comportamentos. A relação inversa entre resistência e absorção é esperada haja vista que aumentos da porosidade implicam em redução da resistência mecânica e, por outro lado, significam aumentos da absorção de água (tendo em vista o acréscimo do índice de vazios).

A melhoria da resistência com 5% de RETA pode ter sua fundamentação em alguma eventual melhoria da zona de transição pasta-agregado, dado o efeito da fração fina do RETA nessa interface. Para teores acima de 5%, o prejuízo reológico preponderou sobre esse eventual benefício da zona de transição, uma vez que volumes de poros significativamente maiores foram introduzidos nas misturas, em função do aumento da relação água/ cimento na medida que se ampliava a quantidade de resíduos nas amostras.

3.6. Ensaio acelerado de durabilidade - Ciclos de molhagem e secagem

Com o intuito de se verificar a superfície dos blocos em relação ao desgaste devido ao uso e intempéries, foram executados 12 ciclos de molhagem e secagem em todas as composições dos pisos aos 920 dias.

Como resultado, não foram observadas alterações, como fissuras ou manchas de eflorescências, o que indica que não ocorreram reações químicas prejudiciais ao concreto no período testado.

A aparência dos pavers depois de diferentes ciclos está ilustrada pela **Fig. 18**.

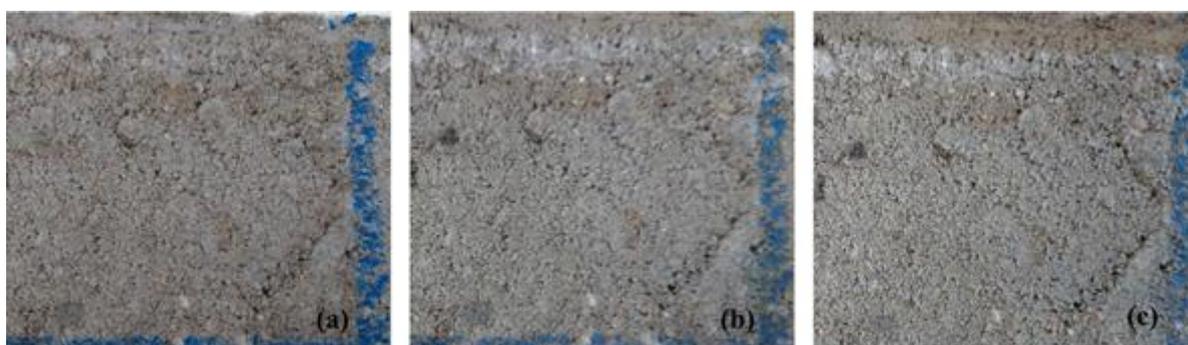


Fig. 18. Imagem em detalhe de uma peça da composição com 5% de RETA durante os ciclos de molhagem e secagem: a) Início do 1º ciclo; b) Início do 6º ciclo; c) Final do 12º ciclo

Ao final do último ciclo as peças foram submetidas ao ensaio de resistência à compressão, e, conforme a Fig. 19, a resistência diminuiu em comparação às peças que não passaram pelo ciclo. Contrariamente, as peças com 5% de RETA mantiveram tensão de ruptura sempre maior que as demais composições com RETA e amostra de controle, indicando ser esse um valor ótimo de substituição em relação a essa propriedade.

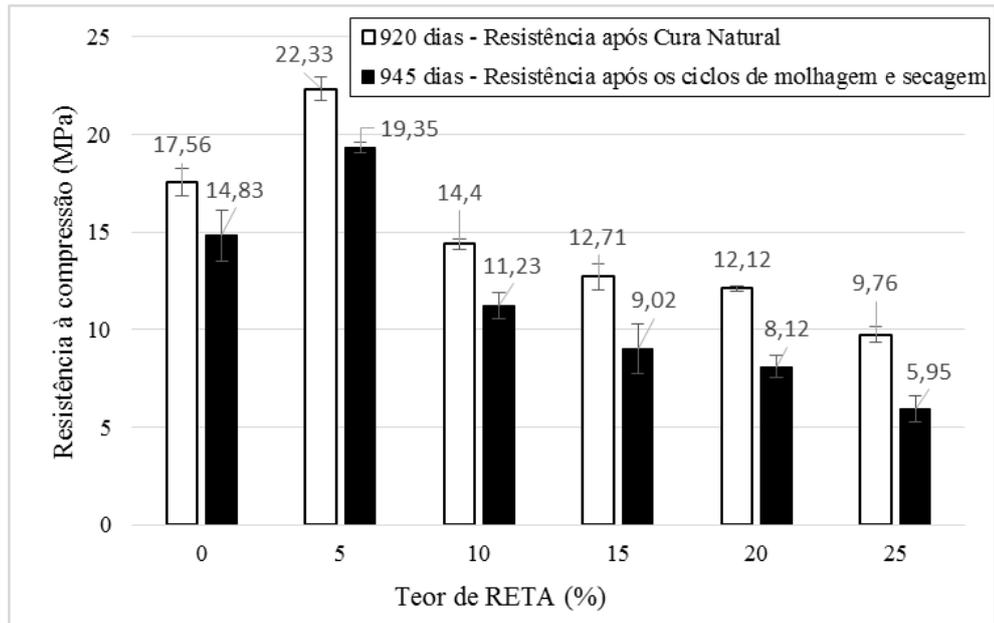


Fig. 19. Gráfico comparativo entre a resistência com cura natural aos 920 dias e a resistência após os 12 ciclos de molhagem e secagem, aos 945 dias

Em relação aos ensaios de absorção, observou-se que ocorreram aumentos progressivos nas composições, sendo novamente a amostra com 5% de RETA a que obteve menor absorção dentre as demais composições e até mesmo em relação à amostra de controle, como exposto Fig. 20.

