



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

Jeffersson Fernandes de Lima

Avaliação da incorporação de cinzas de lodo de esgoto como adição mineral em concretos de cimento Portland

Natal-RN

2013

Jeffersson Fernandes de Lima

Avaliação da incorporação de cinzas de lodo de esgoto como adição mineral em concretos de cimento Portland

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientadora : Prof. Dr^a Maria Del Pilar Durante Ingunza

Co-orientador : Prof. Dr. Paulo Alysson Brilhante Faheina de Souza

**Natal-RN
2013**

Jeffersson Fernandes de Lima

Avaliação da incorporação de cinzas de lodo de esgoto como adição mineral em concretos de cimento Portland

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr^a Maria Del Pilar Durante Ingunza - Orientadora (UFRN)

Prof. Dr. Paulo Alysson Brilhante Faheina de Souza - Co-orientador (UFRN)

Prof. Dr^a Maria das Vitorias Vieira A. de Sá - Examinadora interna à instituição (UFRN)

Prof. Dr^a Gladis Camarini - Examinadora externa à instituição (UNICAMP)

Natal, 18 de outubro de 2013

*"Ele não sabia que era impossível. Foi lá e fez."
Jean Cocteau*

Agradecimentos

A Deus, por me permitir concluir mais um desafio.

Aos meus pais, Ana e Pinheiro, por serem as maiores bênçãos na minha vida, por me incentivarem a buscar fazer o melhor que posso e pelo apoio incondicional sempre que me lanço em um novo desafio.

A minha namorada, Kalívia Duda, pelo incentivo, carinho, companheirismo e paciência, pois teve muitas vezes que abdicar da minha companhia e atenção em virtude desta etapa tão importante da minha vida profissional.

A minha irmã, Jamaika Lima, pelo auxílio na preparação do *abstract*.

A Prof^a Maria Del Pilar Durante Ingunza, pela orientação em todas as fases da pesquisa e confiança depositada no meu trabalho.

Ao Prof. Paulo Alysson Brilhante Faheina de Souza, pela orientação durante os estudos para definição da dosagem dos concretos.

A Prof^a Maria das Vitórias Almeida de Sá, pela valorosa contribuição na etapa de qualificação desta pesquisa.

Ao Prof. Marcos Antonio dias de Almeida, pelo grande estímulo dado para que eu ingresasse neste mestrado e buscasse sempre a expansão dos meus conhecimentos.

A todos os bolsistas do Laboratório de Recursos Hídricos e Saneamento ambiental da UFRN (LARHISA), em especial a Rennan Augusto, pela inestimável ajuda nas fases de obtenção do resíduo, queima dos lodos, caracterização dos materiais e concretos.

A Thaís Bruno, ex-integrante da equipe técnica do Laboratório de Recursos Hídricos e Saneamento ambiental da UFRN, pelo auxílio nas fases de obtenção do resíduo, queima dos lodos e compra de equipamentos para desenvolvimento desta pesquisa.

A Francisco Brás (Seu Chico) e Sandro Ricardo, técnicos do Laboratório de Materiais de Construção da UFRN, por todo o suporte dado durante a realização dos ensaios desenvolvidos no procedimento experimental.

Aos Senhores Emanuel, do Laboratório de Laminação do Departamento de Geologia da UFRN, e Enederson, do Laboratório de Peneiras Moleculares do Instituto de Química da UFRN, pelo auxílio na preparação das amostras reduzidas de concreto para as análises no MEV.

A Imunizadora Potiguar pela disponibilização do resíduo utilizado nos estudos.

A Cerâmica Caisa pela disponibilização de suas instalações para a realização da queima do lodo bruto utilizado na 2^o etapa desta pesquisa.

A Arthur Lima, Judson Borges, Rafael dos Prazeres, Peter Macperson e Thiago Alves, amigos e companheiros de trabalho da Escola de Ciências e Tecnologia da UFRN, por todo o "*bullying*" praticado em cima deste trabalho, pois foram estas brincadeiras que tornaram as dificuldades que iam surgindo mais simples de serem superadas. A grande lição: Toda dificuldade se torna mais fácil se encarada com bom humor.

A todos os amigos que de maneira direta ou indireta contribuíram e torceram para eu que tivesse êxito nesta jornada.

Avaliação da incorporação de cinzas de lodo de esgoto como adição mineral em concretos de cimento Portland

Jeffersson Fernandes de Lima

Orientadora: Prof. Dr^a Maria Del Pilar Durante Ingunza

Co-orientador: Prof. Dr. Paulo Alysson B. F. de Souza

Resumo

O desenvolvimento das grandes cidades tem gerado um dos maiores desafios ambientais enfrentados na atualidade, que é a gestão eficaz de resíduos sólidos. A grande variedade e quantidade dos resíduos produzidos diariamente, tem tornado a destinação ecologicamente correta e sustentável destes materiais cada vez mais difícil. Dentre os vários resíduos produzidos diariamente destacam-se os lodos oriundos de estações de tratamento de esgotos, denominados de lodos de esgoto, cuja destinação final segura tem sido discutida mundialmente em diversos estudos, tendo em vista que a tendência de geração deste tipo de resíduo tende a crescer com o aumento do saneamento das cidades. Uma forma amplamente difundida nos países desenvolvidos para destinação dos lodos de esgoto é a incineração destes materiais para posterior envio das cinzas geradas neste processo a aterros sanitários. Porém, tem-se estudado formas alternativas de disposição, destacando-se a utilização destas cinzas como adição mineral em concretos e argamassas de cimento Portland. Sabe-se que o desempenho de resíduos de incineração como adição mineral em matrizes cimentícias, depende em grande parte da capacidade de atuação destes materiais como elementos pozolânicos ou como fileres, podendo estas características serem influenciadas pela temperatura de queima ao qual estes resíduos foram submetidos. Neste sentido, verificou-se com esta pesquisa a influência da temperatura empregada na queima dos lodos sépticos no índice de atividade pozolânica (IAP) das cinzas geradas como resíduo deste processo, aqui denominadas de cinzas de lodo séptico (CLS), sendo em seguida, avaliada as implicações técnicas e microestruturais da utilização deste resíduo em teores de 10%, 20% e 30% como adição mineral em

concretos de cimento Portland. Os resultados obtidos demonstraram não haver alterações significativas no IAP das CLS em decorrência da temperatura utilizada durante o processo de queima dos lodos de esgoto. Além disso, verificou-se que embora a utilização das CLS tenham provocado diminuição da trabalhabilidade dos concretos para todos os teores de incorporação, estas melhoraram a resistência mecânica à compressão, o índice de vazios, a absorção de água e o comportamento microestrutural dos concretos contendo 10% e 20% de resíduo.

Palavras-chave: Lodo de esgoto, cinza de lodo de esgoto, concreto, adição mineral, resíduo sólido, sustentabilidade.

Evaluation of the incorporation of sewage sludge ash as a mineral admixture in Portland cement concrete

Jeffersson Fernandes de Lima

Adviser: Prof. Dr^a Maria Del Pilar Durante Ingunza

Co-adviser: Prof. Dr. Paulo Alysson B. F. de Souza

Abstract

The development of the large cities has generated one of the greatest environmental challenges facing today, which is the effective management of solid waste. The wide variety and quantity of waste produced daily has become the ecologically friendly and sustainable destination of these materials ever more difficult. Among the various types of waste produced daily highlight the sludge coming from sewage treatment plants, called sewage sludge, whose final safe destination has been discussed in several studies around the world, given that the trend of this type of waste generation tends to grow with increased sanitation of the cities. A widespread form in developed countries to destination of sewage sludge is incineration of these materials and sanding the ash generated in this process to sanitary landfills later. However, it has studied alternative forms of provision, highlighting the use of these ashes as mineral admixture in concrete and Portland cement mortars. It is known that the performance of incineration residues as mineral admixture in cement depends largely on the capacity performance of these materials as fillers or as a pozzolanic elements. These characteristics may be influenced by the firing temperature to which these residues have undergone. Was verified in this research the influence of the temperature used in the burning of the sludge septic in pozzolanic activity index (PAI) of the ash generated as a residue from this process, here called septic sludge ash (SSA), and then evaluated the technical and microstructural implications of the use of these residues at levels of 10 %, 20 % and 30 % as mineral admixture in Portland cement concrete. The results showed no significant changes in PAI of SSA due to the temperature employed in the process of sewage sludge burning. Furthermore, it was found

that although the use of SSA have led to decreased workability of concrete for all levels of incorporating, the use of SSA improved mechanical strength, void ratio, water absorption and the microstructure behavior of the concrete containing 10 % and 20 % of residue.

keywords: Sewage sludge, sewage sludge ash, concrete, mineral admixture, solid waste, sustainability.

Lista de Figuras

2.1	Microestrutura do concreto - aspecto do C-S-H, do C-H e da etringita	7
2.2	Microestrutura do concreto - aspecto dos cristais de etringita e monossulfato hidratado	7
2.3	Acúmulo de água junto a superfície do agregado	10
2.4	Zona de transição em concreto	11
2.5	Representação simplificada da reação pozolânica	15
2.6	Resultados de ensaios de consistência x teor de superplastificante (SP) para argamassas com diferentes teores de água	28
3.1	Croqui do sistema de tratamento da Imunizadora Potiguar	30
3.2	Coleta do lodo séptico	31
3.3	Planejamento experimental	34
3.4	Padrão utilizado na identificação dos concretos	39
4.1	Curva de ATD para amostra de lodo séptico bruto	46
4.2	Curvas de ATG e DTG para amostra de lodo séptico bruto	46
4.3	DRX das amostras CLS700, CLS800 e CLS900	49
4.4	Amostra de CLS obtidas em forno industrial	50
4.5	Curva granulométrica das CLS850	51
4.6	Vista geral dos grãos de CLS850	52
4.7	Vista dos grãos de CLS850 - detalhe A	53
4.8	Vista dos grãos de CLS850 - detalhe B	53
4.9	Curva granulométrica do agregado miúdo e das CLS850	57
4.10	Curva granulométrica do agregado graúdo	58

4.11	Trabalhabilidade em função do teor de CLS adicionadas aos concretos	60
4.12	Aspecto visual dos concretos com e sem adição de CLS	61
4.13	Exsudação nos CP's do concreto CP00A-S.A	63
4.14	Evolução da resistência à compressão dos concretos produzidos	63
4.15	Absorção e índice de vazios em função do teor de CLS adicionadas aos concretos	64
4.16	Microestrutura do concreto CP00A-S.A - identificação das principais fases . . .	65
4.17	Microestrutura do concreto CP20A-S.A - identificação das principais fases . . .	65
4.18	Microestrutura da zona de transição do concreto CP00A-S.A	66
4.19	Microestrutura da zona de transição do concreto CP20A-S.A	67
4.20	Detalhe na microestrutura da zona de transição do concreto CP20A-S.A	67

Lista de Tabelas

2.1	Componentes básicos do cimento em termos percentuais	5
2.2	Características dos lodos de ETE	16
2.3	Caracterização de lodos sépticos no Brasil - Valores médios encontrados	17
2.4	Caracterização de lodos sépticos no mundo - Valores médios encontrados	18
2.5	Volume de lodo produzido nos diversos tipos de tratamento	20
2.6	Valores de produção de lodos em sólidos secos	20
2.7	Consumo de energia para quatro tipos de alvenarias	25
3.1	Traço unitário em massa dos concreto estudados	40
3.2	Quantidade de corpos de prova para as diferentes dosagens	40
3.3	Volume total de concreto produzido por traço	41
3.4	Quantidade de material utilizado na produção dos concretos	41
4.1	Identificação das cinzas geradas no processo de queima	47
4.2	Resultado da análise de FRX em porcentagem de óxidos	48
4.3	IAP para as amostras de CLS	50
4.4	Identificação das cinzas geradas no processo de queima em forno industrial	50
4.5	Distribuição granulométrica das CLS850	51
4.6	Massa específica das CLS850	52
4.7	Finura do cimento Portland	54
4.8	Massa específica do cimento Portland	54
4.9	Início de pega do cimento Portland	55
4.10	Expansibilidade a frio do cimento Portland	55
4.11	Resistência à compressão axial do cimento Portland aos 3, 7 e 28 dias	55

4.12 Distribuição granulométrica do agregado miúdo	56
4.13 Massa específica e unitária do agregado miúdo	57
4.14 Distribuição granulométrica do agregado graúdo	58
4.15 Massa específica e unitária do agregado graúdo	59
4.16 Trabalhabilidade dos concretos produzidos	59
4.17 Resistência à compressão aos 7, 28 e 91 dias	62

Lista de Abreviaturas

A/AGL - Água/aglomerante

ABCP - Associação Brasileira de Cimento Portland

ATD - Análise térmica diferencial

ATG - Análise termogravimétrica

C₂S - Silicato dicálcico

C₃A - Aluminato tricálcico

C₃S - Silicato tricálcico

C₄AF - Ferro aluminato tetracálcico

C-H - Hidróxido de cálcio

C-S-H - Silicato de cálcio hidratado

CLE - Cinzas de lodo de esgoto

CLS - Cinzas de lodo séptico

CP - Corpo de prova

CTGÁS-ER - Centro de Tecnologia do Gás e Energias Renováveis

DBO - Demanda Bioquímica de Oxigênio

DNIT - Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes

DQO - Demanda Química de Oxigênio

DRX - Difração de raios X

EDS - Equipamento de espectrometria de energia dispersiva de raios X

ETE - Estação de tratamento de esgotos

FRX - Fluorescência de raios X

IAP - Índice de atividade pozolânica

LS - Lodo séptico

MEV - Microscópio eletrônico de varredura

NTK - Nitrogênio Kjeldahl

UFRN - Universidade Federal do Rio Grande do Norte

Sumário

Lista de Figuras	xi
Lista de Tabelas	xiii
Lista de Abreviaturas	xv
1 Introdução	1
1.1 Objetivos	3
2 Revisão de Literatura	4
2.1 Concreto	4
2.2 Cimento Portland	5
2.2.1 Hidratação do cimento Portland	6
2.2.2 Mecanismos de hidratação do cimento Portland	8
2.3 Agregados	9
2.4 Zona de transição em concretos	11
2.5 Adições Minerais	12
2.5.1 A reação pozolânica	14
2.6 Lodo de esgoto	15
2.6.1 Tipos e características do lodo de esgoto	15
2.6.2 Produção do lodo	19
2.6.3 Disposição final do lodo	20
2.7 Utilização de lodos como insumos na construção civil	21
2.7.1 Matéria-prima para fabricação de cerâmica	23
2.7.2 Produção de agregado leve	25

2.7.3	Matéria-prima na pavimentação	26
2.7.4	Produção de cimento biológico	27
2.7.5	Adições minerais em argamassas e concretos	27
3	Procedimento Experimental	30
3.1	Coleta do lodo séptico	30
3.2	Planejamento experimental	32
3.3	Queima do lodo séptico	35
3.3.1	Em laboratório	35
3.3.2	Em forno industrial	35
3.4	Caracterização dos materiais	36
3.4.1	Lodo séptico	36
3.4.2	Cinza de lodo séptico	36
3.4.3	Cimento	37
3.4.4	Agregado miúdo	38
3.4.5	Agregado graúdo	38
3.4.6	Água	39
3.5	Dosagem e produção dos concretos com e sem resíduo	39
3.5.1	Escolha do traço	39
3.5.2	Definição da quantidade de corpos de prova	40
3.5.3	Cálculo das quantidade de materiais	40
3.5.4	Produção dos corpos de prova de concreto	41
3.6	Caracterização dos concretos com e sem resíduo	43
3.6.1	No estado fresco	43
3.6.2	No estado endurecido	43
4	Resultados e discussões	45
4.1	Caracterização dos materiais	45
4.1.1	Lodo séptico	45
4.1.2	Cinza de lodo séptico	47
4.1.3	Cimento	54

4.1.4	Agregado miúdo	56
4.1.5	Agregado graúdo	57
4.2	Caracterização dos concretos com e sem resíduo	59
4.2.1	No estado fresco	59
4.2.2	No estado endurecido	62
5	Conclusões	68
6	Sugestões para trabalhos futuros	71
	Referências	72

Capítulo 1

Introdução

Com o crescimento e desenvolvimento da população mundial, tem-se aumentado o consumo de recursos naturais e de energia, bem como aumentado significativamente a produção de resíduos principalmente nos grandes centros urbanos, gerando grande preocupação em relação à preservação do meio ambiente (Almeida, 2006; Fontes, 2003). Esta preocupação tem dado grande visibilidade aos estudos visando o reaproveitamento de resíduos na construção civil, indústria esta tida como um dos principais consumidores de matérias-primas naturais no mundo (Agopyan e John, 2011).

O reaproveitamento de resíduos na construção civil é considerada por Ingunza *et al.* (2006) como uma prática ambientalmente correta, que permite a diminuição do consumo de recursos naturais tanto na forma de matéria-prima quanto na forma de energia, bem como reduz os custos e danos ambientais decorrentes das formas inadequadas de disposição final destes materiais.

Segundo Geyer (2001), os avanços em pesquisas envolvendo resíduos na construção civil ficam evidenciados ao verificar-se que alguns resíduos estudados já são considerados como inseparáveis dos processos produtivos, devido às vantagens que os seus usos trazem, como por exemplo os casos das escórias de alto-forno e das cinzas volantes na produção dos cimentos de alto-forno e pozolânicos. Também pode-se destacar o caso da sílica ativa, resíduo este gerado na produção do silício metálico, que tem sido cada vez mais utilizado como adição mineral em argamassas e concretos de alto desempenho.

Dentre os principais resíduos urbanos, um dos mais problemáticos, em virtude do seu

grande volume de produção, difícil tratamento e disposição final são os lodos de esgoto, que são subprodutos gerados nas Estações de Tratamento de Esgoto Doméstico ou Industrial (ETE), resultante da decantação dos sólidos contidos nos esgotos e dos sólidos gerados pela degradação biológica da matéria orgânica (Duarte, 2008; Fontes, 2003). Azuma (1973) *apud* Geyer (2001) cita que até a década de 60, a única forma de disposição deste resíduo era em aterros sanitários, baseando-se no funcionamento do ciclo natural de depuração da matéria.

Com o crescimento das cidades e conseqüente aumento da quantidade deste resíduo, esta alternativa passou a ser ineficaz sob os pontos de vista físico e ambiental, uma vez que, o planejamento inadequado de um aterro sanitário pode causar diversos impactos ambientais, tais como a poluição das águas subterrâneas e superficiais em função da lixiviação e escorrimentos de líquidos percolados que podem conter substâncias tóxicas, a poluição do ar através da produção de gases nos aterros, bem como a poluição do solo. Estes impactos podem ser evitados através de projetos bem elaborados, escolha de locais adequados, monitoramento do aterro mesmo após o seu fechamento, e elementos de proteção ambiental (Andreoli *et al.*, 2001; Tsutiya e Hirata, 2001).

A incineração dos lodos surgiu mundialmente como forma de reduzir o seu volume original e proporcionar melhores condições para a sua disposição, entretanto, conforme apontado por Geyer (2001) e Tsutiya e Hirata (2001), este processo, apesar de eliminar todos os organismos patogênicos e compostos orgânicos tóxicos, não elimina por completo o risco de contaminação do meio ambiente, uma vez que a existência de uma cinza como resíduo da incineração, configura que ainda existe, embora em menor volume, um resíduo a ser disposto e com uma composição que pode ser mais nociva, por aumentar a concentração de alguns compostos perigosos, podendo citar como exemplo os metais pesados.

De acordo com Santos (2003), o uso do lodo de esgotos em processos industriais é classificado como tecnologia emergente. Diferentes formas de reciclagem do lodo como materiais de construção estão sendo sugeridas internacionalmente como alternativa segura para encapsulamento dos metais pesados, redução de emissões atmosféricas poluentes, redução de custos, além de consistir numa forma de aproveitamento benéfico de matéria-prima e energia disponíveis, causando uma economia na extração destes recursos do ambiente, mesmo que em pequenas quantidades, e desta forma adequando-se ao modelo de desenvolvimento

sustentável.

1.1 Objetivos

No sentido de contribuir para os estudos abordando o uso de lodos de esgoto na construção civil, busca-se neste trabalho avaliar o uso de cinzas geradas na queima de lodos sépticos oriundos de lagoa de estabilização anaeróbia como adição mineral em concretos de cimento Portland.

Foram estabelecidos como objetivos específicos desta pesquisa:

- A verificação da influência da temperatura empregada na queima dos lodos sépticos no índice de atividade pozolânica (IAP) das cinzas geradas como resíduo do processo, através de:
 - Análise térmica diferencial (ATD) e termogravimétrica (ATG) dos lodos brutos.
 - Caracterização química por fluorescência de raios X (FRX) e mineralógica por difração de raios X (DRX).
 - Realização de ensaios de IAP de cinzas de lodo séptico (CLS) obtidas em diferentes temperaturas de queima.
- A avaliação das implicações técnicas da incorporação de teores variados de CLS como adição à massa de preparo de concretos, analisando seus efeitos nas propriedades dos concretos no estado fresco e endurecido, através dos ensaios de:
 - Trabalhabilidade - *Slump test*.
 - Resistência à compressão axial nas idades de 7, 28 e 91 dias.
 - Índice de vazios e absorção de água.
- A avaliação microestrutural dos concretos através de observações em microscópio eletrônico de varredura (MEV).

Capítulo 2

Revisão de Literatura

2.1 Concreto

O concreto é o compósito resultante da mistura, em determinadas proporções, de agregados, aglomerantes e água, podendo conter adições e aditivos que podem influenciar no seu desempenho (Pedroso, 2009).

O concreto ao longo dos séculos constituiu-se num elemento indispensável na construção civil, devido a sua relativa facilidade de moldagem e sua durabilidade diante das intempéries e seu baixo custo associado a rápida disponibilidade para uma obra (Mehta e Monteiro, 2006).

A evolução deste compósito é bastante notória nas últimas décadas, podendo citar como fruto desta evolução o desenvolvimento de variados concretos especiais, como o de alto desempenho, auto-adensável, leve, pesado, com fibras, colorido, permeável, dentre outros, no intuito de melhor adaptar estes materiais as novas e desafiadoras obras de engenharia, sendo utilizado para este fim uma enorme gama de cimentos, agregados, aditivos e adições minerais (Kaefer, 1998).

O desenvolvimento de concretos especiais está diretamente relacionado ao avanço nos estudos da sua microestrutura. O estudo da microestrutura do concreto permite uma melhor caracterização de cada constituinte e de seu relacionamento com os demais. Desta forma, identificam-se mecanismos responsáveis pela resistência, estabilidade dimensional e durabilidade das misturas, permitindo que se atue de maneira a melhorar as características dos concretos (Mehta e Monteiro, 1994).

2.2 Cimento Portland

A Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP, 2002) define cimento Portland como um pó muito fino com propriedades aglomerantes, aglutinantes ou ligantes, que endurece sob a ação da água.

