



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

JOSÉ DANIEL JALES SILVA

**AVALIAÇÃO DA PONTENCIALIDADE DE INCORPORAÇÃO DE
LODO DE UMA INDÚSTRIA DE PRODUTOS DE LIMPEZA COMO
ADIÇÃO MINERAL EM CONCRETOS DE CIMENTO PORTLAND**

**NATAL
2015**

JOSÉ DANIEL JALES SILVA

**AVALIAÇÃO DA PONTENCIALIDADE DE INCORPORAÇÃO DE
LODO DE UMA INDÚSTRIA DE PRODUTOS DE LIMPEZA 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.

Coorientadora: Prof. Dr.^a Liana Filgueira Albuquerque.

NATAL
2015

UFRN / Biblioteca Central Zila Mamede
Catalogação da Publicação na Fonte

Silva, José Daniel Jales.

Avaliação da potencialidade de incorporação de lodo de uma indústria de produtos de limpeza como adição mineral em concretos de cimento Portland / José Daniel Jales Silva. – Natal, RN, 2015.

121 f. : il.

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

Coorientadora: Prof.^a Dr.^a Liana Filgueira Albuquerque.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Centro de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

1. Lodo industrial – Dissertação. 2. Concreto – Adição mineral - Dissertação. 3. Efluente industrial – Dissertação. 4. Sustentabilidade – Construção Civil - Dissertação. 5. Concreto – Cimento Portland. I. Ingunza, Maria Del Pilar Durante . II. Albuquerque, Liana Filgueira. III. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. IV. Título.

RN/UF/BCZM

CDU 628.38

JOSÉ DANIEL JALES SILVA

**AVALIAÇÃO DA PONTENCIALIDADE DE INCORPORAÇÃO DE
LODO DE UMA INDÚSTRIA DE PRODUTOS DE LIMPEZA 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.^a Liana Filgueira Albuquerque – Coorientadora (UFPB)

Prof. Dr.^a Andreza Kelly Costa Nobrega – Examinadora Interna (UFRN)

Prof. Dr.^a Gladis Camarini – Examinadora Externa (UNICAMP)

Natal, 20 de Novembro de 2015

AVALIAÇÃO DA PONTENCIALIDADE DE INCORPORAÇÃO DE LODO DE UMA INDÚSTRIA DE PRODUTOS DE LIMPEZA COMO ADIÇÃO MINERAL EM CONCRETOS DE CIMENTO PORTLAND

José Daniel Jales Silva

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

Coorientadora: Prof. Dr.^a Liana Filgueira Albuquerque

RESUMO

A geração de resíduos industriais tem aumentado cada vez mais nas últimas décadas, motivando estudos sobre uma destinação ambientalmente correta e sustentável e que também represente vantagens para seus geradores. Neste contexto, estão inseridas duas empresas do nicho de produtos de limpeza que estão localizadas no município de São José do Mipibu/RN e produzem um lodo industrial em estação de tratamento de efluentes, constituindo a abordagem principal desta pesquisa. Diante disto, verificou-se o potencial de incorporação do referido lodo em matriz de cimento Portland como adição mineral para a fabricação de concretos, dado o elevado potencial de imobilização de resíduos na matriz endurecida desse material, sendo estes utilizados posteriormente na própria empresa para confecção de artigos pré-moldados. Foram adicionados diferentes teores de lodo (5, 10, 15 e 20%) em um traço comum (1:2:3), sendo avaliadas suas implicações técnicas e microestruturais por meio de ensaios de trabalhabilidade no estado fresco e resistência à compressão, porosidade total e microscopia eletrônica de varredura (MEV) no estado endurecido. Os resultados obtidos demonstraram a viabilidade do processo tanto do ponto de vista técnico e ambiental quanto econômico. Todos os concretos produzidos com resíduo apresentaram uma aumento de trabalhabilidade atribuído à natureza do resíduo que possuía substâncias surfactantes capazes de adsorver minúsculas partículas de ar na massa. Em contrapartida, para todos os teores foram obtidas resistências à compressão inferiores ao concreto padrão, com uma redução de 39%, para as amostras com 20% de lodo. Isso se deve, principalmente, a um aumento de porosidade na zona de transição desses materiais, resultante de maior formação de etringita em detrimento à formação de outros compostos, mas que, ainda assim, permite o uso desses concretos para a fabricação de artigos com caráter não estrutural, como pisos pré-moldados. Ademais, a absorção de água e índice de vazios aumentaram levemente para todas as amostras, com exceção do concreto com 20% de resíduo que apresentou redução para o último parâmetro. Diante deste contexto, o teor máximo recomendado é de 20%, constituindo uma proporção significativa e capaz de destinar sustentavelmente todo o resíduo gerado na indústria.