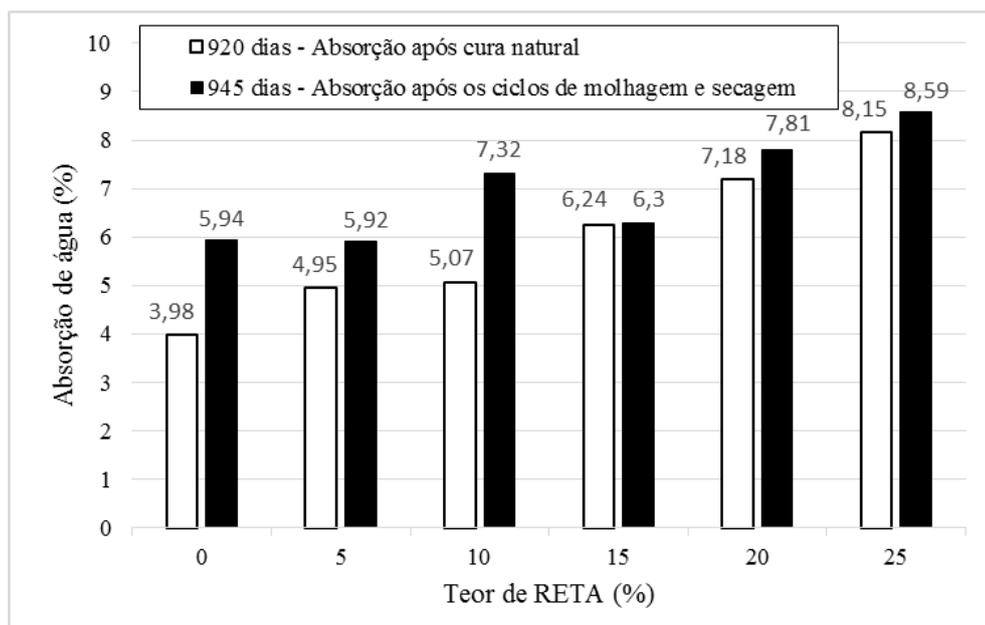


Fig. 20. Gráfico comparativo entre absorção de água com cura natural aos 920 dias e após os 12 ciclos de molhagem e secagem, aos 945 dias

Muito provavelmente, a queda na resistência e o aumento na absorção para os corpos de prova que passaram pelos 12 ciclos de molhagem e secagem (em comparação àqueles de cura natural) se deveram a ações físicas de expansão e contração (de natureza higro-térmica), que levaram a uma microfissuração (na maioria das vezes imperceptível). Não se exclui, também, alguma instabilidade volumétrica decorrente do balanço hídrico nas misturas com RETA, que possui argilominerais em sua composição. Os argilominerais (in natura) sofrem variação dimensional com a presença (ou ausência) de umidade, em função de suas estruturas na forma de folhas ou camadas. Consoante os ciclos de molhagem e secagem, essas variações dimensionais podem ser potencializadas.

Não houve indicativo de ações de natureza química nos 12 ciclos executados.

Posteriormente aos 1310 dias, as amostras de controle (0%) e com 5% de resíduo, foram submetidas a 12 ciclos de molhagem e secagem para comparação dos resultados dos ciclos anteriores, com idade de 920 dias.

A repetição dos ensaios de resistência à compressão das amostras com 0% e 5% de resíduo, aos 1310 dias de idade, evidenciam um pequeno acréscimo na resistência, com relação à idade de 920 dias. Sendo que na amostra de controle, a resistência à compressão subiu 1,53% e na amostra contendo 5% de resíduo o aumento foi de 1,43%, conforme o gráfico da Figura 21.

Após os ciclos, aos 1322 dias de idade, ocorreu a diminuição da resistência à compressão, comparando-se aos resultados anteriores aos ciclos (1310 dias), sendo que para a amostra de controle a redução foi de 12,84% e na amostra com 5% de resíduo a diminuição foi de 14,35%.

Porém, ocorreu aumento de resistência, 4,56% e 1%, nas amostras de 0% e 5% respectivamente, entre as idades de 945 e 1322 dias, após os ciclos de molhagem e secagem.

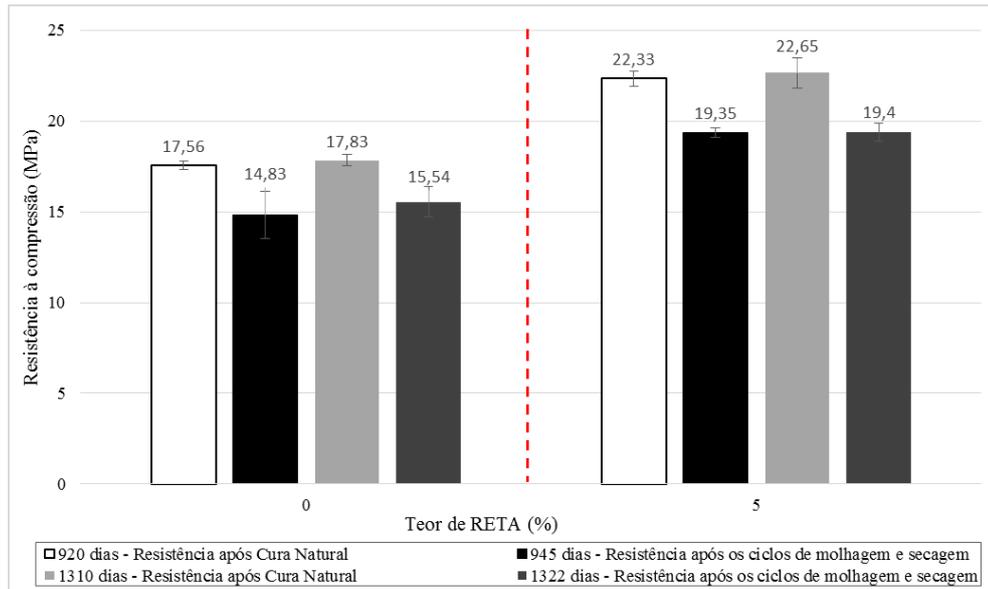


Fig. 21. Gráfico comparativo entre resistência à compressão das amostras com 0 e 5% de resíduo, com cura natural aos 920 e 1310 dias e após os 12 ciclos de molhagem e secagem, aos 945 e 1322 dias de idade dos pisos

Os resultados do ensaio de absorção de água antes dos ciclos de molhagem e secagem (920 e 1310 dias) e após (945 e 1322 dias), são apresentados na Figura 22 e observa-se a redução de 4,02% e 1,01% da absorção de água aos 1310 dias em comparação aos 920 dias, nas amostras de 0 e 5% respectivamente, com cura natural.