O cimento Portland é produzido a partir do aquecimento a altas temperaturas (próximas de 1450 °C) da mistura pré-determinada de calcário e argila, ou outros materiais de comprovada reatividade que apresentem na sua composição sílica e cálcio, elementos primários constituintes do cimento Portland (Taylor, 1990).

Os principais constituintes do cimento Portland são os silicatos de cálcio: C_3S (silicato tricálcico - $3CaO.SiO_2$) e C_2S (silicato dicálcico - $2CaO.SiO_2$); os aluminatos de cálcio: C_3A (aluminato tricálcico - $3CaO.Al_2O_3$) e o ferro aluminato de cálcio – C_4AF (Ferro aluminato tetracálcico - $4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$), além da gipsita adicionada para inibir a tendência instantânea à pega ocasionada pela grande reatividade do C_3A . Apresentam também na sua composição impurezas: magnésio, sódio, potássio e sílica (Mehta e Monteiro, 2006; Moir, 2003; Taylor, 1990).

Os limites adotados para os percentuais de cada componente básico (C_3S , C_2S , C_3A e C_4AF), são definidos dependendo do tipo de cimento que se deseja produzir, tendo como referência os teores apresentados na Tabela 2.1.

Tabela 2.1: Componentes básicos do cimento em termos percentuais

Componente	Elemento Mineral	Teores típicos (%)
C_3S	Alita	45 a 65
C_2S	Belita	10 a 30
C_3A	Aluminato	5 a 12
C_4AF	Ferrita	6 a 12

Fonte: Adaptado de Moir (2003)

2.2.1 Hidratação do cimento Portland

De forma simples, define-se a hidratação do cimento como sendo uma reação que ocorre entre componentes sólidos (cimento) e a fase líquida (água). Quando o cimento é disperso em água, o sulfato de cálcio formado a altas temperaturas começam a entrar em solução, e a fase líquida se torna rapidamente saturada com alguns íons e são denominados de solução de poros. Os principais íons presentes na solução de poros são OH^- , K^+ , Ca^{2+} , SO_4^{2-} , $\text{Al}(\text{OH})_4^-$, H_2SiO_4^- , entre outros, com os íons de álcalis (K^+ e Na^+) e OH^- , em quantidades normalmente dominantes entre eles (Taylor, 1990).

Segundo Mehta e Monteiro (2006), a hidratação do cimento resulta em três compostos principais, que caracterizam a pasta endurecida:

- Silicato de cálcio hidratado (C-S-H): são cristais pequenos e fibrilares, de composição química muito variada, que representam de 50% a 60% do volume de sólidos em uma pasta de cimento Portland completamente hidratada. Estes compostos são responsáveis pela resistência da pasta endurecida a esforços mecânicos.
- Hidróxido de cálcio (C-H): sua morfologia é bem definida, formando cristais prismáticos, cujo tamanho aumenta conforme também aumenta o espaço livre. Estes ocupam de 20% a 25% do volume de sólidos da pasta.
- Sulfoaluminato de cálcio: ocupam de 15% a 20% do volume da pasta hidratada. Apresentam como principais compostos a etringita e o monossulfato de cálcio.

A Figura 2.1 apresenta uma micrografia eletrônica de varredura da microestrutura do concreto, apresentando o aspecto do C-S-H, do C-H e da etringita, já a Figura 2.2 apresenta uma micrografia eletrônica de varredura da microestrutura do concreto, apresentando o aspecto dos cristais de etringita e monossulfato hidratado.

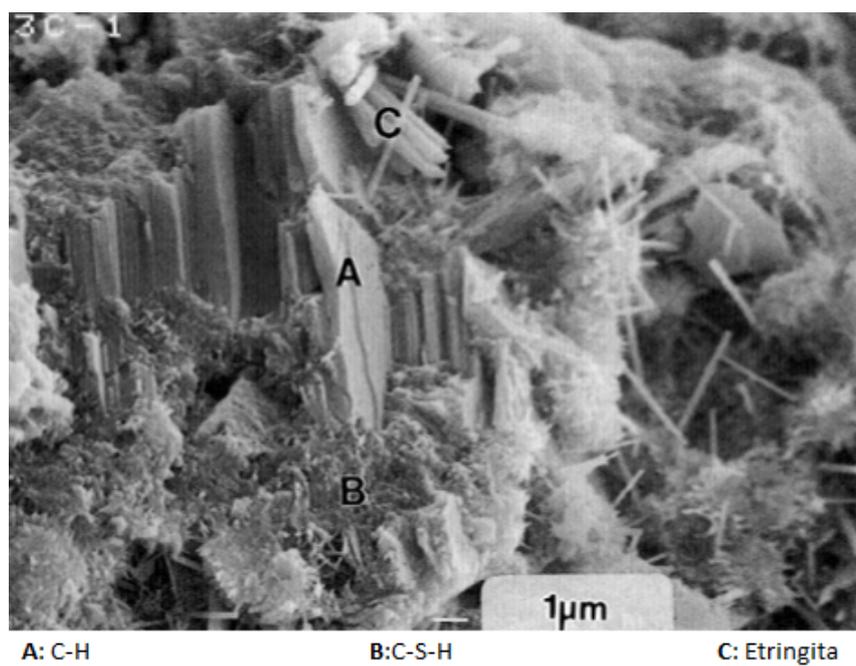


Figura 2.1: Microestrutura do concreto - aspecto do C-S-H, do C-H e da etringita (Sarkar *et al.*, 2001).

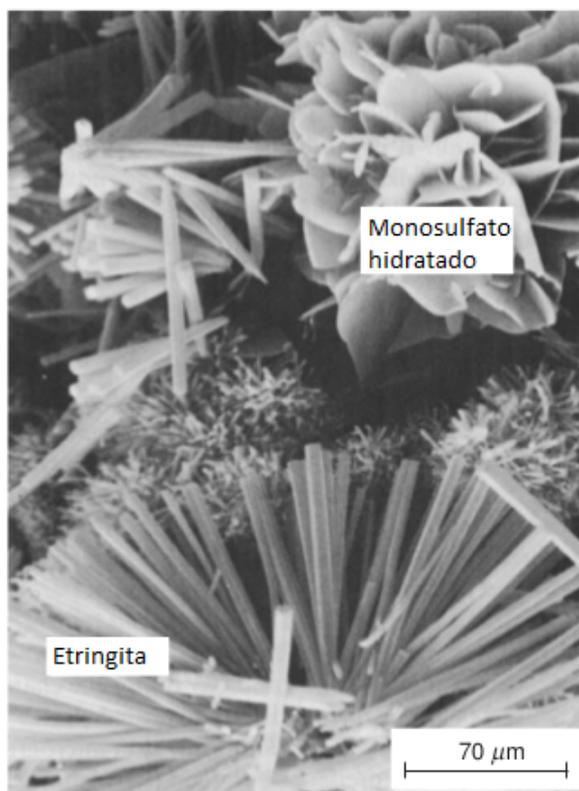


Figura 2.2: Microestrutura do concreto - aspecto dos cristais de etringita e monossulfato hidratado (Mehta e Monteiro, 2006).

2.2.2 Mecanismos de hidratação do cimento Portland

Conforme Mehta e Monteiro (2006), são dois os mecanismos de hidratação do cimento Portland que ocorrem:

- Hidratação por meio de solução

Ocorre nas primeiras idades através do processo de dissolução dos compostos anidros do cimento com seus outros íons constituintes, formando hidratos na solução e devido sua baixa solubilidade, precipitando eventuais hidratos na solução supersaturada. Assim, o mecanismo por meio de solução prevê uma completa reorganização dos constituintes dos compostos originais durante a fase de hidratação.

- Hidratação no estado sólido

Ocorre ao longo do tempo, ocorrendo reações diretamente na superfície dos compostos anidros do cimento sem que estes entrem em solução. Este mecanismo ocorre preferencialmente nas idades mais avançadas em virtude das reações iônicas serem bastante restritas.

Hidratação dos silicatos

A hidratação dos silicatos (C_3S e C_2S) inicia algumas horas após o início da hidratação do cimento e resultam na formação de C-S-H e C-H. A resistência inicial da pasta de cimento Portland e aumento de sua resistência final é comandada pelo C_3S , enquanto que o C_2S é responsável pelo aumento da resistência em idades avançadas (Moir, 2003).

Em geral, os silicatos de cálcio hidratado representam cerca de 50% a 60% do volume de sólidos em uma pasta hidratada, tendo forma de fibras pouco cristalinas a reticulados cristalinos, formando um sólido poroso com características de gel rígido, denominado de gel de tobermorita. Já os hidróxidos de cálcio constituem cerca de 20% a 25% do volume da pasta hidratada, tendo morfologia definida em forma de prismas hexagonais, sendo conhecida na literatura pelo nome mineral de portlandita (Mehta e Monteiro, 2006; Taylor, 1990).

Hidratação dos aluminatos

A reação de C_3A com água é imediata e provoca a liberação de grande quantidade de calor, aparecendo, em poucos minutos de hidratação do cimento Portland, os primeiros cristais aciculares de sulfoaluminatos de cálcio provenientes da reação do C_3S com o gesso, conhecidos como etringita ($C_6AS_3H_{32}$) (Taylor, 1990). Em geral, a reatividade do C_4AF é mais lenta do que a do C_3A , porém cresce com o aumento do teor de alumina e diminuição da temperatura resultante da reação de hidratação, exercendo pouca influência na resistência mecânica da pasta (Mehta e Monteiro, 2006).

Dependendo da proporção alumina-sulfato, a etringita pode tornar-se estável e possuir a forma de placas hexagonais delgadas. Este balanço na fase de solução da pasta de cimento hidratado é que determinará qual o tipo de pega que ocorrerá (pega normal, pega acelerada, pega instantânea ou falsa pega) (Moir, 2003).

2.3 Agregados

Os agregados são materiais granulares, geralmente inertes, constituídos de misturas de partículas com dimensões adequadas para as obras de engenharia. São amplamente utilizados como material de enchimento inerte no concreto, ocupando cerca de 80% do volume total deste, tanto por não apresentarem reações químicas complexas, quanto por serem materiais relativamente baratos quando comparados aos demais materiais constituintes da mistura (cimento, aditivos e adições minerais) (Neville, 1997).

Os agregados são classificados de uma forma geral quanto à origem, quanto à dimensão das partículas e quanto ao seu peso específico aparente.

Com relação à origem, estes materiais são classificados como naturais, quando se encontram na natureza prontos para serem utilizados ou necessitando apenas de processo de lavagem e classificação, ou como artificiais, quando necessitam de uma transformação para chegar a condição de uso (Bauer, 2000).

A norma NBR 7211 (ABNT, 2009a) classifica os agregados de acordo com a dimensão das partículas, em agregado graúdo e em miúdo. Sendo o Agregado graúdo caracterizado como um material proveniente da britagem de rochas estáveis, com um máximo de 15%

passando na peneira de 4,8 mm, podendo ser exemplificado por pedregulho natural, seixo rolado, pedra britada, dentre outros. E, o Agregado miúdo sendo definido como o material passante na peneira de 4,8 mm, ficando no máximo 15% deste retido na mesma peneira.

No que se refere ao peso específico, tem-se que os agregados são classificados como leves, médios e pesados, sendo esta diferenciação feita conforme a densidade do material que os constitui (Bauer, 2000).

Nos últimos anos, o desenvolvimento de inúmeras pesquisas acerca da influência dos agregados no concreto concluiu que a função desse componente não se restringe a material de enchimento, pelo contrário, pode contribuir muito em várias propriedades do concreto fresco e do concreto endurecido, dependendo das características físicas, no que se refere a porosidade, massa específica, granulometria, a forma e textura superficial desses agregados, bem como das características mineralógicas (Souza, 2007).

Como exemplo destes estudos, Mehta e Monteiro (2006) citam que a forma e a dimensão do agregado podem afetar a resistência do concreto por acúmulo de água junto à superfície do agregado, que enfraquece a zona de transição entre a pasta de cimento e o agregado, pelo fenômeno da exsudação. A água da exsudação interna tende a se acumular em torno das partículas alongadas, achatadas e grandes como pode ser visto esquematicamente e através de micrografia na Figura 2.3.

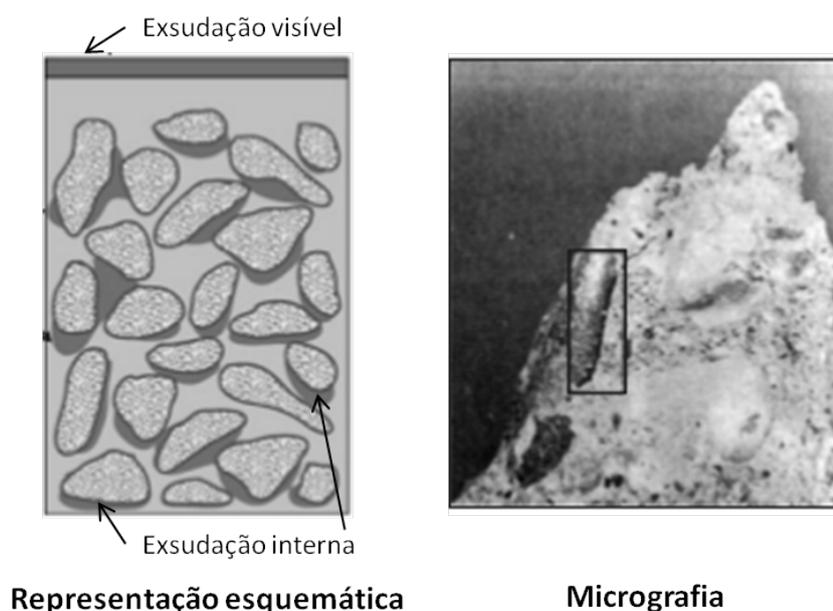


Figura 2.3: Acúmulo de água junto a superfície do agregado (Mehta e Monteiro, 2006).

Já Hahin (1984) afirma que a textura da superfície e mineralogia das partículas do agregado influenciam nas características da zona de transição entre a pasta de cimento e o agregado, além de existir possibilidade de interferir na demanda de água da mistura, prejudicando a resistência à compressão e permeabilidade do concreto. Além disso, em muitos casos, conforme Prudêncio (1986), os agregados apresentam porosidades superiores às das pastas de cimentos com reduzida relação água/aglomerante (A/AGL), em função de sua natureza e das condições de cristalização, tornando a estrutura mais susceptível à penetração de agentes agressivos.

Diante deste novo paradigma, é necessário atentar para a seleção dos agregados a serem utilizados na produção de concretos, uma vez que a escolha destes materiais podem influenciar positivamente ou negativamente as reações que ocorrem na zona de transição entre a pasta de cimento e o agregado, tendo reflexos nas propriedades finais do concreto.

2.4 Zona de transição em concretos

A zona de transição em concretos consiste na porção da pasta de cimento que fica entre as partículas de agregado graúdo e a matriz da pasta cimento, conforme apresentado esquematicamente na Figura 2.4.

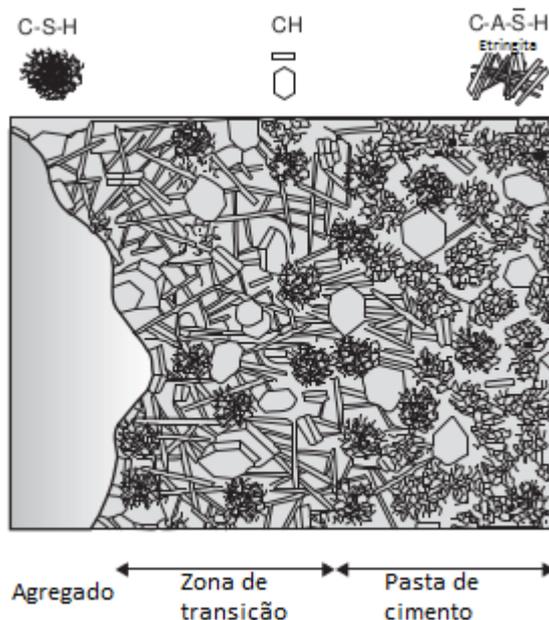


Figura 2.4: Zona de transição em concreto (Mehta e Monteiro, 2006).

Conforme Mehta e Monteiro (2006) após a compactação do concreto fresco, uma pequena película de água é formada em volta dos agregados, em seguida no volume da pasta os íons de cálcio, sulfatos, hidróxidos e alumínio se dissociam produzindo compostos de sulfato de cálcio e aluminato de cálcio, combinando-se para formarem a etringita e o hidróxido de cálcio. Devido ao alto fator A/AGL, estes produtos cristalinos formam grandes cristais na vizinhança dos agregados graúdos, formando assim uma estrutura mais porosa que na região da pasta de cimento ou na matriz de argamassa. Os cristais de hidróxido de cálcio, semelhante a placas, tendem a se formar de forma orientada e perpendicular ao eixo da superfície dos agregados. Com a evolução da hidratação da pasta tem-se que os elementos mal cristalizados de C-S-H, novos cristais de etringita e hidróxido de cálcio começam a preencher os vazios existentes nesta estrutura, fato este que ajuda no incremento da densidade e consequentemente na resistência da zona de transição.

Segundo Monteiro (1985) *apud* Almeida (2006) a espessura e as características da zona de transição variam conforme os componentes da pasta de cimento e do agregado graúdo. Para concretos convencionais, estudos realizados por Sarkar *et al.* (2001) citam o valor 50 μm como espessura média aproximada da zona de transição, já Metha e Monteiro (1994) indicam valores entre 10 μm e 50 μm .

A zona de transição é geralmente responsável pelo rompimento do concreto em níveis de tensão abaixo da resistência dos seus constituintes principais (agregado e argamassa), sendo considerada o elo mais fraco do conjunto. Quando o concreto é tensionado, é na zona de transição que aparecerão as primeiras microfissuras (Metha e Aïtcin, 1990). O que produz a adesão entre os produtos de hidratação e a partícula de agregado são as forças de Van der Waals; portanto a resistência da zona de transição em qualquer ponto depende do volume e tamanho dos vazios presentes Mehta e Monteiro (2006). Isto justifica o fato do concreto apresentar resistências mais baixas nas primeiras idades.

2.5 Adições Mineraias

As adições mineraias são compostos inorgânicos, de origem natural ou artificial, geralmente de natureza silico-aluminosa que ao adicionado ao concreto, promovem melhorias no

desempenho destes materiais frente as variáveis de durabilidade e propriedades mecânicas (Lohtia e Joshi, 1996).

Para Gomes e Barros (2009) as adições minerais são materiais finamente moídos, que são incorporados ao concreto com a finalidade de obter características específicas. Estes são geralmente utilizados em grandes quantidades, com a finalidade de reduzir os custos e melhorar a trabalhabilidade do concreto no estado fresco, podendo até melhorar a sua resistência à fissuração térmica, à expansão álcali-agregado e ao ataque por sulfatos.

Metha e Malhotra (1996) afirmam que a utilização de adições minerais conferem benefícios:

- Ambientais
 - Quando a adição é um resíduo industrial, pois evita que o material seja lançado no ambiente sem nenhuma finalidade benéfica.
- Econômicos
 - Quando é feita em substituição parcial ao cimento, reduzindo o consumo deste e consequentemente o custo do m³ do concreto.
- Tecnológicos
 - Quando a adição melhora as propriedades do concreto nos estados fresco e endurecido.

Tutikian e Dal Molin (2008) classificam as adições minerais, de acordo com sua ação físico-química, como:

- Quimicamente ativas
 - Os materiais utilizados como adição possuem propriedades pozolânicas ou cimentantes. O material pozolânico é definido pela norma NBR 12653 (ABNT, 2012c) como um material que reage quimicamente com o hidróxido de cálcio, produto de hidratação do cimento Portland à temperatura ambiente para formar compostos resistentes. Ou seja, depende da presença do cimento Portland para atuar. Por outro lado, o material cimentante possui, na sua composição, hidróxido de cálcio e

não necessita deste elemento formado durante a hidratação do cimento Portland para gerar o silicato de cálcio hidratado. No entanto, sua auto-hidratação é normalmente lenta e a quantidade de produtos cimentantes formados é insuficiente para aplicação do material para fins estruturais.

- Sem atividade química
 - Os materiais utilizados como adição não apresentam atividade química, tendo um efeito predominantemente físico, podendo este efeito ser desdobrado em três ações principais: o efeito fíler, que é o aumento da densidade da mistura resultante do preenchimento dos vazios pelas minúsculas partículas das adições; o refinamento da estrutura de poros e dos produtos de hidratação do cimento, causado pelas pequenas partículas das adições que podem agir como pontos de nucleação para os produtos de hidratação; e a alteração da microestrutura da zona de transição, reduzindo ou eliminando o acúmulo de água livre que, normalmente, fica retido sob os agregados

Segundo Isaia *et al.* (2009) cada tipo de adição mineral atua de modo distinto, de acordo com a finura, atividade química, física ou ainda quantidade na mistura, tendo em vista que esses fatores proporcionam diferentes interações com a pasta. Alterações do tipo ou teor da adição mineral e da relação A/AGL influem na microestrutura dessas pastas e resultam em comportamento mecânico e de durabilidade distintos (Lohtia e Joshi, 1996).

2.5.1 A reação pozolânica

A grande importância das reações pozolânicas deve-se ao fato das mesmas consumirem o C-H dos produtos de hidratação do cimento e formar o C-S-H secundário (silicato de cálcio hidratado secundário) que possui menor densidade (menor relação cálcio/silicato) quando comparado com o C-S-H formado nas reações de hidratação envolvendo o C_3S e o C_2S . Os produtos secundários de hidratação contribuem para o refinamento dos poros e também promovem o refinamento dos grãos, onde a tendência é ocasionar o preenchimento dos vazios capilares grandes. Assim, aumenta-se a resistência da pasta de cimento e conseqüentemente

da zona de transição pasta/agregado, que é o ponto mais frágil da microestrutura do concreto (Lohtia e Joshi, 1996).

De maneira simplificada a Figura 2.5 apresenta o que ocorre durante uma reação pozolânica na matriz cimentícia.

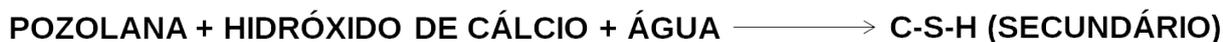


Figura 2.5: Representação simplificada da reação pozolânica (Mehta e Monteiro, 2006).

Para que as reações pozolânicas ocorram de maneira eficiente, as pozolanas devem conter teores elevados de sílica amorfa, pois a mesma possui uma estrutura molecular na qual suas ligações são instáveis e vulneráveis ao hidróxido de cálcio, permitindo a reação entre eles (Mehta e Monteiro, 2006; Moir, 2003).