Palavras-chave: Lodo industrial, concreto, adição mineral, sustentabilidade.

EVALUATION OF INCORPORATION POTENTIALITY FOR SLUDGE FROM A CLEANING PRODUCTS INDUSTRY AS MINERAL ADDITION IN COCRETES OF PORTLAND CEMENT

José Daniel Jales Silva

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

Coadviser: Prof. Dr.^a Liana Filgueira Albuquerque

ABSTRACT

The generation of industrial wastes has been increased more and more in recent decades, motivating studies about a correct sustainable allocation and that also represents advantages for their generators. In this context, are included two companies of cleaning products niche, located in São José do Mipibu/RN, that produces industrial sludge at a sewage treatment plant, and that is the main approach of this research. Given this, it was studied the incorporation potentiality of this sludge as a mineral addition in cement matrix for concrete production due it high capacity of wastes immobilization inside this material, which are subsequently used in the company for making precast articles. Were added different sludge concentrations (5, 10, 15 and 20%) in a common trait (1: 2: 3), and evaluated their techniques and microstructural implications via workability test in fresh state and compressive strength, full porosity and scanning electron microscopy (SEM) in the hardened state. The results demonstrated the feasibility of the process both from a technical and environmental view as economical. All concretes produced with residue showed an increase of workability given the nature of the waste that had surfactants substances capable of adsorbing tiny particles of air into the batter. However, for all concentrations were obtained lower compressive resistances than standard concrete, with a reduction of 39% for samples with 20% of sludge. This are attributed mainly to an increase of porosity in the transition zone of these material, resulting from increased formation of ettringite at the detriment to the formation of other compounds, but which still allows the use of these for the manufacture of concrete articles with non-structural nature, such as precast floor. In addition, the water absorption and void ratio increased slightly for all samples, except the concrete with 20% of waste that has a reduction for the last parameter. Given this context, the recommended maximum level is 20%, constituting a significant proportion and able to allocate sustainably all waste generated in the industry.

Keywords: Industrial sludge, concrete, mineral addition, sustainability.

DEDICATÓRIA

“O céu e a terra passarão, mas as minhas palavras não hão de passar”

Mateus 24:35

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, à Deus, fonte de toda santidade e sabedoria, criador de tudo e símbolo de eternidade, por me conceder discernimento, saúde, paz e entusiasmo para conduzir essa pesquisa.

Aos meus amados pais, Francisco José da Silva e Dalvair Almeida Jales Silva, e queridos irmãos, Arthur Jales Silva e Jéssica Luara Daluz Jales Silva que sempre estiveram ao meu lado, dando força, carinho e suporte. É nessa família que eu encontro todo o meu sustento.

À minha orientadora, Prof.^a Maria Del Pilar Durante Ingunza, e à minha coorientadora, Prof.^a Liana Filgueira Albuquerque, por todos os preciosos conhecimentos repassados que serviram de guia para cada etapa, além de amizade e confiança em mim depositados.

Aos grandes docentes do curso de mestrado e graduação em Engenharia Civil da UFRN que me auxiliaram com seus ensinamentos exemplares, em especial ao Prof. Paulo Alysson, Prof. Marcos Anjos, Prof.^a Maria das Vitórias, Prof. Fagner França e Prof.^a Jaquelígia Brito.