Aos 1322 dias, após os 12 ciclos, ocorreu aumento na absorção de água de 35,25% e 15,22%, nas amostras de 0% e 5% de resíduo respectivamente, em comparação aos resultados aos 1310 dias de idade. Contudo foi observado a redução de 0,6% e 2,3%, nas absorções da amostra de controle e amostra contendo 5% de resíduo respectivamente, entre as idades de 945 e 1322.

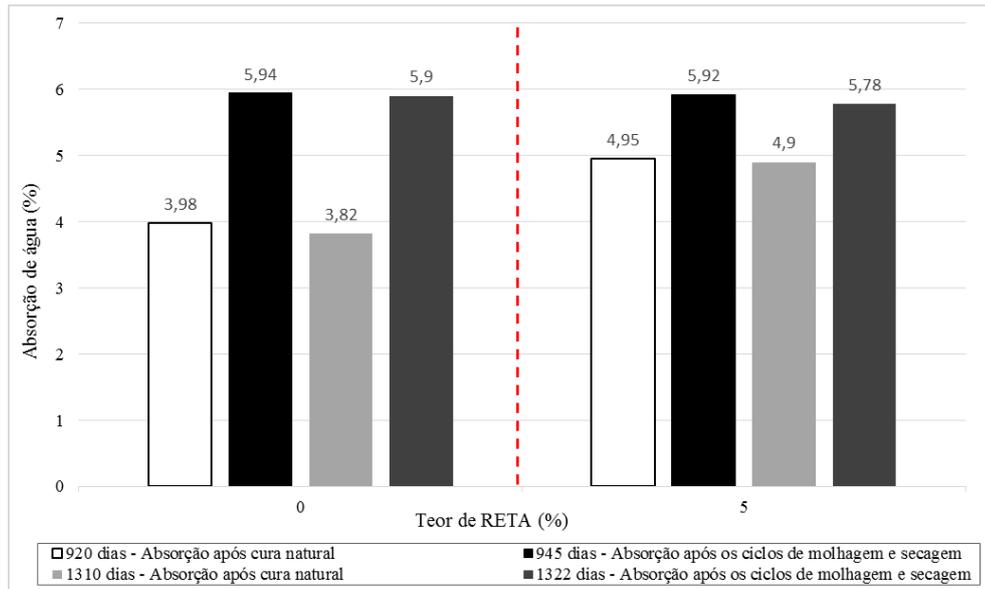


Fig. 22. Gráfico comparativo entre absorção de água com cura natural aos 920 e 1310 dias e após os 12 ciclos de molhagem e secagem, aos 945 e 1322 dias de idade dos pisos

Após os ciclos de molhagem e secagem aos 1322 dias de idade, verificou-se que ocorreu a redução da resistência de ruptura das amostras de 0% e 5% de resíduo, bem como o aumento na absorção de água, porém essas características foram observadas após os 12 ciclos, aos 945 dias, fatores que podem ser atribuídos aos argilominerais presentes na composição do resíduo, bem como as variações volumétricas dos pisos, em consequência dos ciclos de molhagem e secagem acelerados, que poderiam provocar microfissurações internas, e consequentemente ampliar a absorção de água e redução da resistência mecânica dos pisos, conforme suposição levantada aos 945 dias.

4. CONCLUSÕES

Após os resultados obtidos, conforme a metodologia adotada nos experimentos, conclui-se que o resíduo possui 24,26% da composição granulométrica semelhantes com as partículas do agregado natural areia, referentes às faixas de abertura das peneiras entre 2,0mm e 0,075mm, utilizada nas composições de peças de concreto como agregado miúdo. No entanto a composição granulométrica evidencia que existe um maior percentual de material fino

(pulverulento) resultando em 75,74% com dimensão abaixo de 0,075mm, ante 1,1% do agregado areia, tradicionalmente utilizado.

A caracterização química do resíduo evidenciou a elevada concentração de alumínio, ocorrida provavelmente pela agregação do coagulante utilizado no processo de tratamento da água; Constatou-se também a concentração dos óxidos: Al_2O_3 , SiO_2 e Fe_2O_3 , que podem contribuir para as atividade pozolânica do material.

O resultado do ensaio de Chapelle modificado demonstrou que o índice de atividade pozolânica indicou um aumento de 13,8% com relação ao limite da norma. No entanto a contribuição da atividade pozolânica do resíduo não pode ser comprovada, devido sua superfície específica ser menor que a do cimento, que possui alta finura.

A influência da inserção do RETA é significativa nas propriedades analisadas. Foram observadas diferenças relevantes entre as amostras, na medida em que se ampliava a inserção do resíduo. De maneira geral, os resultados revelam que as amostras contendo 5% de RETA melhoraram a propriedade de resistência das peças, porém a absorção de água aumentou, no sentido em que ocorreu o seu aumento, em todas as amostras com resíduo. Supõe-se que a reatividade da parcela de resíduo (5%) contribuiu na melhora da resistência mecânica das peças, porém a alta quantidade de partículas miúdas interferiu na retenção de água da pasta de cimento, ocasionando o aumento da absorção de água das peças curadas.