2.6 Lodo de esgoto

Lodo é uma denominação genérica para os sólidos que se acumulam no sistema de tratamento de esgotos e que devem periodicamente ou continuamente, de acordo com o sistema, serem descartados (Andreoli *et al.*, 1999).

2.6.1 Tipos e características do lodo de esgoto

As características físicas, químicas e biológicas dos lodos gerados em ETE's podem ser muito variadas, sendo consequência do tipo de esgoto afluyente e dos processos de tratamento empregados. Na fase de escolha dos processos de tratamento e disposição final, é importante considerar fatores que serão constituintes do lodo, tais como: matéria orgânica, nutrientes, organismos patogênicos, metais pesados, produtos químicos orgânicos, substâncias tóxicas, dentre outros (Jordão e Pessôa, 2005).

Os diversos tipos de tratamento de esgoto produzem diferentes tipos de lodo, com características próprias conforme é mostrado na Tabela 2.2.

Tabela 2.2: *Características dos lodos de ETE*

Tipo de resíduo	Características
Lodo primário	Lodo obtido por sedimentação do esgoto no decantador primário. Normalmente é cinza e tem odor ofensivo. Pode ser digerido facilmente por via anaeróbia.
Lodos secundário (processo lodos ativados)	Aparência floculada e tons marrons; coloração mais escura indica condições anaeróbias do meio. Tende à decomposição anaeróbia devido ao excesso de matéria orgânica. Pode ser digerido sozinho ou misturado com lodo primário.
Lodo digerido aeróbio (ativado e primário)	Apresenta cor marrom escura e aparência floculada, odor ofensivo. É facilmente drenado.
Lodo digerido anaeróbio (ativado e primário)	Apresenta cor marrom escura ou preta. Se for bem digerido não apresenta odor ofensivo. Também é fácil de ser drenado.

Fonte: Adaptado de Fernandes (1999)

Os lodos de esgotos contém macronutrientes (nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio, enxofre) e, também, micronutrientes (cobre, ferro, zinco, manganês, boro, molibdênio, cloro).

Do ponto de vista sanitário, o lodo gerado no processo de tratamento de esgoto contém bactérias, vírus, protozoários dentre outros microrganismos patogênicos, no entanto este resíduo quando em seu estado seco não é considerado um material perigoso em relação à possibilidade de transmissão de doenças (Jordão e Pessôa, 2005). Outros tipos de substâncias tais como metais pesados, produtos químicos orgânicos e substâncias tóxicas em geral estão associadas à presença de despejos industriais no esgoto e devem ser cuidadosamente avaliadas.

A matéria removida de sistemas de disposição local de esgotos, também conhecidos como sistemas de tanque séptico ou sistemas individuais, é uma mistura de esgotos e denominada de lodo séptico ou resíduo de tanque séptico (Andreoli, 2009).

As Tabelas 2.3 e 2.4 apresentam dados extraídos de referências bibliográficas nacionais e internacionais, respectivamente, referentes à caracterização dos lodos sépticos, cujas concentrações físico-químicas possuem grande variabilidade.

Tabela 2.3: Caracterização de lodos sépticos no Brasil - Valores médios encontrados

Referências	Sólidos totais (mg/L)	Sólidos totais volatéis (mg/L)	Sólidos suspensos totais (mg/L)	Sólidos suspensos volatéis (mg/L)	DBO (mg/L)	DQO (mg/L)	NTK (mg/L)	Amônia (mg/L)	Fósforo total (mg/L)	Óleos e graxas (mg/L)
MENESES et al (2001)	12880	3518	7091	2246	2434	6895	120	89	18	531
CASSINI (2003)	9550	6172	6896	5019	2808	10383	-	116	45	1588
ROCHA E SANT'ANNA (2005)	1631	-	492	-	2829	7912	-	768	112	971
LEITE et al (2006)	9267	4868	-	-	1863	9419	-	-	-	588
TACHINI (2006)	49593	29685	37731	-	11424	23835	-	-	-	-
BELLI FILHO et al (2007)	7186	3413	2064	1087	1890	6199	-	58	90	327

Fonte: Adaptado de Andreoli (2009)

Tabela 2.4: Caracterização de lodos sépticos no mundo - Valores médios encontrados

Referências	Sólidos totais (mg/L)	Sólidos totais volatéis (mg/L)	Sólidos suspensos totais (mg/L)	Sólidos suspensos volatéis (mg/L)	DBO (mg/L)	DQO (mg/L)	NTK (mg/L)	Amônia (mg/L)	Fósforo total (mg/L)	Óleos e graxas (mg/L)
KOLEGA <i>et al</i> (1977)	22400	-	2350	1819	4794	26162	-	72	-	-
SEGALL <i>et al</i> (1979)	11600	8170	9500	7650	5890	19500	410	100	190	-
RUBIN (1991)	(15.000-17.500)	-	-	-	-	9900	-	-	-	-
USEPA (1994)	34106	23100	12862	9027	6480	31900	588	97	210	5600
(*)EUA	40000	25000	15000	-	7000	15000	700	150	250	-
(*)JORDANIA	-	-	2600	-	1600	5750	-	-	-	-
(*)INDONESIA	47000	-	-	-	-	24400	644	-	54	-
(*)THAILANDIA	(15.000-25.000)	-	-	-	(2.500-3.000)	(11.000-51.000)	(280-1.500)	-	-	-
(*)FILIPINAS	31000	31000	-	-	5500	12800	-	209	-	-
(*)NORUEGA	54000	54000	45.000	-	10300	42550	793	113	171	-
GHANA*	-	-	-	-	680	8100	-	-	-	-
POLPRASERT (1996)	34106	23100	12862	-	6480	31900	588	97	210	-
KOOTTATEP <i>et al</i> (2007)	19000	13500	15000	-	2800	17000	1000	350	-	-
LENS <i>et al</i> (2001)	-	-	(7.000-100.000)	-	(2.000-30.000)	(6.000-90.000)	(200-1.500)	(50-150)	(40-300)	-
INGALLINELLA <i>et al</i> (2002)	-	-	10644	5105	1189	5918	215	152	39	-
AIT (2003)	15647	11476	12898	-	2609	16003	1002	396	863	-
METCALF AND EDDY (1995)	40000	-	7091	2246	2434	6895	120	89	18	-

(*) STRAUSS (1995)

Fonte: Adaptado de Andreoli (2009)

2.6.2 Produção do lodo

Os lodos gerados no tratamento de esgotos se apresentam com concentração de sólidos bastante baixa, da ordem de 1 a 5% em peso. Este lodo, seja o removido nas fases de tratamento primário, seja o gerado na fase de tratamento biológico, vai requerer um conjunto de operações específicas, que podem incluir a sequência seguinte, no todo ou em parte (Jordão e Pessôa, 2005; Von Sperling, 1996):

- Preparação: gradeamento, trituração, desarenação, mistura, reservação;
- Adensamento: por gravidade, flotação, centrifugação, filtros de esteira;
- Estabilização: biológica (digestão anaeróbia e aeróbia), estabilização química, tratamento térmico, compostagem;
- Condicionamento: químico, térmico;
- Desidratação: leitos de secagem, lagoas de lodo, filtros prensa, filtros a vácuo, filtros de esteira, centrífugas, secagem térmica;
- Higienização: adição de cal (caleação), tratamento térmico, compostagem, oxidação úmida, outros (radiação gama, solarização etc.);
 - Redução térmica: incineração (incineradores tipo “*multiple hearth*” e de leito fluidizado), co-incineração com resíduos sólidos (lixo), oxidação úmida; e
 - Disposição final: aterros controlados, aplicação no solo para fins agrícolas, recuperação de áreas, incineração, lançamento submarino, uso na indústria da construção civil.

O volume de lodo produzido por um sistema de tratamento depende em si da vazão e das características do lodo tratado, tendo o tipo de tratamento e operação do sistema grande influência nessa produção. Na Tabela 2.5, são apresentadas produção em volume de lodo de várias formas de tratamento. Já a Tabela 2.6, apresenta os valores de produção de lodos em sólidos secos para os processos de tratamento mais comuns.

Tabela 2.5: Volume de lodo produzido nos diversos tipos de tratamento

Tipo de tratamento	Volume de lodo produzido (m ³ /hab/ano)
Lagoa anaeróbia - lagoa facultativa	0,01 a 0,04
Lagoa aerada facultativa	0,03 a 0,08
Lodos ativados convencionais	1,1 a 1,5
Filtro biológico (baixa carga)	0,4 a 0,6
Filtro biológico (alta carga)	1,1 a 1,5
Reator anaeróbio de manta de lodo	0,07 a 0,1
Fossa séptica - filtro anaeróbio	0,07 a 0,1

Fonte: Ferreira *et al.* (1999)

Tabela 2.6: Valores de produção de lodos em sólidos secos.

Lodo	Densidade	Sólidos Secos (Kg/1000 m ³)	
		Faixa	Típico
Primário	1,02	106-165	147
Secundário			
-Filtro biológico	1,025	60-94	70
-Lodo ativado convencional	1,005	70-94	82
-Lodo ativado aeração prolongada	1,015	82-118	94
-Lagoa aerada	1,01	82-118	94

Fonte: Adaptado de Metcalf e Eddy (1991)

2.6.3 Disposição final do lodo

Mesmo após o processo de tratamento, o lodo ainda pode apresentar em sua composição germes patogênicos, metais pesados e outros compostos tóxicos, fatores estes que fazem com que exista uma grande preocupação com relação a sua disposição no meio ambiente. De acordo com Jordão e Pessôa (2005) as principais formas de disposição do lodo são:

- Aterros sanitários;
- Incineração;
- Usos agrícolas, incluindo diversas opções, entre as quais:
 - Aplicação no solo com fins agrícolas;
 - Aplicação em áreas de reflorestamento;
 - Produção de composto ou fertilizante organo-mineral;
 - Restauração de terras;
- Disposição superficial no solo (*Landfarming*);

- Descarga oceânica;
- Uso industrial, com diversas opções:
 - Incorporação do lodo à fabricação de cimento e de produtos cerâmicos.
 - Produção de agregado leve para a construção civil.

Dentre as principais formas de disposição do lodo, tem-se que a utilização de aterros sanitários para tal fim ainda se constitui de uma prática bastante comum por várias nações (Fontes, 2003). Entretanto, esta solução tanto se torna onerosa para a empresa geradora do resíduo quanto para a sociedade, tendo em vista a grande área demandada para este fim. Neste contexto, cresce a opção pela incineração destes lodos como forma de reduzir significativamente os volumes a serem dispostos nos aterros (Geyer, 2001).

Embora a incineração seja considerada atualmente uma das alternativas mais viáveis de disposição dos lodos sépticos, esta não elimina por completo o potencial risco de contaminação ambiental, pois a existência de uma cinza como resíduo da incineração, configura que ainda existe, embora em menor volume, um resíduo a ser disposto e com uma composição que pode ser mais nociva, por aumentar a concentração de alguns compostos perigosos (Geyer, 2001).

Em virtude da redução das áreas disponíveis para aterros sanitários, bem como pela busca de formas ambientalmente mais seguras de disposição dos lodos sépticos, tem crescido a tendência de utilização destes resíduos, tanto em sua forma bruta, estando parcialmente desidratado, quanto na forma de cinzas provenientes da incineração, como insumos alternativos da construção civil.

2.7 Utilização de lodos como insumos na construção civil

A proposição de aproveitamento do Lodo de esgotos domésticos na produção de insumos para a construção civil surgiu da dificuldade que as grandes cidades, principalmente em países desenvolvidos, passaram a enfrentar em dar um destino final aos Lodos gerados, advindo do aumento do tratamento dos esgotos sanitários e, por conseguinte, crescimento do volume de Lodos (Geyer, 2001).

De acordo com Duarte (2008) não existe, no Brasil, uma legislação que regule o uso do lodo como material da construção civil. Contudo, a norma NBR 10004 (ABNT, 2004) pode fornecer parâmetros para a análise do risco ambiental deste tipo de destinação, considerando que os materiais de construção, após o seu uso e consequente demolição, se constituem em resíduo.

A norma NBR 10004 (ABNT, 2004) estabelece os critérios de classificação dos resíduos sólidos de acordo com sua periculosidade. Esta característica é uma função das propriedades físicas, químicas ou infectocontagiosas do resíduo, que resultam em:

- Risco à saúde pública, provocando mortalidade, incidência de doenças ou acentuando seus índices.
- Riscos ao meio ambiente, quando o resíduo for gerenciado de forma inadequada.

Segundo a norma NBR 10004 (ABNT, 2004) os resíduos podem ser classificados como:

- Resíduos Classe I: Perigosos
 - São resíduos que em função de suas propriedades físicas, químicas ou infectocontagiosas, podem oferecer riscos à saúde pública ocasionando um aumento de mortalidade ou incidência de doenças (periculosidade) e/ou riscos ao meio ambiente quando o resíduo é manuseado ou destinado de forma inadequada, ou então, quando o resíduo apresentar uma das seguintes características: inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade.
- Resíduos Classe II A: Não perigosos e não inertes
 - Aqueles que não se enquadram nem nas características da classe I nem da classe II B. Este tipo de resíduo pode apresentar características tais como: combustibilidade, biodegradabilidade ou solubilidade em água.
- Resíduos Classe II B: Não perigosos e inertes
 - São resíduos que quando colocados em contato com a água destilada ou deionizada, à temperatura ambiente, nenhum dos seus constituintes sejam solubilizados

a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, excetuando-se aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor.

De acordo com Santos (2003) as análises de lixiviação, de solubilização e de massa bruta de vários lodos mostraram que estes materiais de forma genérica não são resíduos perigosos, enquadrando-se conforme a norma NBR 10004 (ABNT, 2004) como sendo de classe II A.

Vários estudos tem apontado que a utilização destes resíduos, como insumos alternativos, podem se tornar uma realidade com o passar dos anos, uma vez que a incorporação destes materiais podem trazer benefícios tanto do ponto de vista ambiental como técnico para alguns tipos de aplicações (Brosch, 1975; Cheeseman e Viridi, 2005; Cusidó *et al.*, 1996; Cyr *et al.*, 2007; Duarte, 2008; Fontes *et al.*, 2004; Ingunza *et al.*, 2011, 2013; Monzó *et al.*, 2003; Morales e Agopyan, 1992; Pan *et al.*, 2003; Sayed *et al.*, 1995; Slim e Wakefield, 1991; Tay, 1987; Tay *et al.*, 2002; Tay e Show, 1994). A seguir apresentam-se algumas aplicações do lodo em sua forma bruta e da cinza de lodo de esgoto na indústria da construção civil.

2.7.1 Matéria-prima para fabricação de cerâmica

A informação mais antiga encontrada sobre produção em escala industrial de tijolos utilizando resíduos de tratamento de esgotos refere-se a ETE de Fishwater Flats, Port Elizabeth, na África do Sul. A estação produz cerca de 45 ton/dia de lodo de esgoto, termicamente condicionado e desaguado por centrifugação, sendo este resíduo completamente utilizado na produção de tijolos em uma olaria distante 15 Km da ETE. O lodo é misturado em proporção de 30% em volume à argila para produção de tijolos comuns. As resistências a compressão reportadas para estes tijolos é de 38 MPa, quando as normas do South African Bureau of Standards, requerem no mínimo 14 MPa. Os valores de absorção de água giram em torno de 13%, uma média 30% maior que os tijolos produzidos sem lodo. A porosidade dos tijolos ajuda na aderência da argamassa, não se configurando como um problema (Slim e Wakefield, 1991).

Tay (1987) utilizou em seu trabalho dois tipos de resíduos, lodos digeridos e parcialmente desidratados e cinzas de lodo de esgoto (CLE). Os tijolos feitos com o primeiro resíduo citado apresentaram uma textura pobre e pouco regular, o que impossibilitaria a aplicação dos

mesmos em alvenaria aparente. Quanto ao desempenho mecânico, observou-se que com o acréscimo de lodo os tijolos passaram a perder qualidade sob o ponto de vista da massa específica, resistência à compressão e absorção de água. Já os tijolos executados com cinzas de lodo, em comparação aos executados com lodo natural seco, apresentaram-se vantajoso. Dentre os benefícios observados podem-se citar o melhor desempenho quanto à resistência à compressão, massa específica, absorção de água e fissuramento.

Para determinar o percentual máximo de lodo de esgoto que pode ser incorporado à massa cerâmica, Ingunza *et al.* (2011) fabricaram tijolos cerâmicos maciços em escala real, contendo 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30%, 35% e 40% de lodo em sua composição e os submeteu a ensaios técnicos avaliando suas características estéticas, de percentual de perda de massa, de absorção de água e resistência à compressão, bem como determinando o risco ambiental da utilização deste resíduo. As avaliações técnicas permitiram concluir que a adição de lodo acarretou em perda significativa da massa dos tijolos e que a absorção de água em todas as amostras contendo este resíduo se mostraram superiores aos sem adição. No que se diz respeito a resistência à compressão, tem-se que esta foi significativamente reduzida com a adição de lodo: os tijolos com 5% de lodo tiveram redução de cerca de 45%, os tijolos fabricados com 15 e 20% de lodo tiveram uma redução na ordem de 70%, já as dosagens com adições de lodo superiores a 25% tiveram redução na faixa de 90% de suas resistências em relação aos tijolos contendo 0% de lodo em sua composição. Após os ensaios realizados constatou-se que dosagens com adição superiores a 25% de lodo se mostram inviáveis do ponto de vista técnico. Analisando as duas maiores dosagens que obtiveram aprovação técnica, ou seja, tijolos com dosagens de 15 e 20% de lodo; verificou-se que não há risco de contaminação do meio ambiente com a utilização destes tijolos. Para as condições especificadas nesta pesquisa, constatou-se que a dosagem máxima de lodo que atende aos requisitos técnicos e ambientais é de 20% de adição de lodo à massa cerâmica.

Apesar da resistência ser um dos parâmetros primordiais no controle da qualidade, outros fatores são relevantes na introdução do lodo como componente da indústria cerâmica. O isolamento térmico das construções, conferido pelos materiais cerâmicos, podem promover uma economia de energia para adequação da temperatura, pois dificultam a troca de calor do ambiente interno com o externo (Duarte, 2008).

Esta característica foi o que incentivou a pesquisa de Cusidó *et al.* (1996), a qual consistiu na produção de tijolos cerâmicos de baixa densidade, formados a partir de misturas de argila, serragem e lodo de ETE, denominados Ecobrick®. Como a fração orgânica é volatilizada a altas temperaturas, surgem vazios no interior dos tijolos, tornando-os porosos e consequentemente, favorecendo o isolamento térmico. O resultado deste estudo contido na Tabela 2.7, apresenta uma comparação do consumo teórico de energia para casas construídas com quatro tipos diferentes de alvenarias.

Os autores constataram que a casa construída com paredes de Ecobrick® obteve um melhor aproveitamento da energia solar e consumiu menos energia elétrica para manter a temperatura do ambiente aquecida.

Tabela 2.7: Consumo de energia para quatro tipos de alvenarias

Projeto da alvenaria	FES	CAA (%)
Somente tijolo (e = 30 cm)	26,6	100
Tijolo (e = 15 cm) + Ecobrick® (e = 15 cm)	30,2	83
Parede de isolamento multicamadas (e = 15 cm)	35,6	64
Ecobrick® (e = 29 cm)	40,6	51

FES: Fração de economia solar (ganho útil de calor do sol/perdas térmicas).
 CAA: Consumo de aquecimento auxiliar para manter a temperatura de 21 °C.
 Fonte: Cusidó *et al.* (1996)

2.7.2 Produção de agregado leve

Agregados leves são materiais com elevada porosidade e baixa massa específica. Alguns são encontrados na natureza (diatomita, pedra pomes, escória, cinzas vulcânicas e os tufo); outros são produzidos a partir de subprodutos industriais (cinza volante e escória de alto-forno). Este tipo de material normalmente é empregado para na produção de concretos e blocos leves, filtros, sistemas de drenagem, além de ser um excelente isolante térmico (Cheeseman e Viridi, 2005).

Brosch (1975) produziu este tipo de material utilizando o lodo de esgoto através do processo de sinterização e o aplicou em concreto leve. Segundo o autor, a qualidade do agregado foi considerada satisfatória quanto à resistência à abrasão e ao esmagamento. Já

Morales e Agopyan (1992) estudaram a viabilidade de utilização do lodo de esgoto digerido como fonte de matéria-prima para a obtenção do agregado leve. O resultado do estudo foi compatível com os requisitos e critérios estabelecidos pelas normas brasileiras quanto ao uso de agregado leve para fins de produção de elementos de concreto para alvenaria, concreto estrutural ou para isolamento térmico. O custo de produção do material na época em que a pesquisa foi desenvolvida foi equiparado ao da argila expandida, sendo sua utilização considerada viável.

2.7.3 Matéria-prima na pavimentação

Sayed *et al.* (1995) fizeram uso de cinza de lodo de esgoto como material de enchimento mineral de misturas de concreto asfáltico no Bahrain. Os resultados mostraram que a cinza pode ser empregada como filler, pois todas as especificações de Bahrain para concreto asfáltico foram satisfeitas. Concluíram ainda que o desempenho do resíduo como filler em ambientes quentes é satisfatório, pois a estabilidade e a fluência Marshall testada a elevadas temperaturas de 70º e de 80ºC tiveram bom desempenho.

Ingunza *et al.* (2013) também avaliou a viabilidade de utilização de lodos calcinados como fíler em misturas de concreto asfáltico. Em seu estudo, os lodos oriundos de uma ETE em Natal/RN, tiveram sua granulometria reduzida através de moagem, foram peneirados em peneira de número 200 e a fração passante desta submetida a calcinação em forno mufla durante 3 h a uma temperatura de 900 °C. Foram comparadas misturas de concreto asfáltico utilizando apenas cimento como material de enchimento com misturas contendo lodo calcinado em teores de 1%, 2% e 3% como substituto parcial do cimento. Os resultados mostraram que todas as misturas apresentaram idêntico comportamento mecânico, atendendo as especificações do DNIT. Foi verificado que todas as amostras contendo lodo calcinado apresentaram menor susceptibilidade à umidade, diminuição do volume de vazios e aumento da estabilidade do que as contendo apenas cimento como fíler. Constatou-se que a mistura com 1% de lodo calcinado apresentou melhor desempenho volumétrico e mecânico. No que se diz respeito a análise ambiental, verificou-se que o uso da cinza não oferece risco.

2.7.4 Produção de cimento biológico

Estudos foram realizados por Tay *et al.* (2002); Tay e Show (1994) com o objetivo de aproveitar o lodo de esgoto como material cimentício. O lodo digerido e desidratado foi misturado com a cal e em seguida passaram por vários processos de queima, moagem, peneiramento, até serem transformados em um cimento biológico que foi denominado de “Bio-cimento”. Este novo cimento substituiu parcialmente o cimento Portland na produção de argamassas. A melhor relação lodo:cal sugerida por estes trabalhos foi a de 0,50:0,50, a uma temperatura de queima de 1000 °C com um tempo de residência de 4h. Verificou-se que até 30% de substituição de cimento Portland por “Bio-cimento” a resistência à compressão apresentou valores superiores à argamassa de referência.