A aplicação do RETA afetou significativamente as propriedades mecânicas e, conseqüentemente, influenciou a durabilidade das peças estudadas. Essa relação de influência é reforçada pelos resultados das amostras que contem maiores quantidade de RETA, ressalta-se que o elevado teor de finos do material, interfere na pasta de cimento, pois aumenta a retenção de água e altera a reação de hidratação do cimento. O que explica o aumento progressivo da

relação água/ cimento das amostras com mais resíduos, provocando a ampliação das conexões dos poros do concreto e por consequência elevando a absorção de água.

Conforme a análise estatística, os resultados da tensão de ruptura e absorção de água são mais influenciados pelo acréscimo de RETA, de acordo com os parâmetros do $F_{calculado}$. O parâmetro estatístico relacionado à idade interfere de maneira positiva, aumentando a tensão de ruptura e reduzindo a absorção de água.

Dessa maneira, para sua aplicação do resíduo, recomenda-se a utilização com limite de 5% em substituição ao agregado miúdo do concreto. Ressalta-se porém, que deverão ser observados, nos aspectos normativos, a referência quanto ao limite máximo de absorção de água, seja em concretos ou artefatos, com limite não superior à 8% de absorção de água aos 28 dias de idade.

REFERÊNCIAS

- Aggarwal, Y., Siddique, R., 2014. Microstructures and properties of concrete using bottom ash and waste foundry sand as partial replacement of fine aggregates. *Constr. Build. Mater.* 54, 2010-223.
- Aliabdo, A.A., Abd-Elmoaty, A.E.M., Hassan, H.H., 2014. Utilization of crushed clay brick in cellular concrete production. *Alexandria Eng. J.* 53, 119-130.
- Asensio, E., Medina, C., Frías, M., de Rojas, M.I.S., 2016. Characterization of Ceramic-based Construction and Demolition Waste: Use as Pozzolan in Cements. *J. Am. Ceram. Soc.* 99 (12), 4121-4127.
- Bravo, M., de Brito, J., Pontes, J., Evangelista, L., 2015. Mechanical performance of concrete made with aggregates. *J. Clean. Prod.* 99, 59-74.
- Contreras, M., Teixeira, S.R., Lucas, M.C., Lima, L.C.N., Cardoso, D.S.L., da Silva, G.A.C., Gregório, G.C., de Souza, A.E., dos Santos, A., 2016. A Recycling of construction and demolition waste for producing new construction material (Brazil case-study). *Constr. Build. Mater.* 123, 594–600.
- DAS, B.M., *Fundamentos de Engenharia Geotécnica*. 6ª Ed., Thomson Learning, S. Paulo, SP (2007) 562.
- Frias, M., la Villa, R.V., Garcia, R., de Rojas, M.I.S., Baloa, T.A., 2013. Mineralogical evolution of Kaolin-based drinking water treatment waste for use as pozzolanic material. The Effect of Activation Temperature. *J. Am. Ceram. Soc.* 96, 3188-3195.
- Gómez-Meijide, B., Pérez, I., Pasandín, A.R., 2016. Recycled construction and demolition waste in Cold Asphalt Mixtures: evolutionary properties. *J. Clean. Prod.* 112, 588-598.

- Lee, Y.C., Lo, S.L., Kuo, J., Tsai, C.C., 2012. Beneficial uses of sludge from water purification plants in concrete mix. *Environ. Eng. Sci.* 29 (4), 284-289.
- Mymrin, V.A., Alekseev, K. P., Catai, R.E., Izzo, R.L.S., Rose, J.L., Nagalli, A., Romano, C.A., 2015. Construction material from construction and demolition debris and lime production wastes. *Constr. Build. Mater.* 79, 207–213.
- Ossa, A., García, J.L., Botero, E., 2016. Use of recycled construction and demolition waste (CDW) aggregates: A sustainable alternative for the pavement construction industry. *J. Clean. Prod.* 135, 379-386.
- Poon, C.S., Chan, D., 2006. Paving blocks made with recycled concrete aggregate and crushed clay brick. *Constr. Build. Mater.* 20, 569-577.
- Poon, C.S., Lam, C.S., 2008. The effect of aggregate-to-cement ratio and types of aggregates on the properties of pre-cast concrete blocks. *Cem. Concr. Compos.* 30, 283-289.
- Xuan, D.X., Molenaar, A.A.A., Houben, L.J.M., 2015. Evaluation of cement treatment of reclaimed construction and demolition waste as road bases. *J. Clean. Prod.* 100, 77-83.
- Yen, C.L., Tseng, D.H., Lin, T.T., 2011. Characterization of eco-cement paste produced from waste sludges. *Chemosphere.* 84, 220-226.
- Moreira, R.C.A., Guimarães, E.M., Boaventura, G.R., Momesso, A.L., Lima, G.L., 2009. Estudos geoquímicos da disposição de lodo de estação de tratamento de água em área degradada. *Quim. Nova.* 32 (8), 2085-2093.
- OLIVEIRA, E. M. S.; MACHADO, S. Q.; HOLANDA, J. N. F. Caracterização de resíduo (lodo) proveniente de estação de tratamento de águas visando sua utilização em cerâmica vermelha. *Cerâmica*, São Paulo, v. 50, n. 316, Dec. 2004 . <http://dx.doi.org/10.1590/S0366-69132004000400007>.
- TARTARI, R.; DIAZ-MORA, N.; MODENES, A. N.; PIANARO, S. A.. Lodo gerado na estação de tratamento de água Tamanduá, Foz do Iguaçu, PR, como aditivo em argilas para cerâmica vermelha: Parte I: caracterização do lodo e de argilas do terceiro planalto paranaense. *Cerâmica*, São Paulo , v. 57, n. 343, Sept. 2011. <http://dx.doi.org/10.1590/S0366-69132011000300006>.
- TITSHALL, L. W., HUGHES, J. C. Characterisation of some South African water treatment residues and implications for land application. *Water SA*, v. 31, n. 3 - July, South Africa, 2005, 299-308 p.

CAPÍTULO 3 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo são apresentadas as considerações finais da pesquisa. Assim, com os dados obtidos na fase experimental do trabalho, apresenta-se as conclusões e sugestões de possíveis diretrizes que poderão ser pesquisadas em outros trabalhos.

3.1. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos conduziram para duas linhas de conclusões distintas: as caracterizações física, química e mineralógica do resíduo e a parte experimental utilizando o RETA para produção de componente de piso de concreto intertravado, tipo paver.

3.1.1. Caracterização Física, Química e Mineralógica do resíduo

A caracterização do RETA permitiu conhecer suas composições física, química e mineralógica e, dessa maneira, perceber as potencialidades de sua utilização.

Por meio do DRX, observou-se a presença das fases cristalinas de haloisita, caulinita, quartzo e muscovita. O resultado do ED-FRX apoia a presença dos compostos e apresenta as proporções dos óxidos: Al_2O_3 (40,04%), SiO_2 (37,52%) e Fe_2O_3 (18,25%). Os resultados da microsonda (EDS) e da Espectrometria de Absorção Atômica (EAA) também demonstram, respectivamente, as proporções elevadas dos elementos com os picos cristalinos de Al, Si, e Fe e concentração de Alumínio (386,39 mg/kg) de Ferro (212,47mg/kg).

A caracterização granulométrica revelou elevado percentual de matéria fina, com 75% dos grãos com diâmetro abaixo de 0,075mm, porém observou-se uma quantidade de 24,26% com tamanho entre 2,0mm à 0,075mm, característica similar ao agregado miúdo (areia) utilizado em concretos.

Dessa forma observou-se as possibilidades de aplicação do resíduo de acordo com suas características e comparações com as matérias primas empregadas em diversos materiais de construção.

3.1.2. Piso de concreto Intertravado Tipo Paver Produzidos com RETA

Foi definido o piso de concreto para desenvolvimento da parte experimental devido ao percentual de resíduo (24,26%) compatível com os agregados miúdos utilizados em concreto, e a proporção de areia encontrado nos ensaios de granulometria.

Verificou-se, com as análises, que a inserção do resíduo ocasionou sensíveis alterações no comportamento mecânico das peças cimentícias quando comparadas à amostra de controle.

A composição com 5% de resíduo aos 28 dias de idade (e posteriores) obteve melhora no resultado de tensão de ruptura, 33,5% maior, em comparação a amostra de controle na mesma idade, com resistência de 20,79 Mpa, ante 15,57MPa da amostra sem resíduo, porém para o resultado de absorção de água observou-se uma influência negativa em todas as composições com resíduo, pois elas foram superiores em relação à composição sem resíduos.

O progressivo aumento na quantidade de resíduos nas amostras, amplia a quantidade de finos da massa de concreto e conseqüentemente faz-se necessário o aumento de água da mistura, devido a retenção de líquido, elevando-se a relação água/ cimento, o que influencia a resistência mecânica e absorção de água das amostras, resultando na redução da durabilidade, pela ampliação da rede de poros do concreto, conforme a Lei de Abrams.

Assim, pode-se indicar a aplicação do resíduo gerado no sistema de tratamento de água do rio Meia Ponte em elementos cimentícios, no entanto, como a presença de finos é significativa (76%), recomenda-se sua utilização em no máximo 5% de inserção, pois quantidades superiores podem promover a retenção de água, o que influencia na hidratação do cimento e conseqüentemente na durabilidade das peças de concreto.

3.2. SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

Verificou-se a possibilidade de aprofundamento na temática, a qual pode ser realizada em trabalhos posteriores:

- com a presença em elevada concentração de alumínio no resíduo, vislumbra-se a potencialidade de aplicação em elementos que utilizam a queima em seu processo de produção, o que pode contribuir para o aumento da resistência mecânica. Bem como aplicação para produção de materiais refratários;

- como o sulfato de alumínio é utilizado no processo de potabilização da água, este pode estar presentes nos resíduos, percebendo-se assim a necessidade de aprofundamento nos ensaios de durabilidade de elementos cimentícios, pois os sulfatos podem reagir com o C₃A (aluminato tricálcico) do cimento dessas peças, ocasionando-se a formação de etringita tardia, o que gera expansão, fissuração, e conseqüentemente, patologias nesses elementos.

- o resíduo foi utilizado como matéria prima em outras aplicações, como revestimento de argamassa e obteve resultados satisfatórios, atendendo aos aspectos normativos, porém não foi avaliada a sua durabilidade, que pode ser estudada em uma etapa futura.

REFERÊNCIAS

- ALBUQUERQUE, L. Q. C.; BISCARO, S. R. L. N.; OLIVEIRA, A. C.; CARVALHO, L. A.; LEAL, S. T. **Resistência à compressão de tijolos de solo-cimento fabricados com o montículo do cupim *Cornitermes cumulans* (Kollar, 1832)**. Ciênc. Agrotec. Lavras, v. 32, n. 2, p. 553-560, Apr. 2008. <http://dx.doi.org/10.1590/S1413-70542008000200032>.
- ARAUJO, E. C.; DIAS, F. M. **Massa específica e absorção de água de concretos manufaturados com agregados alternativos**. Rev. IBRACON Estrut. Mater. São Paulo, v. 4, n. 5, p. 764-783, Dec. 2011. <http://dx.doi.org/10.1590/S1983-41952011000500005>.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 5733: Cimento Portland de alta resistência inicial**. Rio de Janeiro, 1991.
- _____. **NBR 6459: Solo - Determinação do limite de liquidez**. Rio de Janeiro, 1984.
- _____. **NBR 7180: Solo - Determinação do limite de plasticidade- Procedimento**. Rio de Janeiro, 2016.
- _____. **NBR 7181: Solo - Análise granulométrica**. Rio de Janeiro, 2016.
- _____. **NBR 7211: Agregados para concreto - Especificação**. Rio de Janeiro, 2009.
- _____. **NBR 10004: Resíduos Sólidos - Classificação**. Rio de Janeiro, 2004.
- _____. **NBR 10005: Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólido**. Rio de Janeiro, 2004.
- _____. **NBR 10006: Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos**. Rio de Janeiro, 2004.
- _____. **NBR 11578: Cimento Portland composto - Especificação**. Rio de Janeiro, 1991.
- _____. **NBR 13554: Solo-cimento — Ensaio de durabilidade por molhagem e secagem — Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 2012.
- _____. **NBR 14339: Água - Determinação de pH - Método eletrométrico**. Rio de Janeiro, 1999.
- _____. **NBR 16097: Solo — Determinação do teor de umidade — Métodos expeditos de ensaio**. Rio de Janeiro, 2012.
- _____. **NM 52: Agregado miúdo - Determinação de massa específica e massa específica aparente**. Rio de Janeiro, 2009.
- _____. **NM 248: Agregados - Determinação da composição granulométrica**. Rio de Janeiro, 2003.
- APHA. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**, 21 ed., 2005.
- AYRES, R.M.; MARA, D.D. (1996). **Analysis of wastewater for use in agriculture**. World Health Organization. Geneva, 1996.
- BARROS, J. D. **As ciências sociais e os modelos de cidade**. Rev. Arquitetura Revista. Rio de Janeiro, v. 7, n. 1, jun. 2011. doi:10.4013/arq.2011.71.03