2.7.5 Adições minerais em argamassas e concretos

Monzó *et al.* (2003) avaliaram os efeitos na trabalhabilidade das argamassas contendo cinzas de lodo de esgoto (CLE) em teores de 7,5% a 30% em substituição ao cimento, moldadas com diferentes percentuais de superplastificante (SP) e quantidade de água na mistura. Os resultados desta pesquisa, apresentados na Figura 2.6, mostram que à medida em que o teor de SP aumenta, a trabalhabilidade das misturas também aumenta, para um mesmo teor de CLE. Porém, para um mesmo teor de SP, à medida em que se aumenta o teor de CLE a trabalhabilidade foi reduzida. Percebeu-se também, que à medida que a quantidade de água aumentava e o teor de CLE mantinha-se constante, a consistência aumentava. Pôde-se concluir que a substituição parcial de cimento por CLE reduziu a trabalhabilidade. Este fato pode ser explicado, segundo os autores, de duas maneiras: a morfologia irregular da CLE e a alta absorção de água pelas partículas de CLE. O uso de superplastificante proporcionou um aumento da trabalhabilidade das argamassas à medida que o seu teor aumentava.

Pan *et al.* (2003) decidiram verificar a influência da finura da CLE através da moagem, na produção das argamassas. Neste trabalho, pode-se perceber que para um mesmo teor de CLE (20%) em substituição parcial ao cimento, à medida que a finura aumentava, a trabalhabilidade também aumentava. Porém, os seus valores foram inferiores ao da argamassa controle. Segundo os autores, este aumento da trabalhabilidade foi causado pela mudança na

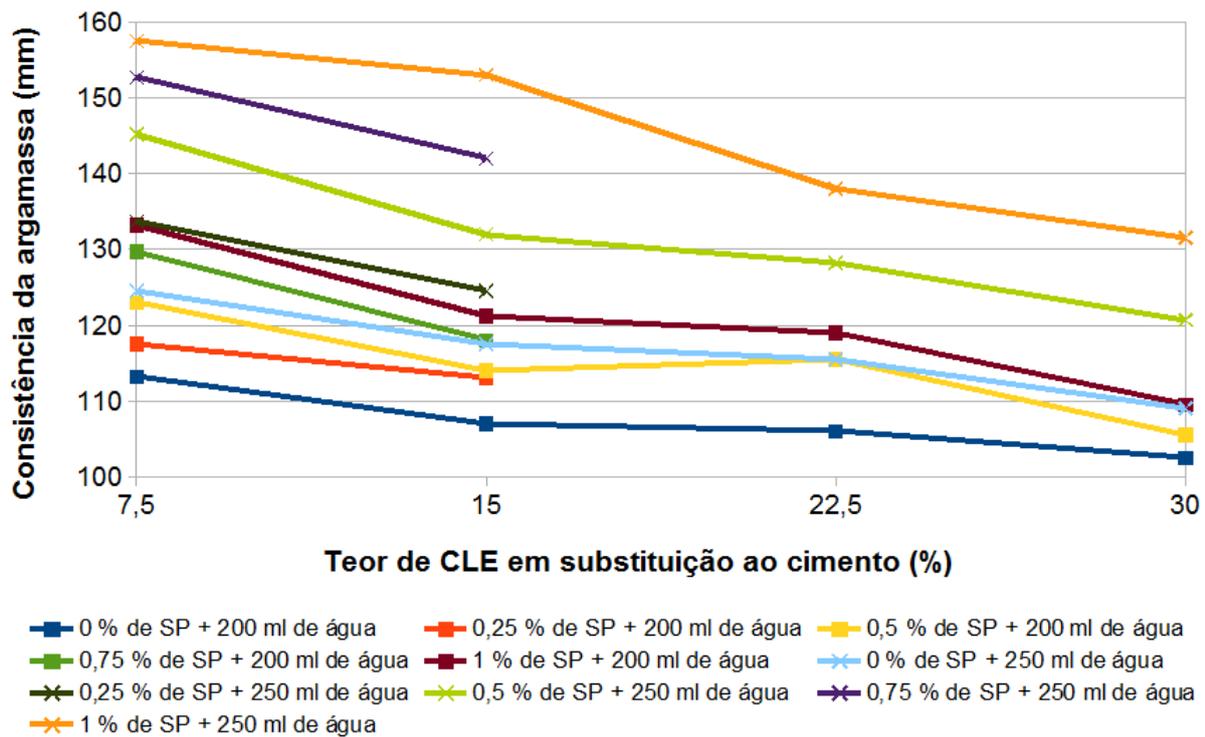


Figura 2.6: Resultados de ensaios de consistência x teor de superplastificante (SP) para argamassas com diferentes teores de água. Fonte: Adaptado de Monzó *et al.* (2003).

morfologia das partículas devido à moagem da cinza, proporcionando um efeito lubrificante. Verificou-se também que a resistência à compressão aumentou com o aumento da finura. Com base nos resultados de resistência à compressão, os autores concluíram que a CLE possui atividade pozolânica.

Fontes *et al.* (2004) avaliou a viabilidade técnica da aplicação das CLE como substituto parcial do cimento em argamassas e concretos de alto desempenho, utilizando teores de incorporação entre 0% e 30% para o primeiro e teores de 0% a 10% para o segundo. Para a resistência à compressão das argamassas os resultados indicaram que a substituição de cimento por cinza de lodo até 30%, aos 28 dias, promoveram uma redução de apenas 10% em relação à mistura sem resíduo incorporado, já no que diz respeito a porosidade total, constatou-se um incremento na ordem de 5% a 22% para todas as amostras contendo o resíduo, entretanto observou-se que a absorvidade destas reduziram em relação a mistura de referência, fato este atribuído ao refinamento de poros causados pela adição das cinzas que reduziram a velocidade de absorção e tornaram as estruturas mais duráveis. Os resultados de resistência à compressão para os concretos de alto desempenho mostraram

que a incorporação de teores de cinzas de lodo até 10% na mistura é viável do ponto de vista técnico, uma vez que não trouxeram alterações significativas nos valores encontrados quando comparados aos padrões. Já os resultados para os ensaios de porosidade e absorção mostraram que apenas as amostras com teores de CLE de 10% tiveram alteração significativa nestas propriedades, seguindo a mesma tendência encontrada nos ensaios com as argamassas. Do ponto de vista ambiental, constatou-se que as cinzas de lodo não foram lixiviadas nem solubilizadas das amostras estudadas, comprovando assim a hipótese do encapsulamento destas na matriz cimentícia e atestando a viabilidade do uso destes resíduos como insumos alternativos na produção de argamassas e concretos.

Cyr *et al.* (2007) efetuou a adição de CLE em teores de 25% e 50% nas composições de argamassas e avaliou as influências destas adições nas propriedades de resistência mecânica, de tempos de pega, trabalhabilidade e atividade pozolânica. Constatou-se através dos ensaios uma perda de trabalhabilidade das argamassas com o incremento de maiores teores de CLE, sendo necessário o aumento da relação água/aglomerante para manutenção do padrão de trabalhabilidade encontrado para as argamassas de referência. O aumento do teor de CLE nas argamassas causaram um retardo no tempo de início e fim de pega das argamassas, fato este atribuído ao menor teor de cimento utilizado nas argamassas, uma vez que parte do aglomerante foi substituído pelo resíduo, como também em virtude de alguns elementos existentes nas CLE que perturbam o processo de hidratação do cimento como o zinco e fósforo. Através dos ensaios mecânicos constatou-se um decréscimo nas resistências com o incremento do teor de CLE nas argamassas, contudo este efeito foi atenuado com o aumento das idades de hidratação das amostras, o que conduz que existe uma leve atividade pozolânica das cinzas com o passar do tempo.

Capítulo 3

Procedimento Experimental

3.1 Coleta do lodo séptico

A Figura 3.1 apresenta o croqui da ETE da empresa Imunizadora Potiguar, situada no município de Macaíba-RN. Esta estação, composta por duas lagoas anaeróbias em série, uma lagoa facultativa, uma lagoa de maturação e um tanque de contato, é destinada para o tratamento dos efluentes provenientes de fossas e tanques sépticos coletados pela empresa na região metropolitana de Natal.



Figura 3.1: Croqui do sistema de tratamento da Imunizadora Potiguar

O lodo séptico utilizado no presente estudo é procedente da primeira lagoa anaeróbia do sistema (referenciada pelo número 2 na Figura 3.1). Este material, retirado através de dragagem nos processos de limpeza de manutenção desta lagoa, é encaminhado para o leito de secagem para operações de desaguamento e secagem do lodo, e posterior descarte em área da empresa utilizada para este fim. Segundo análises ambientais, realizadas pela Imunizadora Potiguar, estes lodos foram classificados conforme a norma NBR:10004 ABNT (2004) como um resíduo classe II A (não perigoso e não inerte).

Tendo em vista a presença de grande quantidade de vegetação no local de descarte destes lodos, como pode ser observado na Figura 3.2, optou-se por realizar uma limpeza superficial e em seguida executar pequenas valas nos pontos de coleta para retirada dos lodos sépticos necessários para composição da amostra a ser utilizada na pesquisa.



Figura 3.2: Coleta do lodo séptico

Após a realização da coleta, submeteu-se o material obtido a desidratação através da exposição direta aos raios solares durante um período de 15 dias. Passado este período, procedeu-se com o armazenamento do resíduo em tambores plásticos dispostos de tampas com o objetivo de evitar a emissão de possíveis odores e proliferação de insetos na amostra.

3.2 Planejamento experimental

O desenvolvimento desta pesquisa ocorreu em duas etapas, sendo elas detalhadas a seguir.

1^o etapa

Nesta etapa, buscou-se verificar a influência gerada pela temperatura empregada na queima de lodos sépticos nas propriedades pozolânicas das cinzas geradas como resíduo deste processo.

A partir da análise termogravimétrica (ATG) e térmica diferencial (ATD) do lodo séptico bruto, verificou-se a faixa de temperatura mais indicada para a realização da queima do material coletado. Uma vez definida a faixa ótima de queima¹, definiu-se três temperaturas a serem utilizadas no processo de obtenção das cinzas de lodo séptico (CLS), sendo estes patamares escolhidos com base em informações obtidas na literatura sobre as temperaturas comumente empregadas em processos de incineração de lodos sépticos.

Após a queima dos lodos sépticos em laboratório e obtenção das CLS nas três temperaturas definidas, submeteram-se estas amostras as análises química por fluorescência de raios X (FRX), mineralógica por difração de raios X (DRX) e por fim a ensaios de determinação do índice de atividade pozolânica (IAP) com cimento.

As análises de ATG, ATD, FRX e DRX foram realizadas no Laboratório de Ensaios de Materiais do Centro de Tecnologia do Gás e Energias Renováveis (CTGÁS-ER). Já os ensaios de determinação do IAP das CLS ocorreram no Laboratório de Materiais de Construção do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN).

2^o etapa

Nesta etapa, buscou-se avaliar as implicações técnicas da utilização de CLS como adição mineral em concretos de cimento Portland, bem como verificar o comportamento microestrutural da zona de transição dos concretos com e sem este resíduo.

Após a obtenção das CLS em forno industrial, bem como a aquisição do cimento e

¹Faixa de temperatura ao qual garante a total eliminação da matéria orgânica.

agregados necessários para confecção dos concretos, submeteram-se estes materiais a caracterização, sendo grande parte destes ensaios realizados no Laboratório de Materiais de Construção do Departamento de Engenharia Civil da UFRN, com exceção das análises de FRX, DRX e microestruturais em microscópio eletrônico de varredura (MEV) realizadas no Laboratório de Ensaios de Materiais do Centro de Tecnologia do Gás e Energias Renováveis (CTGÁS-ER).

A produção do concreto foi realizada no Laboratório de Materiais de Construção do Departamento de Engenharia Civil da UFRN, onde também foi realizado o estudo do comportamento plástico do concreto. Nessa ocasião, foram confeccionados os corpos de prova que serviram como instrumento de estudo das características do concreto no estado endurecido, como índice de vazios, absorção, resistência à compressão axial e comportamento microestrutural.

A caracterização dos concretos tanto no estado fresco como no estado endurecido ocorreram no Laboratório de Materiais de Construção do Departamento de Engenharia Civil da UFRN, com exceção da análise microestrutural, que aconteceu no Laboratório de Ensaios de Materiais do CTGÁS-ER.

Na Figura 3.3 é apresentado esquematicamente o planejamento experimental desta pesquisa.

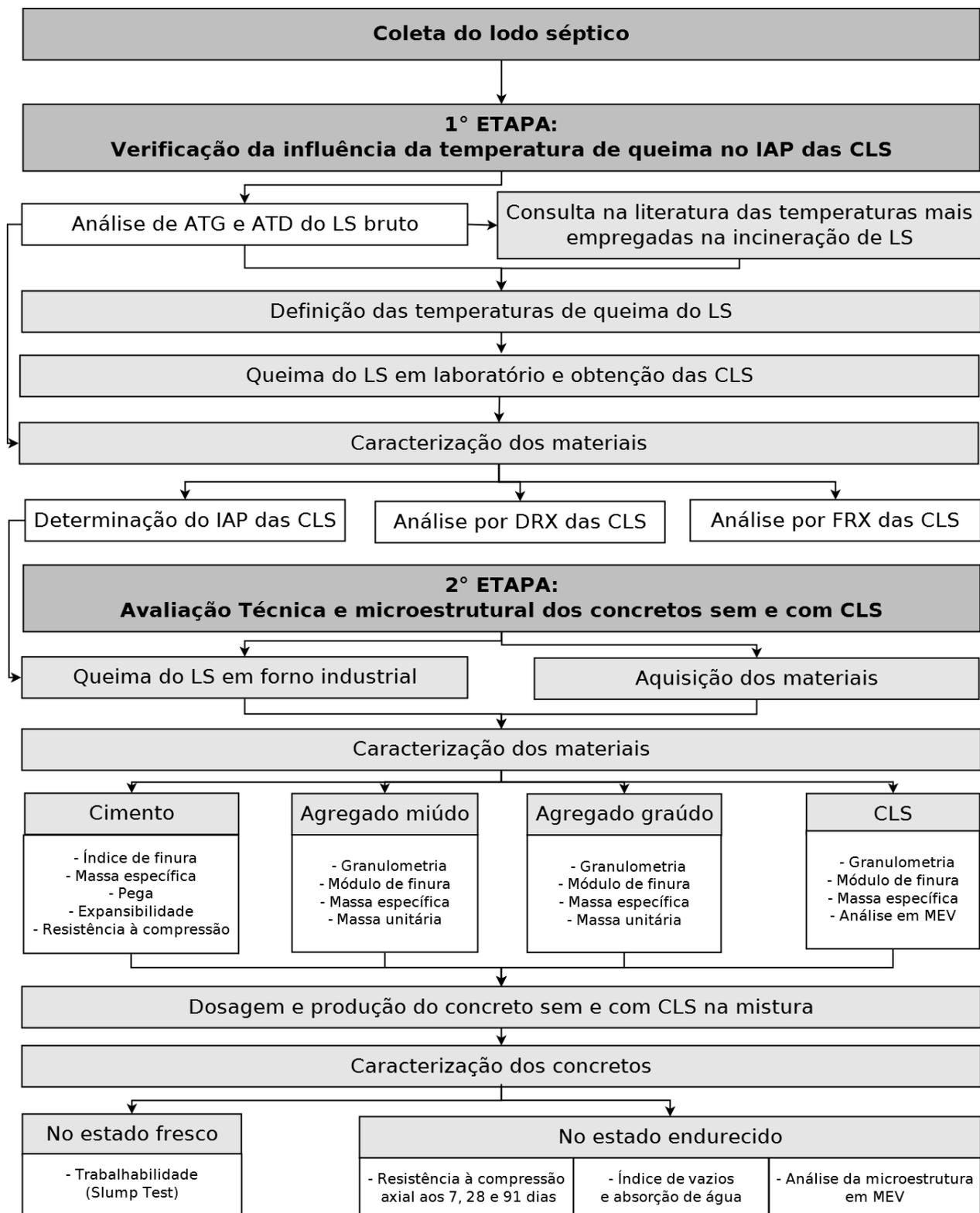


Figura 3.3: Planejamento experimental

3.3 Queima do lodo séptico

3.3.1 Em laboratório

A queima das amostras de lodo séptico bruto em escala laboratorial ocorreram no Laboratório de Materiais de Construção do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, sendo realizada em um forno mufla elétrico da marca EDG, modelo Economic, sob uma taxa de aquecimento de $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ e tempo de permanência de 180 minutos na temperatura estipulada para cada queima (temperaturas definidas conforme resultados apresentados no item 4.1.1).

Após conclusão do período estipulado de queima, procedeu-se com o desligamento do forno, deixando-se este esfriar até uma temperatura aproximada de $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ para então fazer a retirada das CLS. As cinzas obtidas foram submetidas à destorroamento manual utilizando-se grau com pistilo em porcelana, sendo em seguida armazenadas em recipientes plásticos com tampas.

3.3.2 Em forno industrial

Para a obtenção de quantidades satisfatórias de CLS que permitissem a produção dos concretos propostos no item 3.5, optou-se por realizar a queima do lodo séptico em um forno de uma fábrica de produtos cerâmicos situada no município de Goianinha-RN.

Tendo em vista a dificuldade de se interromper a linha de produção apenas para a queima do lodo, realizou-se a queima deste material simultaneamente a uma das fornadas destinadas a produção de tijolos desta empresa, sendo o resíduo disposto na parte central do forno e queimado a uma temperatura de $850\text{ }^{\circ}\text{C}$ ² por período superior a três horas.

²Temperatura empregada pela empresa parceira na queima de seus produtos.

3.4 Caracterização dos materiais

3.4.1 Lodo séptico

Objetivando entender o comportamento do lodo séptico quando submetido a altas temperaturas, bem como definir a faixa de temperatura a ser utilizada para queima destes, submeteu-se o material coletado à análise termogravimétrica (ATG) e térmica diferencial (ATD).

Estas análises foram realizadas no equipamento SDT-Q600 da marca TA Instruments, utilizando-se uma quantidade de 10 mg de lodo séptico bruto em cadinho de platina, para uma faixa de temperatura de 0 °C a 1200 °C, sob uma taxa de aquecimento de 10 °C/min, em atmosfera de ar sintético com vazão do gás a 100 ml/min.

3.4.2 Cinza de lodo séptico

No desenvolvimento deste trabalho foram obtidos quatro tipos de cinzas de lodo séptico, sendo três delas resultantes da queima em laboratório e uma delas resultante da queima em forno industrial. Estas cinzas foram caracterizadas através de:

CLS obtidas a partir da queima em laboratório

- Análise química por fluorescência de raios X (FRX):

As amostras foram analisadas utilizando o equipamento EDX-720 da marca Shimadzu.

Por limitação do método, somente elementos entre Na (11) e U (92) foram analisados.

- Análise mineralógica por difração de raios X (DRX):

As amostras foram analisadas utilizando um equipamento XRD-6000 da marca Shimadzu.

- Ensaio de determinação do índice de atividade pozolânica com cimento:

Conforme a norma NBR 5752 (ABNT, 2012d).

CLS obtidas a partir da queima em forno industrial

- Ensaio de granulometria e módulo de finura:
Conforme a norma NBR NM 248 (ABNT, 2003a).
- Ensaio de determinação da massa específica:
Conforme a norma NBR NM 23 (ABNT, 2001).
- Análise microscópica em MEV:
As cinzas foram analisadas em aparelho da marca Shimadzu SSX – 550 SUPERSCAN.

3.4.3 Cimento

Utilizou-se no desenvolvimento deste trabalho o cimento do tipo Portland pozolânico, de classe 32, resistente a sulfatos e inibidor da reação álcali-agregado (CP IV-32 RS-RRAA), da marca Poty.

A escolha deste cimento deu-se por tratar-se de um tipo comumente comercializado na região metropolitana de Natal-RN, sendo fácil a sua aquisição em qualquer loja de materiais de construção. Foram adquiridos para a pesquisa dois sacos de cimento de 50 Kg, sendo estes estocados conforme as recomendações da ABCP (2002) e caracterizados através dos ensaios de:

- Determinação do índice de finura:
Conforme a norma NBR 11579 (ABNT, 2012a).
- Determinação da massa específica:
Conforme a norma NBR NM 23 (ABNT, 2001).
- Determinação do tempo de início de pega:
Conforme a norma NBR NM 65 (ABNT, 2003b).
- Determinação da expansibilidade a frio:
Conforme a norma NBR 11582 (ABNT, 2012b).
- Determinação da resistência à compressão axial:
Conforme a norma NBR 7215 (ABNT, 1997).

3.4.4 Agregado miúdo

O agregado miúdo utilizado nesta pesquisa foi adquirido através de uma loja de materiais de construção e de procedência, segundo informações repassadas pelo próprio fornecedor, de jazidas localizadas na região metropolitana de Natal-RN.

Foram coletados cerca de 200 Kg de areia, em sacos de aniagem, que após secagem em estufa foram acondicionados em tambores com tampa e guardados em local protegidos de intempéries. Para caracterização deste material foram realizados os ensaios de:

- Granulometria:

Conforme a norma NBR NM 248 (ABNT, 2003a).

- Determinação da massa específica e da massa unitária:

Conforme a norma NBR NM 52 (ABNT, 2009c) e NBR NM 45 respectivamente(ABNT, 2006).

3.4.5 Agregado graúdo

O agregado graúdo utilizado nesta pesquisa foi adquirido através de uma loja de materiais de construção e de procedência, segundo informações repassadas pelo próprio fornecedor, de jazida localizada no município de Macaíba-RN.

Foram coletados cerca de 300 Kg de brita granítica, sendo este insumo estocado em tambores com tampa e guardados em local protegidos de intempéries. Para caracterização deste material foram realizados os ensaios de:

- Granulometria:

Conforme a norma NBR NM 248 (ABNT, 2003a).

- Determinação da massa específica e da massa unitária:

Conforme a norma NBR NM 53 (ABNT, 2009d) e NBR NM 45 respectivamente(ABNT, 2006).

3.4.6 Água

Para o preparo do concreto, foi utilizada água potável do município de Natal-RN, sendo esta coletada nas instalações do Laboratório de Concreto do Departamento de Engenharia Civil da UFRN.

3.5 Dosagem e produção dos concretos com e sem resíduo

3.5.1 Escolha do traço

Os traços dosados para este estudo tiveram proporção em massa de 1:2:3 (cimento: areia: brita), para uma relação A/AGL de 0,65. Esta composição foi escolhida, por se tratar de uma formulação economicamente viável e que facilita o incremento do resíduo estudado sem a necessidade de utilização de aditivos plastificantes na mistura, além de garantir resistências mecânicas satisfatórias para concretos classificados como de classe C20 pela norma NBR 8953 (ABNT, 2011).