BOTERO, W. G.; SANTOS, A.; OLIVEIRA, L. C.; ROCHA, J.C.; **Caracterização de Lodo Gerado em Estações de Tratamento de Água: perspectivas de aplicação agrícola.** Quim. Nova, Vol. 32, n. 8, 2018-2022, 2009

BRASIL. Casa Civil. **Lei nº 11.445 de 05 de janeiro de 2007. Estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico.** Diário Oficial (da) República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 2007.

BRASIL. Casa Civil. **Lei nº 12.305 de 02 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos.** Diário Oficial (da) República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 2010.

BRASIL. Ministério da Saúde. **Portaria nº 2.914 de 12 de dezembro de 2011. Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade.** Diário Oficial (da) República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 2011.

CALIL, P. M.; OLIVEIRA L. F. C.; KLIEMANN, H. J.; OLIVEIRA V. A. **Caracterização geomorfométrica e do uso do solo da Bacia Hidrográfica do Alto Meia Ponte, Goiás.** Rev. bras. eng. agríc. ambient., Campina Grande, vol. 16, n. 4, Apr. 2012. <http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662012000400014>.

COSTA, A. J. C. **Análise de viabilidade da utilização de lodo de ETA coagulado com Cloreto de Polialumínio (PAC) composto com areia como agregado miúdo em concreto para recomposição de calçadas: Estudo de caso na ETA do município de Mirassol - SP.** 2011.155 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Carlos, 2011

DAS, B.M., **Fundamentos de Engenharia Geotécnica.** 6ª Ed., Thomson Learning, S. Paulo, SP (2007) 562.

DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. B.; VOLTAN, P. E. N. **Tratabilidade de água e dos resíduos gerados em Estações de Tratamento de Água.** 1ª ed. Editora LDiBe, São Carlos – SP, 2011.

FREEMAN, R. E.; **Business Ethics: The State of the Art.** USA, 1ª ed. Editora Oxford University, USA, 2002.

GONÇALVES, H. P. **Planejamento e gerenciamento do resíduo sólido de construção e demolição : estudo de casos goianos.** 2013.126 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil, Universidade Federal de Goiás, 2013.

GRANDIN, S.R.; ALEM S. P. & GARCIA JR., A.D. **Desidratação de lodos produzidos em estações de tratamento de Água.** In: XVII Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, Anais... Natal (RN): ABES, v. 2, p. 324-341, 1993.

HOPPEN, C.; PORTELLA, K. F.; JOUKOSKI, A.; BARON, O.; FRANCK, R.; SALES, A.; ANDREOLI, C. V.; PAULON, V. A. **Co-disposição de lodo centrifugado de Estação de Tratamento de Água (ETA) em matriz de concreto: método alternativo de preservação ambiental.** Cerâmica, São Paulo, v. 51, n. 318, June 2005. <http://dx.doi.org/10.1590/S0366-69132005000200003>.

HOPPEN, C.; PORTELLA, K. F.; JOUKOSKI, A.; TRINDADE, E.M.; ANDREÓLI, C. V.; **Uso de lodo de Estação de Tratamento de Água centrifugado em matriz de concreto de cimento portland para reduzir o impacto ambiental.** Química Nova. São Paulo. V. 29. p. 85-95. Jan/Fev. 2006.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico**. Rio de Janeiro. 219p. 2008. Disponível em: http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/condicaoadevida/pnsb2008/PNSB_2008.pdf.

LAMAS, J. M. G. **Morfologia urbana e desenho da cidade**. Lisboa, Fundação Calouste Gulbenkian, 5ª ed. 2010.

LUCAS, A. A. T.; FOLEGATTI, M. V.; DUARTE, S. N.. **Qualidade da água em uma microbacia hidrográfica do Rio Piracicaba**, SP. Rev. bras. eng. agríc. ambient., Campina Grande, v. 14, n. 9, Sept. 2010. <http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662010000900005>.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concrete: microstructure, properties and materials**. 3. ed. United State of America: McGraw-Hill, 2006. 660 p.

METHODODICAL CENTRE FOR VOCATIONAL EDUCATION AND TRAINING. **Study of the Construction Sector**. Vilnius, 2008. Disponível em <http://www.kpmc.lt/Skelbimai/SEK_EN/EN-Stat.%20sekt.%2008.07.30.pdf> Acesso em 4 de junho de 2015.

MOREIRA, R. C. A.; GUIMARÃES, E. M.; BOAVENTURA, G. R.; MOMESSO, A. L.; LIMA, G. L.; **Estudos Geoquímico da Disposição de Lodo de Estação de Tratamento de Água em Área Degradada**. Quim. Nova, Vol. 32, No. 8, 2085-2093, 2009.