Para avaliação das implicações técnicas e ambientais da incorporação de CLS, foram confeccionados concretos contendo adições em teores de 0%, 10%, 20% e 30% deste resíduo em relação a massa de cimento utilizada na mistura. Os concretos produzidos foram identificados conforme o padrão apresentado na Figura 3.4.

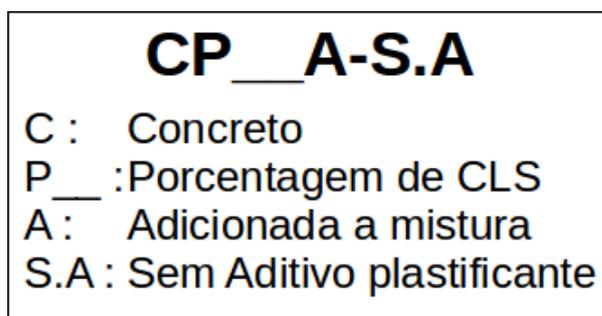


Figura 3.4: Padrão utilizado na identificação dos concretos

A Tabela 3.1 mostra o traço unitário em massa dos concretos produzidos.

Tabela 3.1: Traço unitário em massa dos concreto estudados

Concreto	Cimento	Areia	Brita	Água	CLS
CP00A-S.A	1,00	2,00	3,00	0,65	0,00
CP10A-S.A	1,00	2,00	3,00	0,65	0,10
CP20A-S.A	1,00	2,00	3,00	0,65	0,20
CP30A-S.A	1,00	2,00	3,00	0,65	0,30

3.5.2 Definição da quantidade de corpos de prova

A partir da escolha dos ensaios e análise de caracterização, apresentados na Figura 3.3, a serem realizados nos concretos, efetuou-se nas normas vigentes a consulta das quantidades de amostras mínimas necessárias para realização destes estudos. Na Tabela 3.2 são mostradas as quantidades de corpos de prova (CP's) e suas respectivas aplicações por traço de concreto. Em virtude do tamanho dos agregados utilizados na produção dos concretos, optou-se por efetuar a moldagem dos corpos de prova em moldes cilíndricos de 10 cm de diâmetro por 20 cm de altura.

Tabela 3.2: Quantidade de corpos de prova para as diferentes dosagens

Aplicação	CP's	Norma
Resistência à compressão aos 7 dias	3	NBR 5738 (ABNT, 2008)
Resistência à compressão aos 28 dias	3	
Resistência à compressão aos 91 dias	3	
Índice de vazios e absorção	3	NBR 9778 (ABNT, 2009b)
Análise microscópica	1	—
Reserva	1	—
Total	14	—

3.5.3 Cálculo das quantidade de materiais

O volume de concreto produzido por traço depende da quantidade de cada material, além da massa específica real destes. A partir do traço unitário apresentado no item 3.5.1, utilizou-se um fator multiplicador para aumentar as quantidades dos materiais seguindo a mesma proporção. Dividindo a massa de cada material pela sua massa específica real, respectivamente, tem-se o volume absoluto de cada material e, se somados, correspondem ao volume total de concreto produzido por traço³, como mostra a Tabela 3.3.

³Por questões práticas, desconsiderou-se a contribuição das CLS no cálculo do volume.

Tabela 3.3: *Volume total de concreto produzido por traço*

	Traço em massa			
	Cimento	Areia	Brita	Água
Traço unitário	1,00	2,00	3,00	0,65
Fator multiplicador	9	9	9	9
Traço aumentado	9,00	18,00	27,00	5,85
Massa específica real	2,83	2,61	2,70	1,00
Volume dos materiais	3,18	6,90	10,00	5,85
Volume produzido com esse traço	25,93 litros			
Volume necessário para 14 CP's	22,00 litros			

A estimativa de volume de concreto produzido através da dosagem sugerida na Tabela 3.3, mostra-se suficiente para a realização da moldagem dos 14 corpos de prova propostos no item 3.5.2.

Deste modo, considerando as concentrações de resíduo adotadas (0%, 10%, 20% e 30%) serão produzidos, ao todo, 4 traços de concreto, seguindo as quantidades indicadas na Tabela 3.4.

Tabela 3.4: *Quantidade de material utilizado na produção dos concretos*

Concreto	Quantidade de materiais em Kg				
	Cimento	Areia	Brita	Água	CLS
CP00A-S.A	9,00	18,00	27,00	5,85	0,00
CP10A-S.A	9,00	18,00	27,00	5,85	0,90
CP20A-S.A	9,00	18,00	27,00	5,85	1,80
CP30A-S.A	9,00	18,00	27,00	5,85	2,70
TOTAL	36,00	72,00	108,00	23,40	5,40

3.5.4 Produção dos corpos de prova de concreto

A moldagem e cura dos corpos de prova de concreto foram realizadas de acordo com a norma NBR 5738 (ABNT, 2008).

Os materiais constituintes de cada traço (cimento, areia, brita, resíduo e água) foram medidos individualmente, em balança digital com capacidade de carga de 15.000 g e resolução de 5 g, marca FILIZOLA, modelo CS 15 e dispostos em baldes plásticos até o momento do preparo dos concretos. Para a produção do concreto foi utilizada uma betoneira de eixo inclinado, com capacidade nominal de 120 litros.

A sequência de introdução dos materiais na betoneira e moldagem dos corpos de prova seguiram a seguinte ordem:

- Inicialmente, com a betoneira ligada, colocou-se a metade da água de amassamento.
- Em seguida, introduziu-se o agregado graúdo.
- Logo em seguida, adicionou-se o cimento. Para os traços contendo CLS, realizou-se a incorporação prévia deste resíduo ao cimento em um balde plástico e com o auxílio de uma colher de pedreiro procedeu-se com a homogeneização manual destes materiais .
- Adicionou-se o agregado miúdo.
- Por fim, adicionou-se o restante da água.
- Após a inserção de todos os materiais na betoneira, manteve-se este equipamento em movimento giratório durante 5 minutos, afim de promover a homogeneização da mistura.
- A descarga do concreto fresco foi realizada diretamente em carrinho de mão plástico, com superfície limpa, não absorvente e estanque.
- Após a descarga do concreto fresco, determinou-se o *slump* e em seguida procedeu-se com a moldagem dos corpos de prova para os traços que apresentaram abatimentos superiores a 10 mm. Com os moldes devidamente montados e lubrificados, colocou-se o concreto dentro destes com o auxílio de uma colher de pedreiro.
- O adensamento do concreto foi realizado mecanicamente, com o auxílio de um vibrador de imersão, seguindo a orientação da norma NBR 5738 (ABNT, 2008).
- Após a moldagem, os corpos de prova de concreto foram deixados em repouso durante 24 horas, protegidos do sol e em ambiente ventilado.
- Transcorridas as 24 horas, realizaram-se a retirada dos corpos de prova dos moldes, submetendo-os em seguida ao processo de cura por imersão até a data de realização dos ensaios previstos para as amostras.

3.6 Caracterização dos concretos com e sem resíduo

Os concretos produzidos para o estudo da 2^o etapa foram caracterizados no estado fresco e no estado endurecido, segundo procedimentos descritos a seguir:

3.6.1 No estado fresco

Trabalhabilidade

Para a avaliação da trabalhabilidade dos concretos frescos, determinou-se a consistência destes através do ensaio de abatimento do tronco de cone (slump test) de acordo com as recomendações da norma NBR NM 67 (ABNT, 1998).

3.6.2 No estado endurecido

Resistência à compressão axial

Os ensaios de resistência à compressão axial foram realizados nas idades de 7, 28 e 91 dias, seguindo as prescrições da norma NBR 5739 (ABNT, 2007).

Nas datas de rompimento os corpos de prova foram retirados do tanque de cura, submetidos a processo de regularização das superfícies de carregamento em retífica para concreto e em seguida realizados os rompimentos das amostras em uma máquina de ensaios mecânicos da marca AMSLER, n^o 699/474, com capacidade de carga de 100 toneladas.

Índice de vazios e absorção de água

Os ensaios para determinação do índice de vazios e absorção de água dos concretos foram realizados na idade de 28 dias, seguindo os procedimentos descritos na norma NBR 9778 (ABNT, 2009b).

Avaliação da microestrutura aos 28 dias

Para a realização da análise microestrutural procedeu-se com a visualização de amostras reduzidas dos concretos tipo CP00A-S.A (sem CLS) e CP20A-S.A (com 20% de CLS) na

idade de 28 dias em MEV da marca Shimadzu SSX – 550 SUPERSCAN, tendo como objetivo a verificação de possíveis alterações na estrutura das zonas de transição destas amostras provocadas pela incorporação das CLS nas misturas.

As amostras reduzidas de concreto foram obtidas conforme os procedimentos descritos a seguir:

- Inicialmente, os corpos de prova de 10 cm x 20 cm (diâmetro x altura) de cada tipo de concreto (com e sem CLS) foram serrados⁴ diametralmente, afim de retirar do centro destes uma fatia cilíndrica de altura de 2 cm. Após isto, realizaram-se cortes na direção longitudinal destas fatias, obtendo-se barras prismáticas de dimensões aproximadas de 2 cm x 2 cm x 8 cm.
- Com o intuito de evitar a fratura na zona de transição dos concretos, as amostras em forma de barras foram congeladas com nitrogênio líquido⁵ e depois fraturadas por impacto, com o auxílio de uma talhadeira, obtendo-se amostras de dimensões aproximadas de 2 cm x 2 cm x 2 cm.

Em todas as amostras analisadas buscou-se utilizar os critérios descritos a seguir:

- Com amplitudes variando de 150 a 700 vezes, procurou-se identificar as fases agregado e pasta de cimento, bem como a presença das CLS na constituição do concreto.
- Identificada as principais fases do concreto, com amplitudes de 1.000 a 2.000 vezes, foram escolhidos pontos de visualização no interior da zona de transição buscando encontrar possíveis melhorias nesta estrutura.
- Com amplitudes variando de 4.000 a 10.000 vezes, foram observadas fases características das amostras.
- Em virtude de manutenção do equipamento de espectrometria de energia dispersiva de raios X (EDS), não foi possível realizar a identificação química dos elementos visualizados no MEV, ficando esta análises para realização posterior para complementação do trabalho.

⁴Procedimento realizado no Laboratório de Laminação do Departamento de Geologia da UFRN.

⁵Procedimento realizado no Laboratório de Peneiras Moleculares do Instituto de Química da UFRN.

Capítulo 4

Resultados e discussões

4.1 Caracterização dos materiais

4.1.1 Lodo séptico

Análise térmica diferencial (ATD) e termogravimétrica (ATG)

Na Figura 4.1 é apresentada a ATD do lodo séptico bruto, onde verifica-se a ocorrência de transformações exotérmicas bastante acentuadas entre a faixa de temperatura de 200 °C a 590 °C, tendo seu ponto máximo em aproximadamente 300 °C. Tal comportamento é confirmado através da ATG deste material, como pode ser observado na Figura 4.2, onde é possível constatar uma perda de massa para a temperatura de 590 °C de cerca de 55 % em relação a sua massa inicial, sendo esta redução atribuída a eliminação da matéria orgânica da amostra.

Além disto, visualiza-se na ATG a estabilização da perda de massa dos lodos sépticos a partir de temperaturas de 600 °C, mantendo-se em níveis constantes até a temperatura limite da análise que foi de 1200 °C.

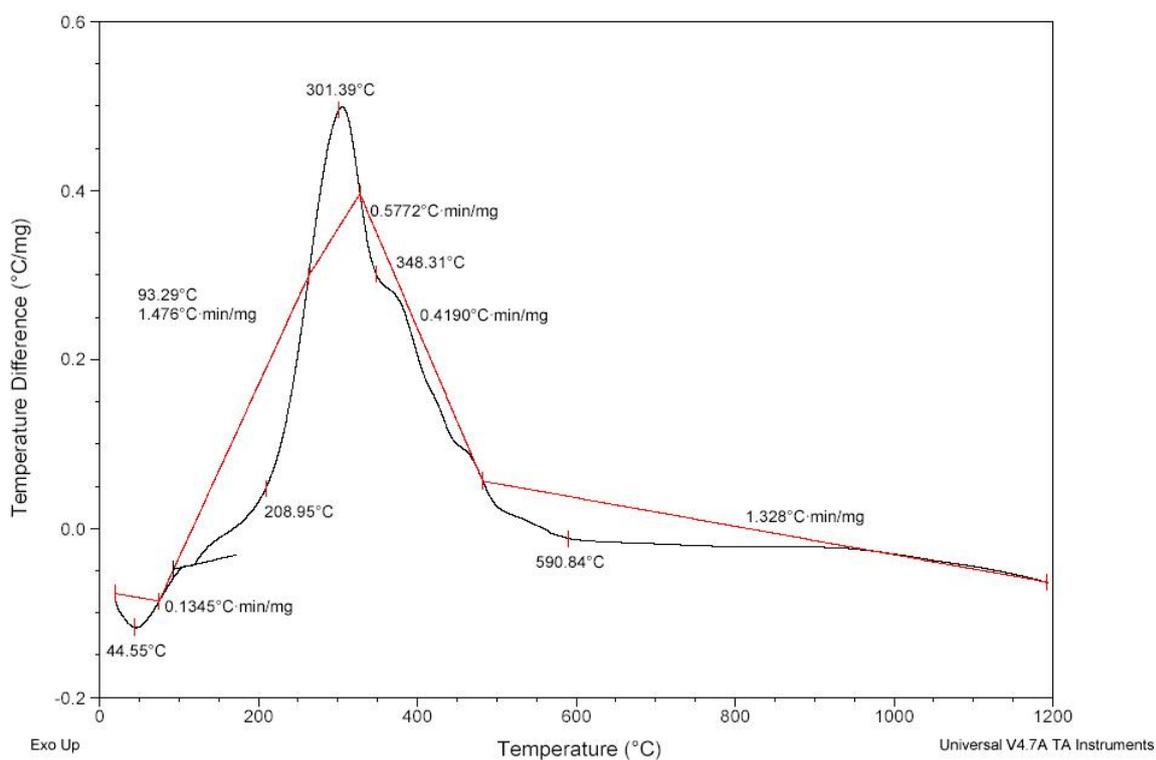


Figura 4.1: Curva de ATD para amostra de lodo séptico bruto

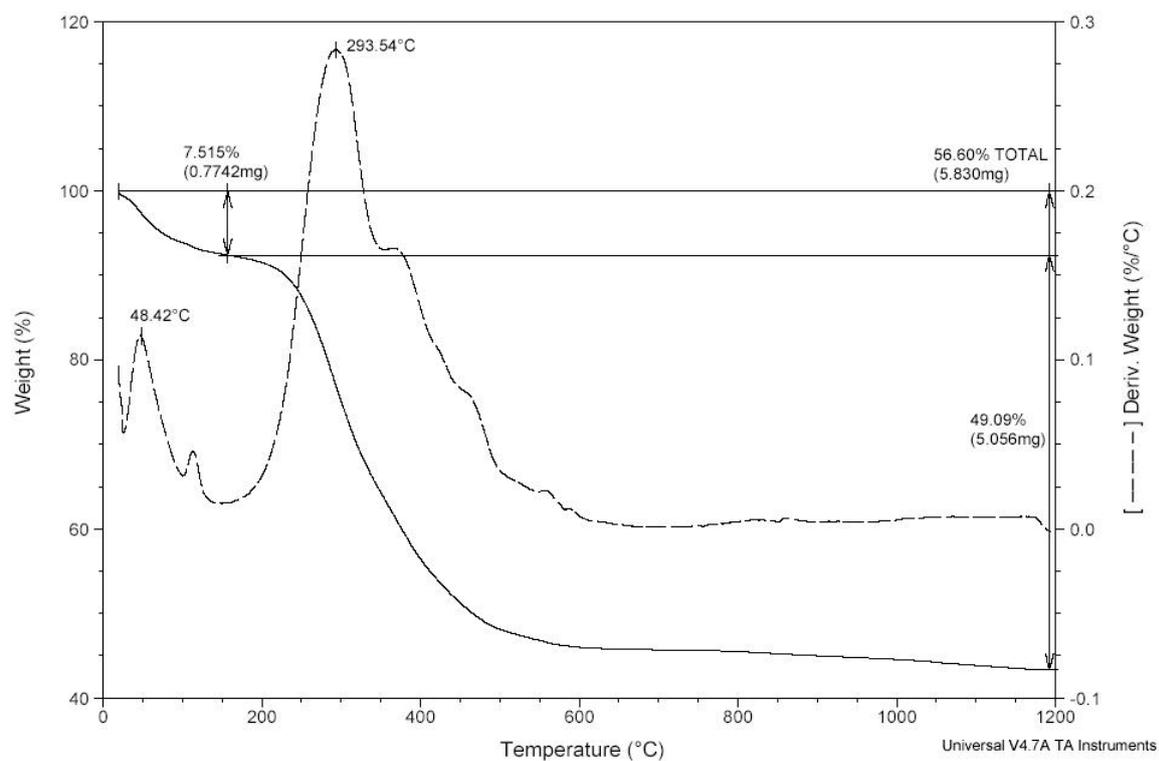


Figura 4.2: Curvas de ATG e DTG para amostra de lodo séptico bruto

Definição das temperaturas de queima em escala laboratorial

Tomando como base os resultados da ATD e ATG do lodo séptico estudado, bem como informações obtidas na literatura (Donatello *et al.*, 2010; Donatello e Cheeseman, 2013; Geyer, 2001) a cerca das temperaturas usualmente empregadas na incineração deste tipo de resíduo, optou-se pela utilização das temperaturas de 700 °C, 800 °C e 900 °C para o processo de queima do lodo séptico em escala laboratorial, segundo as condições apresentadas no item 3.3.1.

O material resultante do processo de queima foi denominado de cinzas de lodo séptico (CLS) e identificado conforme mostrado na Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Identificação das cinzas geradas no processo de queima

Identificação da amostra	Descrição do material
CLS700	Cinzas de lodo séptico obtidas à 700 °C
CLS800	Cinzas de lodo séptico obtidas à 800 °C
CLS900	Cinzas de lodo séptico obtidas à 900 °C

4.1.2 Cinza de lodo séptico

CLS obtidas a partir da queima em laboratório

- Análise química por FRX

Os resultados expressos na Tabela 4.2 mostram que o somatório dos óxidos de ferro (Fe_2O_3), óxidos de alumínio (Al_2O_3) e óxidos de silício (SiO_2) para cada amostra analisada, compõem cerca de 65% dos elementos minerais existentes nestas CLS, teor este que atende a uma das exigências químicas feitas pela norma NBR 12653 (ABNT, 2012c). A citada norma estipula um teor mínimo de 50% destes óxidos para classificar adições como pozolanas de classe E. Além disto, verifica-se que a variação da temperatura de queima dentro da faixa estudada não gera alterações significativas nos percentuais dos elementos minerais contidos nas CLS obtidas.

Tabela 4.2: Resultado da análise de FRX em porcentagem de óxidos

% de Óxidos	CLS700	CLS800	CLS900
SiO₂	33,15	34,94	35,33
Al₂O₃	25,44	26,65	28,65
SO₃	6,19	5,79	4,80
CaO	5,44	5,78	6,54
Fe₂O₃	5,11	5,40	5,80
P₂O₅	4,20	5,21	5,83
MgO	3,78	3,51	3,93
TiO₂	1,14	1,20	1,23
K₂O	0,71	0,74	0,78
ZnO	0,35	0,34	0,36
CuO	0,09	0,09	0,10
MnO	0,04	0,04	0,05
ZrO₂	0,03	0,03	0,03
Cr₂O₃	0,03	0,03	0,03
PbO	0,01	0,01	0,00
SrO	0,01	0,01	0,01
NiO	0,01	0,01	0,01

- Análise mineralógica por DRX

Analisando os difratogramas apresentados na Figura 4.3, referentes as amostras CLS700, CLS800 e CLS900, verificam-se que estes resíduos são predominantemente cristalinos e que o aumento da temperatura utilizada na queima dos lodos sépticos não ocasionam nenhuma alteração significativa em sua estrutura.

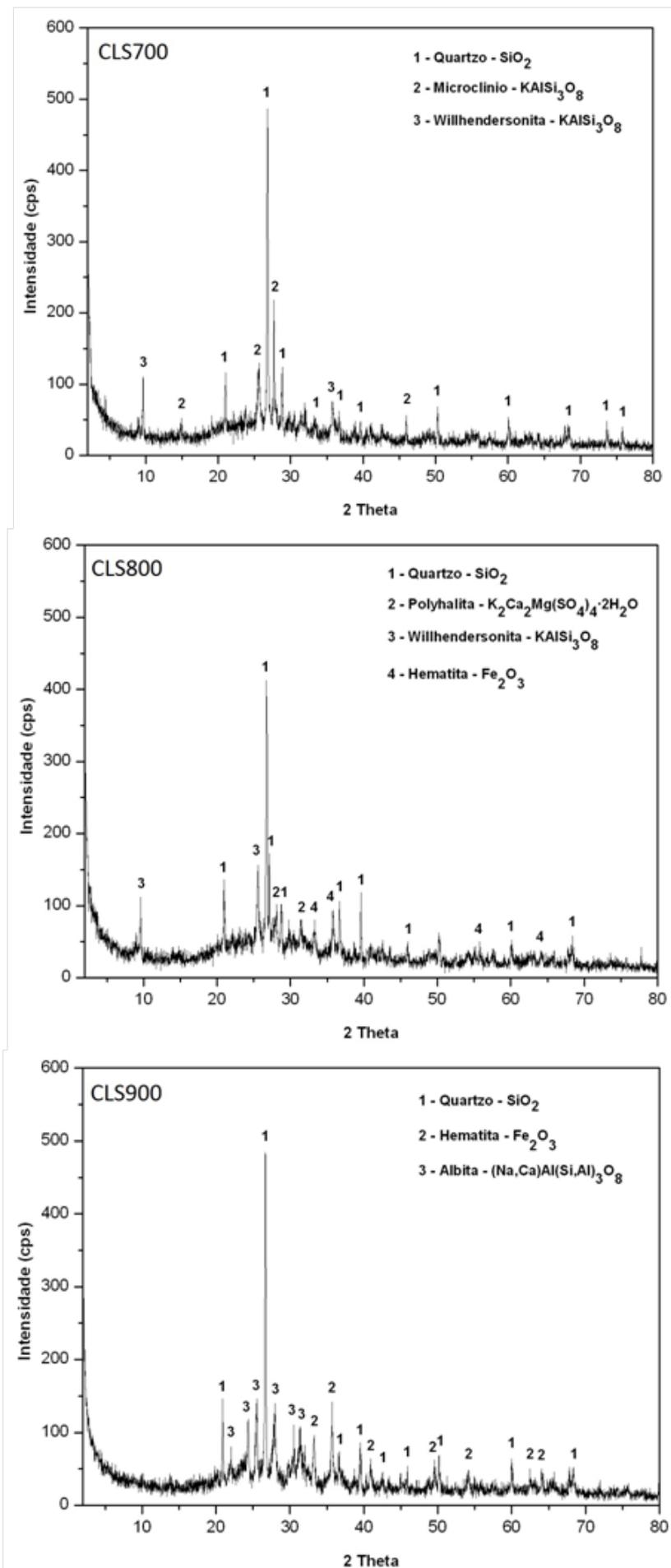


Figura 4.3: DRX das amostras CLS700, CLS800 e CLS900

- Determinação do índice de atividade pozolânica (IAP)

Os índices expressos na Tabela 4.3 sinalizam que nenhuma das três cinzas obtidas possuem propriedades pozolânicas efetivas, não tendo estas atingido o limite mínimo de IAP estipulado pela norma NBR 12653 (ABNT, 2012c), que é de 75%, para que possam ser consideradas como adições pozolânicas.

Tabela 4.3: IAP para as amostras de CLS

Amostra	IAP (%)
CLS700	63,98
CLS800	66,02
CLS900	61,14

CLS obtidas a partir da queima em forno industrial

As CLS resultantes deste processo de queima, identificadas conforme a Tabela 4.4, se mostraram bastante friáveis e de coloração levemente alaranjada, como mostra a Figura 4.4, não se observando nenhuma diferença significativa nos aspectos destas cinzas com as das obtidas a partir da queima em laboratório.

Tabela 4.4: Identificação das cinzas geradas no processo de queima em forno industrial

Identificação da amostra	Descrição do material
CLS850	Cinzas de lodo séptico obtidas à 850 °C

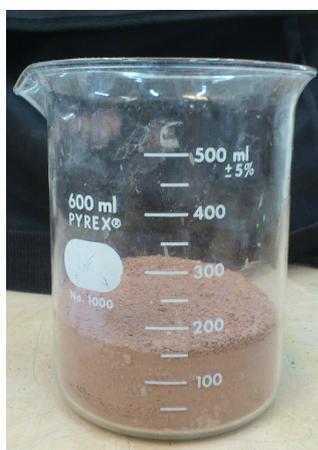


Figura 4.4: Amostra de CLS obtidas em forno industrial

- Granulometria e módulo de finura

Na Tabela 4.5 é expresso o resultado do ensaio de granulometria das CLS850, onde verifica-se que este material possui um diâmetro máximo de 2,4 mm e módulo de finura de 1,3. Na Figura 4.5 é apresentado a curva granulométrica obtida para este resíduo.

Tabela 4.5: Distribuição granulométrica das CLS850

ϕ da peneira (mm)	Material retido		% Acumulada	
	(g)	(%)	Retida	Passante
4,8	0,00	0,00	0,00	100,00
2,4	0,10	0,02	0,02	99,98
1,2	37,50	7,50	7,52	92,48
0,6	62,80	12,56	20,08	79,92
0,3	93,10	18,62	38,70	61,30
0,15	126,50	25,30	64,00	36,00
< 0,15	180,00	36,00	100,00	0,00
TOTAL	500,00	100,00		

Diâmetro máximo (mm)	2,4
Módulo de finura	1,3

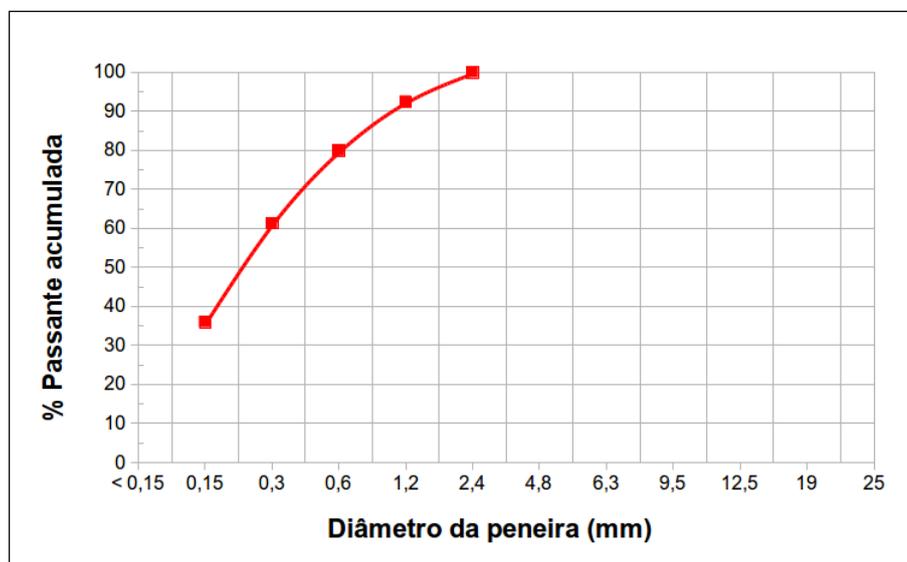


Figura 4.5: Curva granulométrica das CLS850

- Ensaio de determinação da massa específica

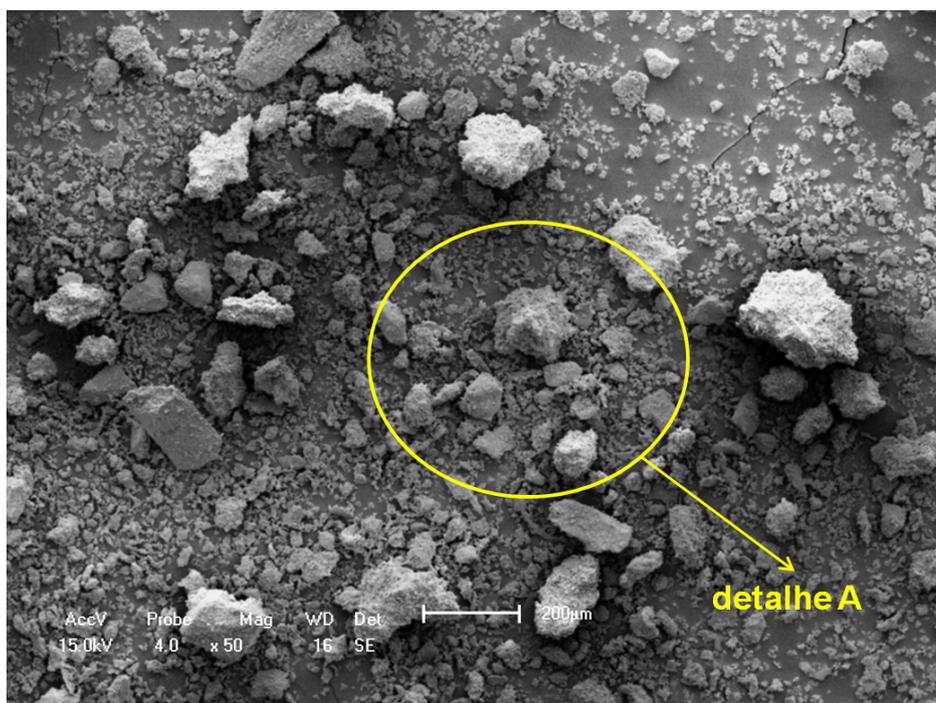
Os resultados encontrados na Tabela 4.6, mostraram que as CLS850 possuem massa específica média de $2,68 \text{ g/cm}^3$.

Tabela 4.6: *Massa específica das CLS850*

	Amostra 1	Amostra 2
Volume inicial (ml)	0,40	0,70
Volume final (ml)	22,90	23,10
Massa da CLS850 (g)	60,00	60,00
Massa específica (g/cm^3)	2,67	2,68
Média (g/cm^3)	2,68	

- Análise microscópica das CLS em MEV

A Figura 4.6 apresenta uma vista geral dos grãos de CLS850. Com esta imagem é possível visualizar uma maior quantidade de grãos menores que $50\ \mu m$, bem como de grãos, em menores teores, entre $50\ \mu m$ e $200\ \mu m$, confirmando assim os resultados expressos na Tabela 4.5 que demonstraram a predominância de partículas de diâmetros inferiores a $300\ \mu m$.

**Figura 4.6:** *Vista geral dos grãos de CLS850*

Ao observar o detalhe A da Figura 4.6, conforme mostrado na Figura 4.7, constata-se que as CLS em estudo são formadas por grãos de morfologia irregular e de aspecto bastante rugoso. A Figura 4.8, obtida a partir da visualização do detalhe B da Figura 4.7, evidenciam estas características encontradas para este resíduo.

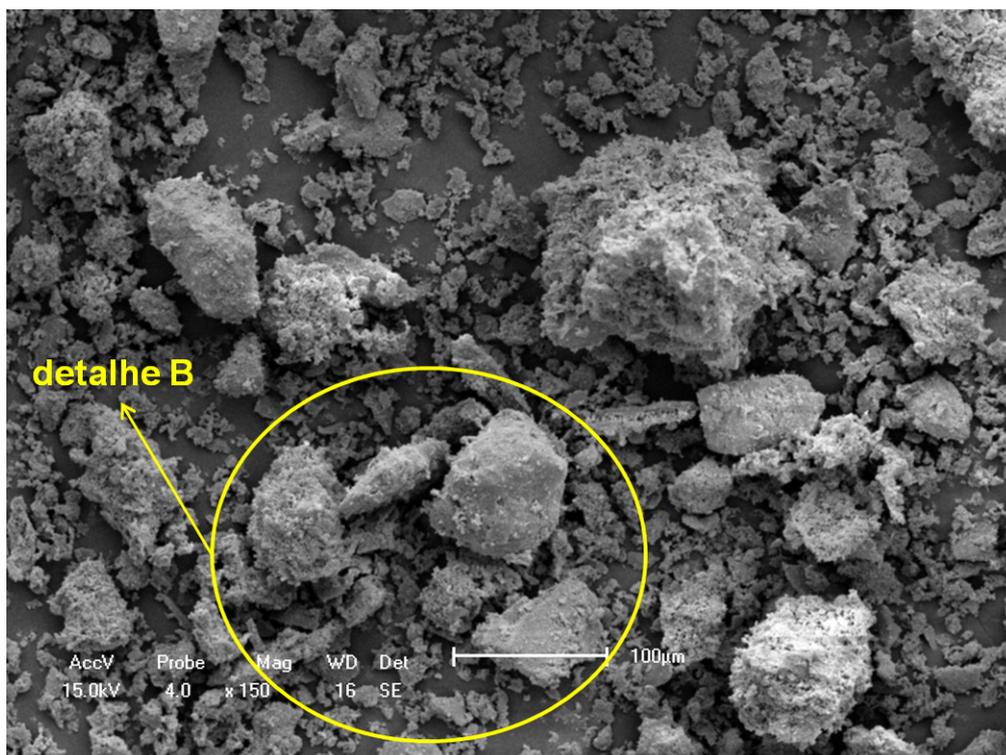


Figura 4.7: Vista dos grãos de CLS850 - detalhe A

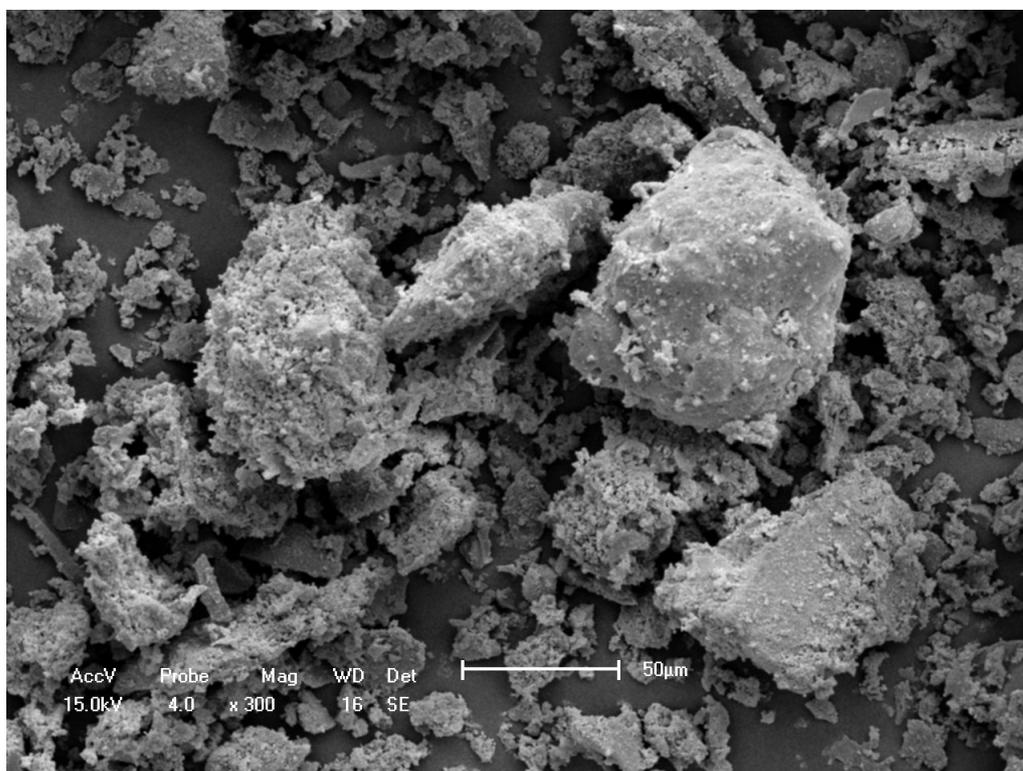


Figura 4.8: Vista dos grãos de CLS850 - detalhe B

4.1.3 Cimento

- Determinação da finura

Os resultados observados na Tabela 4.7 mostram que o aglomerante analisado possui finura média de 0,41%, resultado este em conformidade com os valores sugeridos pela norma NBR 5736 (ABNT, 1999), que estipula para o cimento da classe 32 uma finura máxima de até 8,00%.

Tabela 4.7: *Finura do cimento Portland*

	Amostra 1	Amostra 2
Massa inicial (g)	50,00	50,00
Massa final (g)	0,20	0,21
Finura (%)	0,40	0,42
Média (%)	0,41	

- Determinação da massa específica

A partir dos resultados obtidos na Tabela 4.8, verifica-se uma massa específica média de $2,84 \text{ g/cm}^3$ para o cimento em estudo.

Tabela 4.8: *Massa específica do cimento Portland*

	Amostra 1	Amostra 2
Volume inicial (ml)	0,50	0,00
Volume final (ml)	21,70	21,10
Massa do cimento (g)	60,00	60,00
Massa específica (g/cm^3)	2,83	2,84
Média (g/cm^3)	2,84	

- Determinação do tempo de início de pega

Constatou-se através deste ensaio que o cimento utilizado na pesquisa apresentou um tempo de início de pega de duas horas, conforme pode ser visto na Tabela 4.9, resultado este superior ao tempo mínimo exigido pela norma NBR 5736 (ABNT, 1999) que é de uma hora.

Tabela 4.9: *Início de pega do cimento Portland*

Consistência da pasta	
Água	151,00 g
Cimento	500,00 g
A/AGL	0,30
Pega	
Início do ensaio	14:20 h
Fim do ensaio	16:20 h
Tempo de início de pega	2:00 h

- Determinação da expansibilidade a frio

Os resultados observados na Tabela 4.10 mostram que a expansibilidade média encontrada para este cimento está em conformidade com os limites impostos pela norma NBR 5736 (ABNT, 1999), que é de no máximo 5 mm, para este tipo de ensaio.

Tabela 4.10: *Expansibilidade a frio do cimento Portland*

	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3
Antes (mm)	0,00	0,00	0,00
Depois (mm)	0,85	0,82	0,82
Expansibilidade (mm)	0,85	0,82	0,82
Média (mm)	0,83		

- Determinação da resistência à compressão axial

Os resultados do ensaio de resistência à compressão axial do cimento são apresentados na Tabela 4.11.

Tabela 4.11: *Resistência à compressão axial do cimento Portland aos 3, 7 e 28 dias*

Corpos de prova	Resistência (MPa)		
	3 dias	7 dias	28 dias
CP 01	18,74	26,08	30,66
CP 02	20,22	25,46	32,24
CP 03	19,51	25,62	31,27
CP 04	19,86	25,87	30,91
Média	19,58	25,76	31,27

Embora a resistência à compressão aos 28 dias não tenha alcançado o valor mínimo correspondente à esta classe de cimento, conforme estipula a norma NBR 5736 (ABNT, 1999), tem-se que os valores obtidos nesta idade foram bastante próximos, não comprometendo a resistência final dos concretos moldados.

4.1.4 Agregado miúdo

- Granulometria e módulo de finura

Na Tabela 4.12 é expresso o resultado do ensaio de granulometria da areia, onde verifica-se que este material possui um diâmetro máximo de 4,8 mm e módulo de finura de 2,1.

Tabela 4.12: *Distribuição granulométrica do agregado miúdo*

ϕ da peneira (mm)	Material retido		% Acumulada	
	(g)	(%)	Retida	Passante
4,8	23,94	4,79	4,79	95,21
2,4	19,04	3,81	8,60	91,40
1,2	37,34	7,47	16,07	83,93
0,6	70,04	14,01	30,07	69,93
0,3	118,24	23,65	53,72	46,28
0,15	189,44	37,89	91,61	8,39
$\phi < 0,15$	41,94	8,39	100,00	0,00
TOTAL	500,00	100,00		
Diâmetro máximo (mm)	4,8			
Módulo de finura	2,1			

Embora a areia tenha apresentado um diâmetro máximo e um módulo de finura superior ao das CLS850, verifica-se através da Figura 4.9 que estes materiais possuem distribuições granulométricas bastante próximas, diferindo-se em maior proporção apenas no teor de grãos menores que 0,15 mm que se apresentam em maior quantidade no resíduo em estudo.

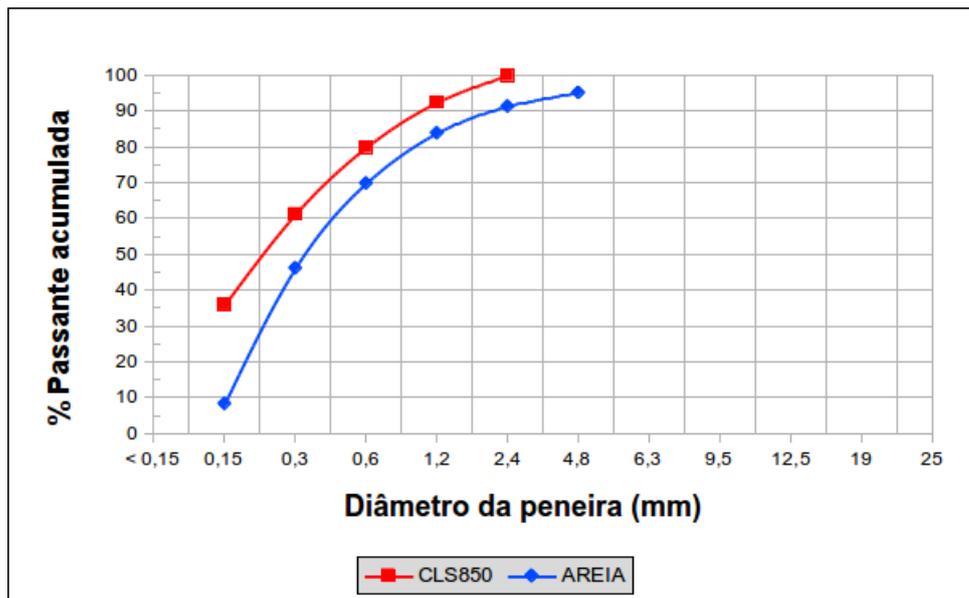


Figura 4.9: Curva granulométrica do agregado miúdo e das CLS850

- Determinação da massa específica e da massa unitária

Os resultados encontrados na Tabela 4.13, mostram que o agregado miúdo possui massa específica média de $2,61 \text{ g/cm}^3$ e massa unitária de $1,38 \text{ g/cm}^3$.

Tabela 4.13: Massa específica e unitária do agregado miúdo

Massa específica (g/cm^3)	2,61
Massa unitária (g/cm^3)	1,38

4.1.5 Agregado graúdo

- Granulometria e módulo de finura

Na Tabela 4.14 é expresso o resultado do ensaio de granulometria da brita, onde verifica-se que este material possui um diâmetro máximo de 19,0 mm e módulo de finura de 6,09. Na Figura 4.10 é apresentado a curva granulométrica obtida para este material.

Tabela 4.14: Distribuição granulométrica do agregado graúdo

ϕ da peneira (mm)	Material retido		% Acumulada	
	(g)	(%)	Retida	Passante
19,0	132,50	2,65	2,65	97,35
12,5	2032,50	40,65	43,30	56,70
9,5	2252,50	45,05	88,35	11,65
6,3	407,50	8,15	96,50	3,50
4,8	112,50	2,25	98,75	1,25
2,4	62,50	1,25	100,00	0,00
1,2	0,00	0,00	100,00	0,00
0,6	0,00	0,00	100,00	0,00
0,3	0,00	0,00	100,00	0,00
0,15	0,00	0,00	100,00	0,00
$\phi < 0,15$	0,00	0,00	100,00	0,00
TOTAL	5000,00	100,00		

Diâmetro máximo (mm)	19,0
Módulo de finura	6,09

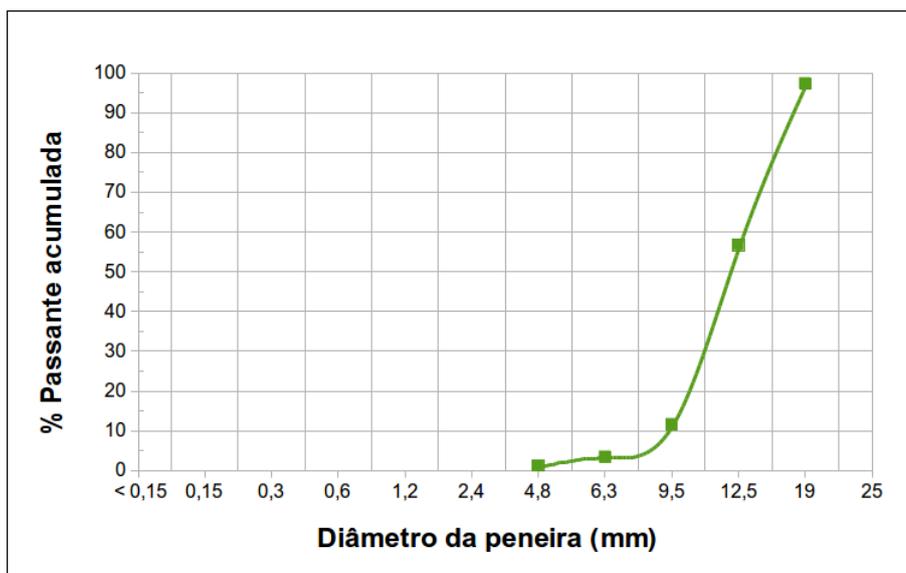


Figura 4.10: Curva granulométrica do agregado graúdo

- Determinação da massa específica e da massa unitária

Os resultados encontrados na Tabela 4.15, mostram que o agregado graúdo possui massa específica média de $2,70 \text{ g/cm}^3$ e massa unitária de $1,41 \text{ g/cm}^3$.