MOOR, M. COUSSERAN, A. **Urban design futures**. London: Routledge; 2006. 198 p.

OLIVEIRA, E. M. S.; MACHADO, S. Q.; HOLANDA, J. N. F. **Caracterização de resíduo (lodo) proveniente de estação de tratamento de águas visando sua utilização em cerâmica vermelha**. Cerâmica, São Paulo, v. 50, n. 316, Dec. 2004. <http://dx.doi.org/10.1590/S0366-69132004000400007>.

PAIXÃO, L. C. C.; YOSHIMURA, H. N.; ESPINOSA, D. C. R. e TENÓRIO, J. A. S. **Efeito da incorporação de lodo de ETA contendo alto teor de ferro em cerâmicas argilosas**. Cerâmica, São Paulo, v. 54, n. 329, Dec. 2013. <http://dx.doi.org/10.1590/S0366-69132008000100010>

POZZOBON J. C.; LUCAS, J. F. R.; SANTOS, L. C.; MORA, N. D. **Avaliação microbiológica de lodo de ETA seco em diferentes leitos de secagem artesanais**. VII ENDITEC - Encontro Nacional de Difusão Tecnológica. Medianeira (PR), 2010.

REIS, E. L. T.; COTRIM, M. E. B.; RODRIGUES, C.; PIRES, M. A. F.; BELTRAME F. O.; ROCHA, S. M.; CUTOLO, S. A. **Identificação da influência do descarte de lodo de estações de tratamento de água**. Quím. Nova, São Paulo, v. 30, n. 4, ago. 2007. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-40422007000400020>.

RICHTER, C. A. **Tratamento de lodos de Estações de Tratamento de Água**. São Paulo, ed. Blucher, 1ª ed. 2001.

RODRIGUES, L. P.; HOLANDA, J. N. F. **Influência da incorporação de lodo de estação de tratamento de água (ETA) nas propriedades tecnológicas de tijolos solo-cimento**. Cerâmica, São Paulo, v. 59, n. 352, Dec. 2013. <http://dx.doi.org/10.1590/S0366-69132013000400010>.

RODRÍGUEZ, N. H.; MARTÍNEZ-RAMÍREZ S.; BLANCO-VARELA, M. T.; GUILLEM, M.; PUIG, J.; LARROTCHA, E.; FLORES, J. **Evaluation of spray-dried sludge from drinking water treatment plants as a prime material for clinker manufacture**. Cement & Concrete Composites, Espanha, v. 33, n.2, Feb. 2011. doi:10.1016/j.cemconcomp.2010.10.020.

SAFIUDDIN, M.; JUMAAT, M.; SALAM, M. A.; ISLAM, M. S.; HASHIM, R. **Utilization of solid wastes in construction materials.** International Journal of the Physical Sciences Vol. 5(13). Academic Journals, 2010, p. 1952-1963.

SALES, A.; FRANCIS R. S.; ALMEIDA, F. C. R. **Mechanical properties of concrete produced with a composite of water treatment sludge and sawdust.** Construction and Building Materials, n. 25, p. 2793–2798, 2011.

SAMPAIO, Z. L. M.; SOUZA, P. A. B. F.; GOUVEIA, B. G. **Análise da influência das cinzas do bagaço de cana-de-açúcar no comportamento mecânico de concretos.** Rev. IBRACON Estrut. Mater. São Paulo, v. 7, n. 4, Aug. 2014. <http://dx.doi.org/10.1590/S1983-41952014000400006>.

SCALIZE, P. S.; DI BERNARDO, L.; SEIXAS, A. S. S. **Pesquisa qualitativa de formas parasitárias nas unidades de uma estação de tratamento de água através de diferentes métodos.** In: 21 CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 2001, João Pessoa. Anais Eletrônicos. Rio de Janeiro: ABES, 2001. v. único

SCHNEIDER, D. M. **Deposições Irregulares de Resíduos da Construção Civil na Cidade de São Paulo.** São Paulo, 2003. Dissertação de mestrado. Faculdade de Saúde Pública da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

SOARES, L. A.; SCALIZE, P. S.; ALBUQUERQUE, A. J. C. **Caracterização de resíduo de ETA visando sua disposição na saída de Lagoas de Estabilização.** Rev. Monog. Amb. – REMOA. Santa Maria, v. 14, n. 2, Mar. 2014. <http://dx.doi.org/10.5902/2236130812399>.

SOUZA, M. I. B.; SEGANTINI, A. A. S.; SANTOS, J. P. **Tijolos prensados de solo-cimento com adição de resíduos de concreto.** In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 6., 2006.

TARTARI, R.; DIAZ-MORA, N.; MODENES, A. N.; PIANARO, S. A. **Lodo gerado na estação de tratamento de água Tamanduá, Foz do Iguaçu, PR, como aditivo em argilas para cerâmica vermelha: Parte I: caracterização do lodo e de argilas do terceiro planalto paranaense.** Cerâmica, São Paulo, v. 57, n. 343, Sept. 2011. <http://dx.doi.org/10.1590/S0366-69132011000300006>.

TEIXEIRA, S. R., SOUZA, S. A. de, SOUZA, N. R. de, ALÉSSIO, P.; SANTOS, G. T. A. **Efeito da adição de lodo de estação de tratamento de água (ETA) nas propriedades de material cerâmico estrutural.** Cerâmica, São Paulo, v. 52, n. 323, Sept. 2006. <http://dx.doi.org/10.1590/S0366-69132006000300016>.

TITSHALL, L. W., HUGHES, J. C. **Characterisation of some South African water treatment residues and implications for land application.** Water SA, v. 31, n. 3 - July, South Africa, 2005, 299-308 p.

THOMAS, D. **Architecture and the Urban Environment: A Vision for the New Age.** 1ª ed, Editora Architectural PR-Usa, United States of America, 2002, 224p.