Tabela 4.15: Massa específica e unitária do agregado graúdo

Massa específica (g/cm^3)	2,70
Massa unitária (g/cm^3)	1,41

4.2 Caracterização dos concretos com e sem resíduo

4.2.1 No estado fresco

Trabalhabilidade

Imediatamente após a produção dos concretos, determinou-se a trabalhabilidade de cada um destes, obtendo como resultados os abatimentos expressos na Tabela 4.16.

Tabela 4.16: Trabalhabilidade dos concretos produzidos

Concreto	Abatimento (mm)
CP00A-S.A	180,00
CP10A-S.A	125,00
CP20A-S.A	30,00
CP30A-S.A	0,00

Assim como observado nos experimentos realizados por Monzó *et al.* (2003) e Cyr *et al.* (2007), que identificaram um decréscimo da trabalhabilidade nas argamassas com o incremento do teor de cinzas de lodo de esgoto em suas misturas, verifica-se com os resultados da Tabela 4.16 que o aumento do teor de CLS também reduz significativamente a trabalhabilidade dos concretos, tendenciando estes a abatimentos muito baixos para teores de adição superiores a 20%. Este comportamento, melhor visualizado na Figura 4.11, pode ser atribuído principalmente a fatores como:

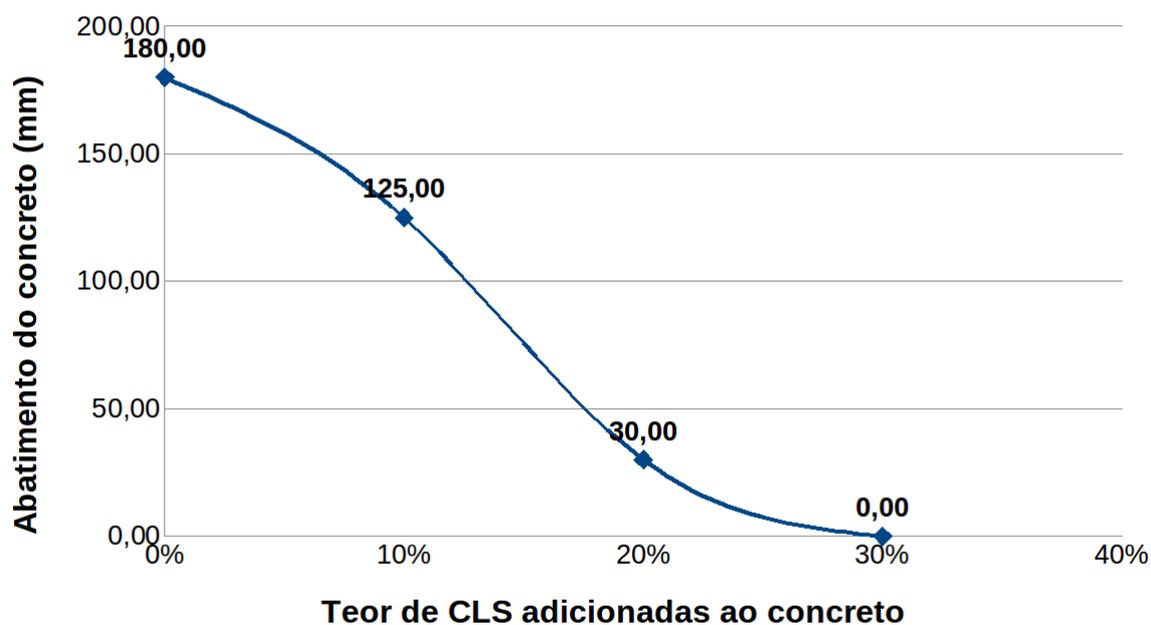


Figura 4.11: *Trabalhabilidade em função do teor de CLS adicionada aos concretos*

- A natureza higroscópica das CLS, causada por suas características de granulometria e morfologia dos grãos, já apresentadas nas Figuras 4.7 e 4.8, que contribuíram para que este resíduo atuasse nestas matrizes cimentícias como estruturas absorventes da água livre (decorrente da elevada relação A/AGL utilizada) e conseqüentemente reduzindo a trabalhabilidade destas misturas.
- A forma de incorporação destas cinzas, onde optou-se por acrescentá-las aos materiais sólidos constituintes (cimento, areia e brita) ao contrário de utilizá-las em substituição parcial de algum destes, contribuindo com isso para uma pequena diminuição da relação água/materiais secos¹ destas misturas e conseqüentemente tornando-as menos fluídas que os concretos sem a adição do resíduo estudado.

Após a realização destes ensaios, procedeu-se com a moldagem² dos corpos de prova de cada traço produzido, com exceção do concreto CP30A-S.A que foi descartado por não apresentar trabalhabilidade mínima suficiente para execução deste procedimento.

Na Figura 4.12 é possível observar o aspecto visual dos quatro concretos imediatamente após a determinação da trabalhabilidade.

¹Relação entre a quantidade de água e a soma de todos os materiais secos empregados na mistura.

²Conforme quantidade de CP's especificados no item 3.5.2.



Figura 4.12: Aspecto visual dos concretos com e sem adição de CLS

4.2.2 No estado endurecido

Resistência à compressão axial

Foram obtidos nos ensaios de resistência à compressão os valores expressos na Tabela 4.17.

Tabela 4.17: Resistência à compressão aos 7, 28 e 91 dias

Concreto	CP	Resistência em MPa		
		7 Dias	28 Dias	91 Dias
CP00A-S.A	1	14,01	16,17	20,24
	2	12,73	17,83	16,68
	3	14,13	16,17	17,19
	Média	13,62	16,17	18,04
CP10A-S.A	1	19,48	25,46	24,70
	2	16,55	23,68	21,77
	3	17,83	25,85	24,32
	Média	17,95	25,00	23,60
CP20A-S.A	1	23,94	27,76	27,88
	2	22,66	29,92	27,63
	3	22,66	28,90	28,90
	Média	23,09	28,86	28,14
CP30A-S.A	S / CP	nd	nd	nd

S / CP: Não houve moldagem de CP's

nd: Não determinado

Estes resultados mostram que o concreto CP00A-S.A apresentou uma média de resistência à compressão axial aos 28 dias bem abaixo de 20 MPa, resistência almejada para este traço, só alcançando este patamar em um único CP ensaiado aos 91 dias.

A baixa resistência do concreto CP00A-S.A pode ter sido ocasionada pela alta relação A/AGL utilizada na confecção dos traços em estudo, que provocou neste concreto perda significativa na coesão da mistura, visto na Figura 4.12, como também elevada exsudação nas amostras moldadas, como pode ser observado na Figura 4.13, resultando em corpos de prova de elevada porosidade e conseqüentemente menos resistentes.

Constata-se através dos dados apresentados na Tabela 4.17, que a adição de CLS atuou de forma benéfica no aumento da resistência dos concretos contendo 10% e 20% deste resíduo, tendo ambas amostras atingido patamares de resistência superiores aos do concreto CP00A-S.A em todas as idades de controle.



Figura 4.13: Exsudação nos CP's do concreto CP00A-S.A

A Figura 4.14 apresenta o gráfico de evolução das resistências dos concretos estudados ao longo das idades de controle.

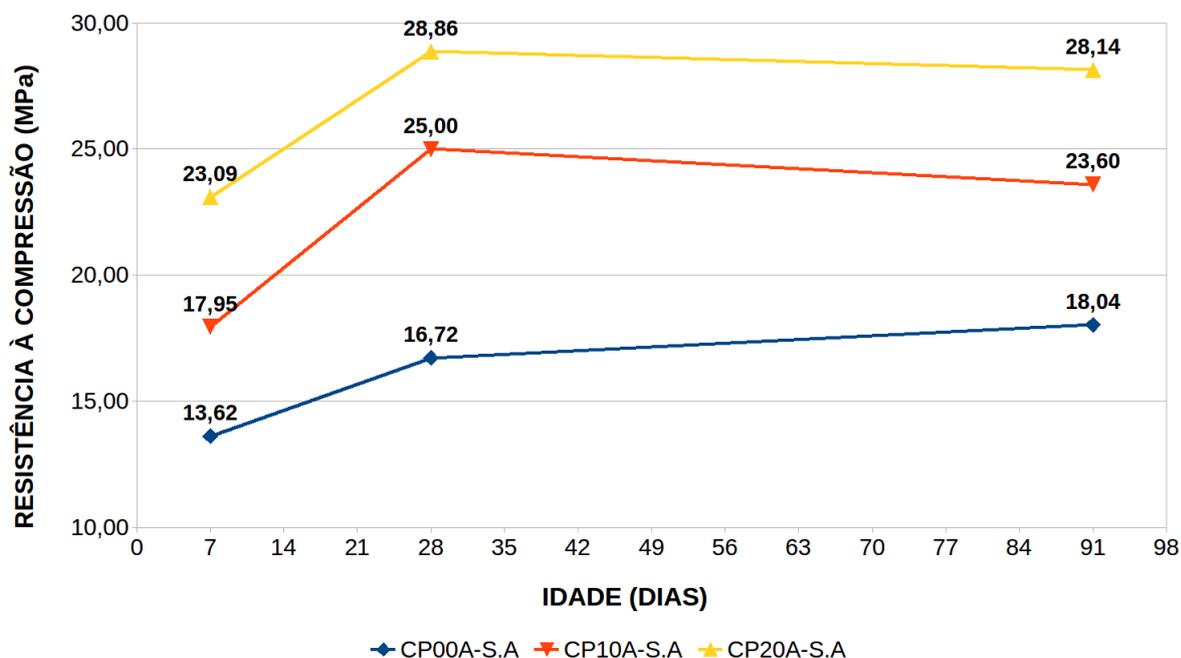


Figura 4.14: Evolução da resistência à compressão dos concretos produzidos

Através deste gráfico, verifica-se um incremento nas resistências à compressão dos 7 aos 28 dias de cerca de 23% para o concreto CP00A-S.A, 39% para o concreto CP10A-S.A e 25% para o concreto CP20A-S.A. Já dos 28 aos 91 dias, observa-se que o concreto CP00A-S.A mantém uma tendência ascendente de resistência em torno de 8%, ao contrário dos concretos CP10A-S.A e CP20A-S.A que apresentaram um decréscimo em suas resistências de aproximadamente 6% e 3%, respectivamente, podendo tal comportamento indicar um possível comprometimento da durabilidade destas amostras provocadas pelo uso das CLS.

Índice de vazios e absorção de água

A Figura 4.15 apresenta os resultados dos ensaios de determinação do índice de vazios e absorção de água para os concretos em estudo.

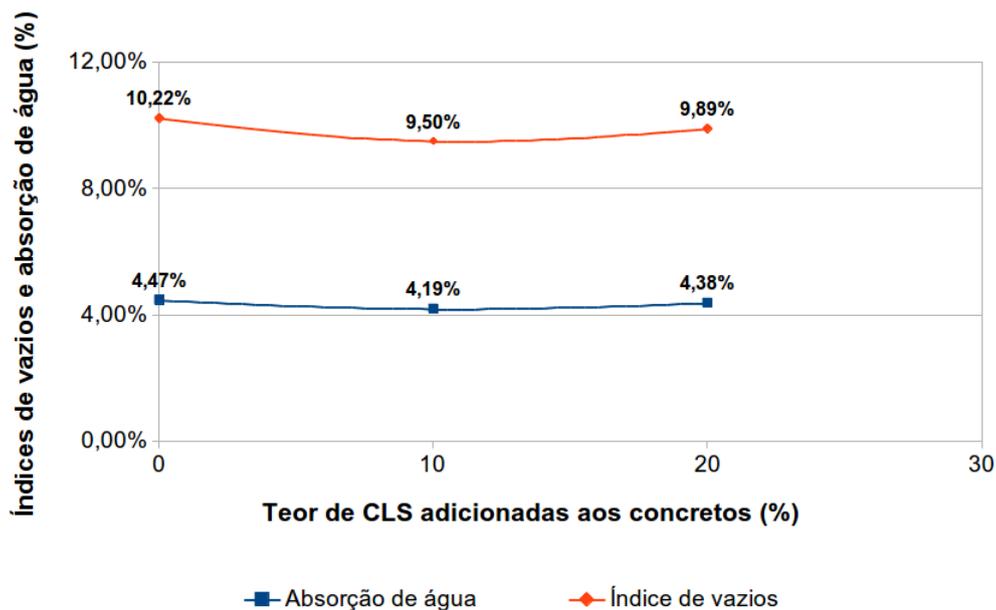


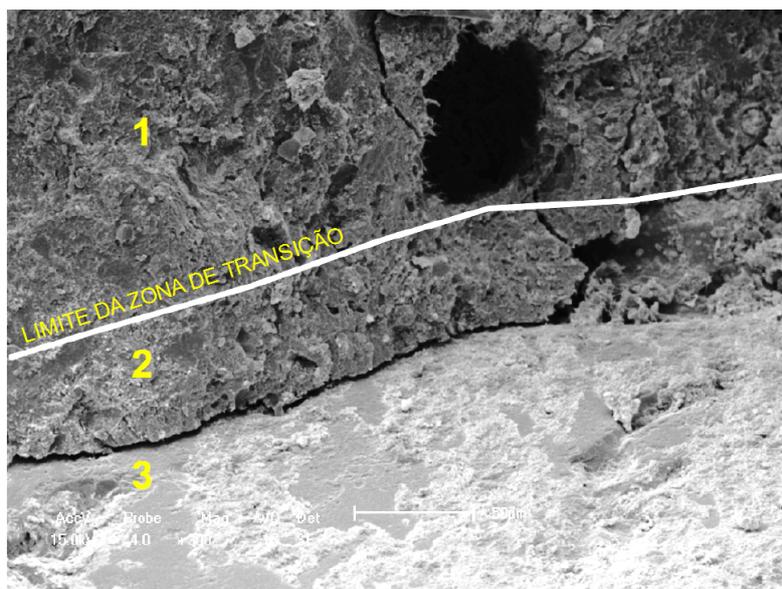
Figura 4.15: Absorção e índice de vazios em função do teor de CLS adicionadas aos concretos

Tomando o concreto CP00A-S.A (com 0% de incorporação) como referência, verifica-se que a inserção de 10% de CLS causou um decréscimo de cerca de 7% para o índice de vazios e de 6% para absorção de água destes concretos, já com a inserção de 20% deste resíduo percebeu-se uma redução de aproximadamente 3% para o índice de vazios e de 2% para absorção de água.

Com estes resultados confirmou-se a expectativa de obtenção de uma alta porosidade para a amostra contendo 0% de resíduo, tendo este parâmetro influenciado diretamente na resistência à compressão deste concreto. Além disso, constatou-se que a incorporação de CLS nos concretos ocasionaram uma redução no índice de vazios e absorção de água destas amostras bastante discretas, porém suficientes para conferirem aos corpos de prova melhores resistências à compressão.

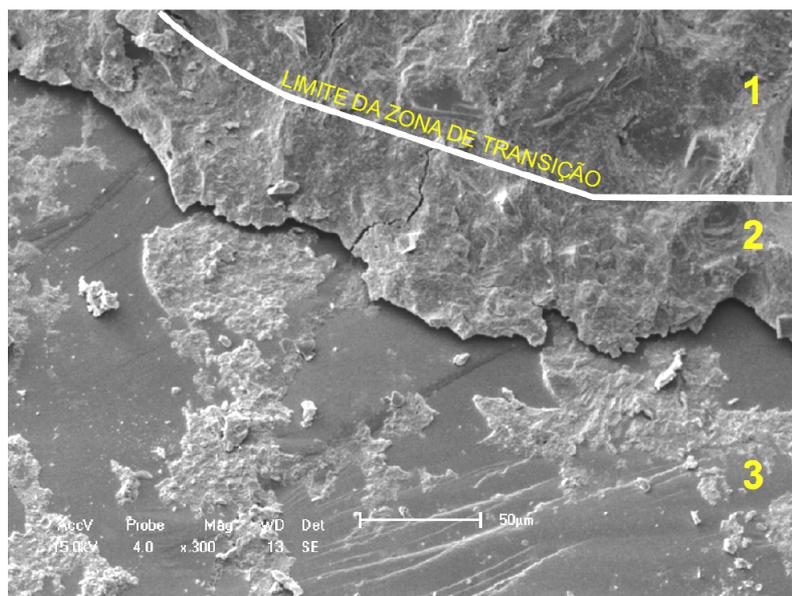
Avaliação da microestrutura aos 28 dias

A Figura 4.16 e a Figura 4.17 referem-se as micrografias obtidas dos concretos CP00A-S.A e CP20A-S.A, respectivamente. Nestas figuras, conseguiu-se identificar as fases correspondentes a pasta de cimento (região 1), a zona de transição³ (região 2) e ao agregado graúdo (região 3) destes concretos.



1: Pasta de cimento – 2: Zona de transição – 3: Agregado graúdo

Figura 4.16: Microestrutura do concreto CP00A-S.A - identificação das principais fases

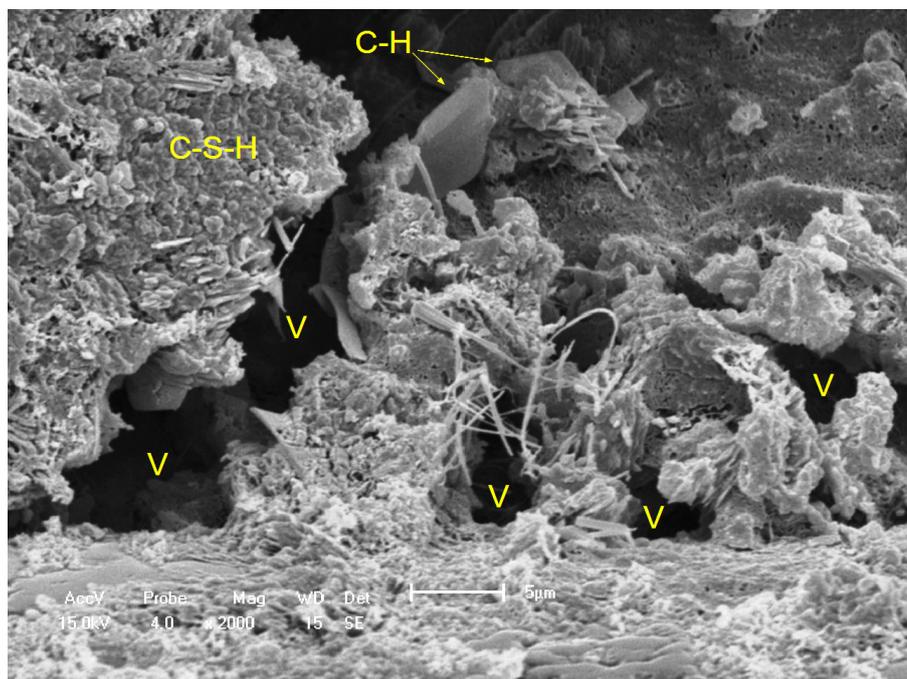


1: Pasta de cimento – 2: Zona de transição – 3: Agregado graúdo

Figura 4.17: Microestrutura do concreto CP20A-S.A - identificação das principais fases

³Considerou-se como espessura média o valor de 50 μm , conforme exposto no item 2.4 deste trabalho.

A Figura 4.18 apresenta uma visualização do interior da zona de transição do concreto CP00A-S.A.

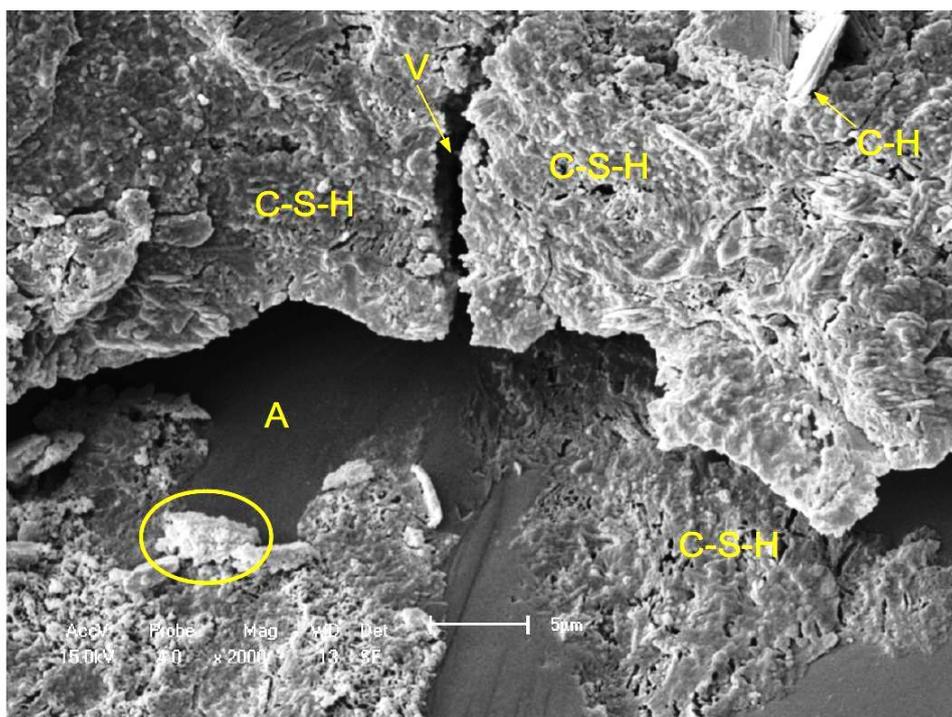


C-S-H: Silicato de cálcio hidratado – C-H: Hidróxido de cálcio – V: Vazios

Figura 4.18: Microestrutura da zona de transição do concreto CP00A-S.A

Na Figura 4.18 é possível observar que o concreto sem resíduo apresentou uma zona de transição formada por grandes cristais de hidróxido de cálcio, além de apresentar uma elevada porosidade em sua estrutura, fatores estes que tendem a causar a fragilização deste concreto tanto do ponto de vista mecânico quanto da durabilidade. Por sua vez, a Figura 4.19 que corresponde a visualização feita no interior da zona de transição do concreto CP20A-S.A, mostra que o concreto com resíduo apresentou uma zona de transição mais densa e menos porosa, composta basicamente por cristais de C-S-H, podendo ser visto em detalhe na Figura 4.20, o que pode explicar a melhora significativa das resistências mecânicas à compressão dos concretos com CLS em comparação aos sem CLS.

A partícula em destaque na Figura 4.19 apresentou morfologia e características semelhantes as do resíduo estudado, contudo em virtude da impossibilidade da realização da análise espectroscópica não foi possível confirmar quimicamente se este material tratava-se realmente de um grão de CLS.



**C-S-H: Silicato de cálcio hidratado – C-H: Hidróxido de cálcio
– A: Agregado graúdo – V: Vazios**

Figura 4.19: Microestrutura da zona de transição do concreto CP20A-S.A

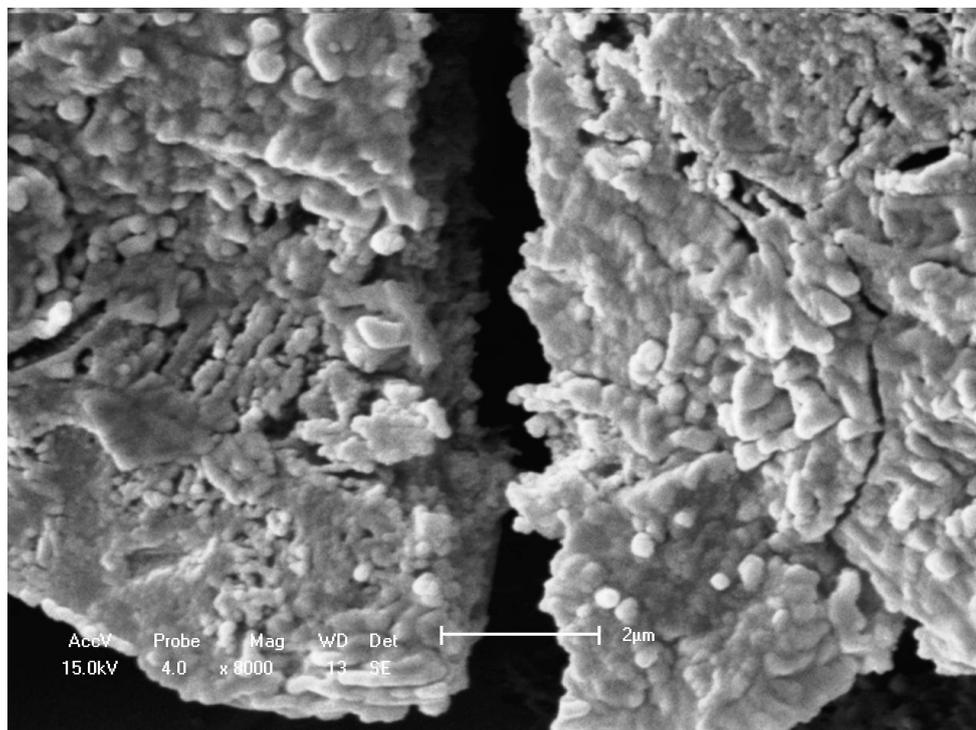


Figura 4.20: Detalhe na microestrutura da zona de transição do concreto CP20A-S.A

Capítulo 5

Conclusões

Verificação da influência da temperatura de queima dos lodos sépticos no IAP das cinzas geradas

Embora as análises químicas por FRX das CLS tenham demonstrado que estes resíduos são compostos por teores de óxidos de ferro, alumínio e silício superiores aos exigidos por norma¹ para classificá-las como pozolanas de classe E, observou-se através das análises mineralógicas por DRX que estas cinzas são predominantemente cristalinas, característica essa indicativa de um material de baixa reatividade e conseqüentemente de reduzida ação pozolânica. Estas evidências foram comprovadas através dos ensaios de IAP, onde verificou-se que nenhuma das amostras estudadas alcançou o índice mínimo para considerá-las como materiais efetivamente pozolânicos.

Além disto, constatou-se através destes resultados que a variação da temperatura empregada na queima de lodos sépticos entre a faixa de 700 °C a 900 °C pouco influencia na ativação pozolânica deste resíduo, não se observando variações significativas nesta propriedade nos ensaios realizados.

Avaliação das implicações técnicas do uso de CLS como adição mineral em concretos

- Na trabalhabilidade
 - As CLS em concretos sem aditivos plastificantes atuaram como um forte agente

¹NBR 12653 (ABNT, 2012c).

reduzidor da trabalhabilidade, podendo tal comportamento ser atribuído tanto pela capacidade deste resíduo reter umidade, em virtude de sua elevada finura e morfologia dos grãos, quanto pela forma de incorporação destas cinzas, onde ao acrescentá-las aos materiais constituintes promoveu-se uma pequena redução na relação água/materiais secos destas misturas.

- Apesar das CLS terem ocasionado acentuada perda de trabalhabilidade dos concretos em seu estado fresco, observou-se que este resíduo atuou de forma bastante benéfica na retenção da água livre existente no traço, bem como no aumento da coesão das misturas contendo 10% e 20% destas cinzas.
 - Para a obtenção de traços contendo CLS com trabalhabilidade suficiente para utilização prática, limita-se a 20% o teor máximo de incorporação deste resíduo em concretos sem aditivos plastificantes, uma vez que para a adoção de concentrações superiores, faz-se necessário alterar a quantidade inicial de água da mistura, o que pode acarretar em um aumento de porosidade e conseqüente redução da resistência do concreto.
- Na resistência à compressão axial
 - As melhorias causadas pelas CLS nos concretos em seu estado fresco, propiciaram a obtenção de corpos de prova mais compactos e menos porosos, que conduziram estas amostras a obterem resultados de resistência mecânica à compressão superiores aos do concreto sem resíduo em todas as idades de controle.
 - A redução nas resistências dos concretos com 10% e 20% de resíduo aos 91 dias podem ser atribuídas a ocorrência de possíveis reações de degradação das matrizes cimentícias com as CLS, fazendo-se necessário a realização de pesquisas complementares aos estudos aqui desenvolvidos, no intuito de avaliar a influência deste tipo de adição na durabilidade dos concretos em idades avançadas.
 - No índice de vazios e absorção de água
 - O uso das CLS ocasionaram uma leve redução nos índices de vazios e absorção de água dos corpos de prova contendo este resíduo, sendo esta melhoria atribuída

ao efeito de refinamento da estrutura de poros destes concretos, porém tem-se que estes resultados ainda são considerados elevados, o que acaba tornando estes concretos bastante susceptíveis a possíveis ações de agentes agressivos.

Verificação do comportamento microestrutural dos concretos com e sem CLS

A incorporação das CLS se mostraram benéficas do ponto de vista da hidratação da matriz cimentícia, tendo possivelmente estas cinzas atuado como pontos de nucleação para os produtos de hidratação do cimento, o que justifica a maior formação de compostos resistentes (C-S-H) na zona de transição dos concretos com o resíduo do que as apresentadas na zona de transição dos concretos sem o resíduo.

Não se constatou nas amostras com idade de 28 dias de concreto contendo CLS, quaisquer evidências de reações de degradação da matriz cimentícia, no entanto é preciso investigar o comportamento deste tipo de concreto em idades próximas aos 91 dias para avaliar se a diminuição da resistência à compressão está associada a possíveis reações provocadas pelo resíduo em estudo.

Capítulo 6

Sugestões para trabalhos futuros

Para trabalhos futuros relacionados a este estudo são sugeridos os seguintes tópicos:

- Verificação do índice de atividade pozolânica das CLS com diferentes granulometrias, bem como utilizando diferentes tipos de cimento.
- Avaliação ambiental, através de ensaios de lixiviação e solubilização, do uso de CLS como adição mineral em concretos.
- Avaliação das implicações técnicas do uso de CLS como adição mineral em concretos produzidos com o auxílio de aditivos plastificantes.
- Avaliação das implicações técnicas do uso de CLS como adição mineral em concretos de alto desempenho.
- Análise da durabilidade de concretos contendo CLS segundo sua resistência à carbonatação, reação álcali-agregado e penetração de íons cloreto.
- Verificação do comportamento microestrutural de concretos com e sem CLS em idades superiores a 28 dias.
- Avaliação das implicações técnicas do uso de CLS como adição mineral em concretos secos voltados para a produção de elementos pré-moldados.

Referências

- ABCP(2002)** ABCP. Guia básico de utilização do cimento portland. Associação Brasileira de Cimento Portland. São Paulo - SP. Citado na pág. 5, 37
- ABNT(2004)** ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 10004. Resíduos sólidos - Classificação. Rio de Janeiro. Citado na pág. 22, 23, 31
- ABNT(2012a)** ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 11579. Cimento Portland — Determinação do índice de finura por meio da peneira 75 μm (n° 200). Rio de Janeiro. Citado na pág. 37
- ABNT(2012b)** ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 11582. Cimento Portland — Determinação da expansibilidade Le Chatelier. Rio de Janeiro. Citado na pág. 37
- ABNT(2012c)** ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 12653. Materiais pozolânicos — Requisitos. Rio de Janeiro. Citado na pág. 13, 47, 50, 68
- ABNT(1999)** ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 5736. Cimento Portland pozolânico. Rio de Janeiro. Citado na pág. 54, 55, 56
- ABNT(2008)** ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 5738. Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova. Rio de Janeiro. Citado na pág. 40, 41, 42
- ABNT(2007)** ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 5739. Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro. Citado na pág. 43
- ABNT(2012d)** ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 5752. Materiais pozolânicos — Determinação de atividade pozolânica com cimento Portland — Índice de atividade pozolânica com cimento — Método de ensaio. Rio de Janeiro. Citado na pág. 36
- ABNT(2009a)** ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7211. Agregados para concreto - Especificação. Rio de Janeiro. Citado na pág. 9
- ABNT(1997)** ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7215. Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro. Citado na pág. 37
- ABNT(2011)** ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 8953. Concreto para fins estruturais - Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. Rio de Janeiro. Citado na pág. 39
- ABNT(2009b)** ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 9778. Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro. Citado na pág. 40, 43

- ABNT(2001)** ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR NM 23. Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica. Rio de Janeiro. Citado na pág. 37
- ABNT(2003a)** ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR NM 248. Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro. Citado na pág. 37, 38
- ABNT(2006)** ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR NM 45. Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro. Citado na pág. 38
- ABNT(2009c)** ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR NM 52. Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro. Citado na pág. 38
- ABNT(2009d)** ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR NM 53. Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro. Citado na pág. 38
- ABNT(2003b)** ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR NM 65. Cimento Portland - Determinação do tempo de pega. Rio de Janeiro. Citado na pág. 37
- ABNT(1998)** ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR NM 67. Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro. Citado na pág. 43
- Agopyan e John(2011)** V Agopyan e V. M John. *O desafio da sustentabilidade na construção civil*. Blucher, São Paulo. Citado na pág. 1
- Almeida(2006)** M. V. V. A Almeida. Influência da substituição de areia natural por pó de pedra no comportamento mecânico, microestrutural e eletroquímico de concretos. (Tese de Doutorado) Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Citado na pág. 1, 12
- Andreoli et al.(1999)** C. V Andreoli, A. I Lara e F Fernandes. Reciclagem de biossólidos: transformando problemas em soluções. Curitiba: SANEPAR; FINEP. Citado na pág. 15
- Andreoli et al.(2001)** C. V Andreoli, M. V Sperling e F Fernandes. *Lodo de esgoto: tratamento e disposição final*. Belo Horizonte: DESA/UFMG; Curitiba: SANEPAR. Citado na pág. 2
- Andreoli(2009)** C.A Andreoli. *Lodo de fossa e tanque séptico: caracterização, tecnologias de tratamento, gerenciamento e destino final*. Editora ABES, Rio de Janeiro. Citado na pág. 16, 17, 18
- Bauer(2000)** L. A. F Bauer. *Materiais de construção*, volume 1. LTC Editora, Rio de Janeiro. 5º Edição. Citado na pág. 9, 10
- Brosch(1975)** C. D. Brosch. Fabricação de agregado leve a partir do lodo de esgoto. *In: Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária*, páginas 1003–107. Rio de Janeiro - RJ. Citado na pág. 23, 25
- Cheeseman e Viridi(2005)** C.R. Cheeseman e G.S. Viridi. Properties and microstructure of lightweight aggregate produced from sintered sewage sludge ash. *Resources, Conservation and Recycling*, 45(1):18 – 30. Citado na pág. 23, 25

- Cusidó et al.(1996)** J.A. Cusidó, M. Devant, M. Celebrovsky, J. Riba e F. Arteaga. Ecobrick: A new ceramic material for solar buildings. *Renewable Energy*, 8(1–4):327 – 330. Special Issue World Renewable Energy Congress Renewable Energy, Energy Efficiency and the Environment. Citado na pág. 23, 25
- Cyr et al.(2007)** Martin Cyr, Marie Coutand e Pierre Clastres. Technological and environmental behavior of sewage sludge ash (ssa) in cement-based materials. *Cement and Concrete Research*, 37(8):1278 – 1289. Citado na pág. 23, 29, 59
- Donatello et al.(2010)** S. Donatello, A. Freeman-Pask, M. Tyrer e C.R. Cheeseman. Effect of milling and acid washing on the pozzolanic activity of incinerator sewage sludge ash. *Cement and Concrete Composites*, 32(1):54 – 61. Citado na pág. 47
- Donatello e Cheeseman(2013)** Shane Donatello e Christopher R. Cheeseman. Recycling and recovery routes for incinerated sewage sludge ash (issa): A review. *Waste Management*, 33(11):2328 – 2340. Citado na pág. 47
- Duarte(2008)** A. C. L Duarte. Incorporação de lodo de esgoto na massa cerâmica para fabricação de tijolos maciços: Uma alternativa para disposição final do resíduo. (Dissertação de Mestrado) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Sanitária da Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Citado na pág. 2, 22, 23, 24
- Fernandes(1999)** F Fernandes. *Manual Prático para Compostagem de biossólidos*. Editora ABES, Rio de Janeiro. Citado na pág. 16
- Ferreira et al.(1999)** A. C Ferreira, C. V Andreoli e D Jürgensen. *Produção e Características dos biossólidos*. PROSAB, Rio de Janeiro. In: ANDREOLI, C. V.; LARAA. I.(org.) *Uso e manejo do lodo de esgoto na agricultura*. Citado na pág. 20
- Fontes(2003)** C. M. A Fontes. Potencialidades da cinza de lodo de estações de tratamento de esgotos como material suplementar para a produção de concretos com cimento portland. (Dissertação de Mestrado) Programa de Pós-Graduação de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Citado na pág. 1, 2, 21
- Fontes et al.(2004)** C.M.A. Fontes, M.C. Barbosa, R.D. Toledo Filho e J.P. Gonçalves. Potentiality of sewage sludge ash as mineral additive in cement mortar and high performance concrete. Em Ch. F. Hendriks E. Vázquez e G.M.T. Janssen, editors, *International RILEM Conference on the Use of Recycled Materials in Building and Structures*. RILEM Publications SARL. Citado na pág. 23, 28
- Geyer(2001)** A. L. B Geyer. Contribuição ao estudo da disposição final e aproveitamento da cinza de lodo de estações de tratamento de esgotos sanitários como adição ao concreto. (Tese de Doutorado) Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Citado na pág. 1, 2, 21, 47
- Gomes e Barros(2009)** P. C. C Gomes e A. R Barros. *Métodos de dosagem de concreto auto-adensável*. Pini, São Paulo. 1º edição. Citado na pág. 13
- Hahin(1984)** C Hahin. Corrosion resistant design guidelines for portland cement concrete. *Materials Performance*, 23(4):42–46. Citado na pág. 11

- Ingunza et al.(2006)** M. P. D Ingunza, C. V Andreoli, R. M Nascimento, J. D Tinoco, C Hoppen e E. S Pegorini. Uso de resíduos do saneamento na fabricação de cerâmica vermelha. páginas 283–359. In:Andreoli, C. V (coord) Alternativas de Uso de Resíduos do Saneamento. Rio de Janeiro: ABES. 471 p. Citado na pág. 1
- Ingunza et al.(2011)** M. P. D Ingunza, A. Duarte e R. Nascimento. Use of sewage sludge as raw material in the manufacture of soft-mud bricks. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 23(6):852–856. Citado na pág. 23, 24
- Ingunza et al.(2013)** M. P. D Ingunza, S. A Medeiros e O. F Santos Júnior. Sewage sludge as raw-material in asphalt mixtures. *Advanced Materials Research*, 664:638–643. Citado na pág. 23, 26
- Isaia et al.(2009)** G. C Isaia, P. R. V Furquim e A. L. G Gastaldini. Análise estatística de variáveis influentes na microestrutura e durabilidade de concretos com adições minerais. *Ambiente Construído*, 9(1):07–23. Citado na pág. 14
- Jordão e Pessôa(2005)** E. P Jordão e C. A Pessôa. *Tratamento de esgotos domésticos*. Editora ABES, Rio de Janeiro. 4º edição. Citado na pág. 15, 16, 19, 20
- Kaefer(1998)** L. F Kaefer. A evolução do concreto armado. Citado na pág. 4
- Lohtia e Joshi(1996)** R. Paul Lohtia e Ramesh C. Joshi. 10 - mineral admixtures. Em V.S. Ramachandran, editor, *Concrete Admixtures Handbook (Second Edition)*, páginas 657 – 739. William Andrew Publishing, Park Ridge, NJ, second edition edição. Citado na pág. 13, 14, 15
- Mehta e Monteiro(2006)** P. K Mehta e P.J.M. Monteiro. *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials*. McGraw Hill professional. McGraw-Hill Education. Citado na pág. 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 15
- Metcalf e Eddy(1991)** Metcalf e Eddy. *Wastewater Engineering - Treatment, Disposal, and Reuse*. McGraw-Hill, New York. Citado na pág. 20
- Metha e Aïtcin(1990)** P. K Metha e P. C Aïtcin. Principles underlying production of high-performance concrete. *Cement, Concrete and Aggregates. CCAGDP*, 12(2):70–78. Citado na pág. 12
- Metha e Malhotra(1996)** P. K Metha e V. M Malhotra. Pozzolanic and cementitious materials. Routledge, p. 191. Citado na pág. 13
- Metha e Monteiro(1994)** P. K Metha e P. J. M Monteiro. *Concreto: estrutura, propriedades e materiais*. Pini, São Paulo. Citado na pág. 4, 12
- Moir(2003)** Graeme Moir. 1 - cements. Em John Newman e Ban Seng Choo, editors, *Advanced Concrete Technology Set*, páginas 3 – 45. Butterworth-Heinemann, Oxford. Citado na pág. 5, 8, 9, 15
- Monzó et al.(2003)** J. Monzó, J. Payá, M.V. Borrachero e I. Girbés. Reuse of sewage sludge ashes (ssa) in cement mixtures: the effect of {SSA} on the workability of cement mortars. *Waste Management*, 23(4):373 – 381. Citado na pág. 23, 27, 28, 59
- Morales e Agopyan(1992)** G Morales e V Agopyan. Caracterização do agregado leve obtido a partir do lodo de esgoto da cidade de londrina. In: *Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária*, páginas 1–20. Boletim técnico da Escola Politécnica da USP. Citado na pág. 23, 26

- Neville(1997)** A.M Neville. *Propriedades do concreto*. Pini, São Paulo. Citado na pág. 9
- Pan et al.(2003)** Shih-Cheng Pan, Dyi-Hwa Tseng, Chih-Chiang Lee e Chau Lee. Influence of the fineness of sewage sludge ash on the mortar properties. *Cement and Concrete Research*, 33(11):1749 – 1754. Citado na pág. 23, 27
- Pedroso(2009)** F.L Pedroso. Concreto: as origens e a evolução do material construtivo mais usado pelo homem. *Concreto & Construções. Instituto Brasileiro do Concreto*, 53:14–19. Citado na pág. 4
- Prudêncio(1986)** W. J Prudêncio. Carbonatação da superfície das estruturas de concreto armado. In:SEMINÁRIO NACIONAL DE CORROSÃO NA CONSTRUÇÃO CIVIL, 2, Rio de Janeiro. Anais. Rio de Janeiro: ABRACO. p. 147-156. Citado na pág. 11
- Santos(2003)** A. D Santos. Estudo das possibilidades de reciclagem dos resíduos de tratamento de esgoto da região metropolitana de são paulo. (Dissertação de Mestrado) Escola Politécnica da Universidade Federal de São Paulo. Citado na pág. 2, 23
- Sarkar et al.(2001)** Shondeep L. Sarkar, Xu Aimin e Dipayan Jana. 7 - scanning electron microscopy, x-ray microanalysis of concretes. Em V.S. Ramachandran e James J. Beaudoin, editors, *Handbook of Analytical Techniques in Concrete Science and Technology*, páginas 231 – 274. William Andrew Publishing, Norwich, NY. Citado na pág. 7, 12
- Sayed et al.(1995)** Mohammed H. Al Sayed, Ismail M. Madany e A.Rahman M. Buali. Use of sewage sludge ash in asphaltic paving mixes in hot regions. *Construction and Building Materials*, 9(1):19 – 23. Citado na pág. 23, 26
- Slim e Wakefield(1991)** J. A Slim e R. W Wakefield. The utilization of sewage sludge in the manufacture of clay bricks. *Water SA.*, 17(13):197–202. Citado na pág. 23
- Souza(2007)** P. A. B. F Souza. Estudo do comportamento plástico, mecânico, microestrutural e térmico do concreto produzido com resíduo de porcelanato. (Tese de Doutorado) Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Citado na pág. 10
- Tay(1987)** J Tay. Bricks manufactured from sludge. *Journal of Environmental Engineering*, 113(2):278–284. Citado na pág. 23
- Tay et al.(2002)** J. H Tay, K. Y Show e S. Y Hong. Potential reuse of wastewater sludge for innovative applications in construction industry. *Bulletin of the College of Engineering, N.T.U.*, (86):103–112. Citado na pág. 23, 27
- Tay e Show(1994)** Joo-Hwa Tay e Kuan-Yeow Show. Municipal wastewater sludge as cementitious and blended cement materials. *Cement and Concrete Composites*, 16(1):39 – 48. Citado na pág. 23, 27
- Taylor(1990)** H. F. W Taylor. *Cement Chemistry*. Academic Press, London. Citado na pág. 5, 6, 8, 9
- Tsutiya e Hirata(2001)** M. T Tsutiya e A. Y Hirata. Aproveitamento e disposição final de lodo de estação de água do estado de são paulo. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 21, João Pessoa. ABES. Citado na pág. 2

Tutikian e Dal Molin(2008) B. F Tutikian e D. C. C Dal Molin. *Concreto auto-adensável*. Pini, São Paulo. 1º Edição. Citado na pág. 13

Von Sperling(1996) M Von Sperling. *Princípios do tratamento biológico de águas residuárias - Lagoas de estabilização*. Editora UFMG, Belo Horizonte. Citado na pág. 19