UNITED NATIONS. **Report of the World Commission on Environment and Development.** 1987. Disponível em : < <http://www.un-documents.net/a42-427.htm> > Acesso em 4 de junho de 2015.

VEIGA, A. M.; SANTOS, C. C. P.; CARDOSO, M. R. D. C.; LINO, N. C. **Caracterização hidromorfológica da bacia do rio Meia Ponte.** Revista Online Caminhos de Geografia, Uberlândia, vol. 14, n. 46, Jun. 2013.

VITORINO, J. P. D.; MONTEIRO, S. N.; VIEIRA, C. M. F. **Caracterização e incorporação**

de resíduos provenientes de Estação de Tratamento de Água em cerâmica argilosa.
Cerâmica, São Paulo, v. 55, n. 336, Dec. 2009. <http://dx.doi.org/10.1590/S0366-69132009000400008>.

APÊNDICES

Tabela A1 - Valores de resistência à compressão por amostra, média, desvio padrão e coeficiente de variação

Teor de Resíduo (%)	Idade (dias)	Resistencia à compressão (MPa)	Resistência à compressão Média (MPa)	Desvio Padrão	Coefficiente de variação (%)
0	7	12,22	12,03	0,65	5,42%
	7	11,30			
	7	12,56			
	14	12,56	13,2	1,49	11,27%
	14	14,90			
	14	12,14			
	28	15,90	15,57	0,58	3,71%
	28	14,90			
	28	15,90			
	56	16,90	16,7	0,92	5,49%
	56	15,70			
	56	17,50			
	920	18,10	17,56	0,68	3,88%
	920	16,80			
	920	17,80			
5	7	13,64	13,87	0,54	3,87%
	7	13,48			
	7	14,48			
	14	21,35	19,45	1,68	8,63%
	14	18,17			
	14	18,83			
	28	20,43	20,79	1,25	6,01%
	28	22,18			
	28	19,76			
	56	22,7	21,9	0,72	3,29%
	56	21,7			
	56	21,3			
	920	21,7	22,33	0,60	2,70%
	920	22,4			
	920	22,9			
	7	9,79	9,88	0,71	7,23%
	7	9,21			
	7	10,63			
	14	11,89	11,94	2,51	21,03%
	14	14,48			
	14	9,46			
	28	14,06			

10	28	15,32	13,51	2,15	15,91%
	28	11,13			
	56	13,7	13,9	0,72	5,19%
	56	13,3			
	56	14,7			
	920	14,3	14,4	0,26	1,84%
	920	14,7			
	920	14,2			
15	7	6,78	7,76	1,01	12,97%
	7	7,7			
	7	8,79			
	14	10,97	11,05	0,08	0,72%
	14	11,13			
	14	11,05			
	28	11,93	11,48	0,39	3,40%
	28	11,28			
	28	11,23			
	56	12,1	11,9	0,82	6,88%
	56	12,6			
	56	11			
	920	12,6	12,71	0,68	5,37%
	920	13,45			
920	12,1				
20	7	4,6	5,22	0,63	12,08%
	7	5,19			
	7	5,86			
	14	7,28	8,9	1,78	19,96%
	14	10,8			
	14	8,62			
	28	8,12	9,74	1,43	14,63%
	28	10,8			
	28	10,3			
	56	10,8	11,1	0,36	3,25%
	56	11,5			
	56	11			
	920	12,25	12,12	0,13	1,04%
	920	12,1			
920	12				
	7	3,77	3,18	0,63	19,93%
	7	3,26			
	7	2,51			
	14	9,12	8,98	0,56	6,21%
	14	9,46			
	14	8,37			

25	28	9,12	9,29	0,17	1,83%
	28	9,46			
	28	9,29			
	56	9,3	9,4	0,26	2,81%
	56	9,2			
	56	9,7			
	920	10,25	9,76	0,43	4,36%
	920	9,6			
	920	9,45			

Tabela A2 - Valores de resistência à compressão por amostra, média, desvio padrão e coeficiente de variação, após os ensaios de molhagem e secagem, aos 945 dias de idade

Teor de Resíduo (%)	Idade (dias)	Resistencia à compressão (MPa)	Resistência à compressão Média (MPa)	Desvio Padrão	Coeficiente de variação (%)
0	945	16,2	14,83	1,31	8,80%
		13,6			
		14,7			
5	945	19,4	19,35	0,25	1,30%
		19,6			
		19,1			
10	945	11,7	11,23	0,64	5,73%
		10,5			
		11,5			
15	945	7,9	9,02	1,27	14,04%
		10,4			
		8,8			
20	945	7,5	8,12	0,60	7,43%
		8,7			
		8,2			
25	945	5,8	5,95	0,67	11,20%
		5,4			
		6,7			

Tabela A3 - Valores de resistência à compressão por amostra, média, desvio padrão e coeficiente de variação, das amostras com teor de 0 e 5% de resíduo, aos 1310 dias de idade

Teor de Resíduo (%)	Idade (dias)	Resistencia à compressão (MPa)	Resistência à compressão Média (MPa)	Desvio Padrão	Coeficiente de variação (%)
0	1310	18,2	17,83	0,32	1,80%
		17,6			
		17,7			
5	1310	23,1	22,65	0,84	3,70%
		23,2			
		21,7			

Tabela A4 - Valores de resistência à compressão por amostra, média, desvio padrão e coeficiente de variação, das amostras com teor de 0 e 5% de resíduo, após os ciclos de molhagem e secagem aos 1322 dias de idade

Teor de Resíduo (%)	Idade (dias)	Resistencia à compressão (MPa)	Resistência à compressão Média (MPa)	Desvio Padrão	Coefficiente de variação (%)
0	1322	15,8	15,54	0,83	5,36%
		16,2			
		14,6			
5	1322	19,9	19,4	0,50	2,58%
		19,4			
		18,9			