Aos técnicos e bolsistas do laboratório de Materiais de Construção da UFRN, em especial, Francisco Braz e Sandro R. S. Andrade, por todo suporte, dedicação e companheirismo ao longo de todo procedimento experimental.

Ao técnico do Laboratório de Mecânica dos Solos da UFRN, Batista, por toda a ajuda no estágio inicial da pesquisa.

Aos colegas de mestrado, por todos os conhecimentos compartilhados, ajuda e amizade que se estenderam ao longo de todo o programa.

Aos amigos que estiveram presentes em todas as situações, pela incondicional e fundamental ajuda para a realização desta pesquisa e pela convivência marcada por consideração, bom humor, engenhosidade e ensinamentos de vida.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFRN, coordenada pela Prof.^a Ada Scudelari, pela oportunidade e estímulo depositados.

À toda secretaria do PEC, representada pelas integrantes Rafaella Kaline, Afra Dara e Cintya Andrade, por todos os serviços prestados e simpatias distribuídas.

À Universidade Federal Rural do Semi-Árido, instituição que possibilitou minha graduação em engenharia civil, minha sincera gratidão.

À CAPES, por todo suporte financeiro.

Às Indústrias Becker, empresa financiadora de toda a pesquisa e detentora do resíduo utilizado nos estudos. Ao funcionário Alexandro que ajudou nas coletas do resíduo e estagiária Júlia que auxiliou na coleta de dados na empresa.

A todos que me ajudaram de alguma forma, torceram e contribuíram para a realização desta pesquisa.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Seção transversal de um corpo de prova de concreto.	13
Figura 2. Microestrutura de um concreto convencional.	14
Figura 3. Microestrutura da pasta de cimento.	20
Figura 4. Aspectos dos cristais de etringita e monossulfato hidratado.	20
Figura 5. Influência do teor de adição de cinzas na resistência à compressão do concreto.....	42
Figura 6. Evolução da resistência à compressão dos concretos produzidos por Lima.	43
Figura 7. Absorção e índice de vazios em função do teor de CLS adicionada aos concretos.....	44
Figura 8. Fluxograma da metodologia experimental da pesquisa.	47
Figura 9. a) vista da entrada principal da fábrica. b) estação de tratamento.	48
Figura 10. Caçamba para armazenamento do lodo industrial enviado ao aterro.	49
Figura 11. a) Agulha de Vicat. b) Ensaio de início de pega. c) Ensaio da pasta de consistência normal.....	55
Figura 12. Ensaio de expansibilidade a frio do cimento.	56
Figura 13. a) Corpos de prova de cimento. b) Ensaio de compressão nos cp's de cimento.....	57
Figura 14. Padrão para identificação dos corpos de prova.	60
Figura 15. Curva granulométrica do lodo industrial.	68
Figura 16. Granulometria a laser do lodo industrial.....	69
Figura 17. Difratoograma do lodo industrial.....	72
Figura 18. Resistência à compressão do cimento CP V ARI.....	77
Figura 19. Curva granulométrica do agregado miúdo.	79
Figura 20. Curva granulométrica do agregado graúdo.....	81
Figura 21. Consistência dos concretos em função do teor de resíduo.....	83
Figura 22. Resistência à compressão dos concretos aos 3 dias.....	84
Figura 23. Resistência à compressão dos concretos aos 7 dias.....	84
Figura 24. Resistência à compressão dos concretos aos 28 dias.....	85
Figura 25. Resistência à compressão dos concretos em função da idade.....	86
Figura 26. Absorção de água aos 28 dias em função do teor de resíduo.	87
Figura 27. Índice de vazios aos 28 dias em função do teor de resíduo.....	87

Figura 28. Visão geral da microestrutura para a amostra de concreto padrão.....	88
Figura 29. Visão geral da microestrutura para a amostra de concreto com resíduo.	89
Figura 30. Microestrutura da zona de transição do concreto padrão.	90
Figura 31. Microestrutura da zona de transição do concreto com resíduo.	91
Figura 32. Detalhe de partícula na zona de transição de concreto com resíduo.....	91

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Influência da idade nas resistências relativas do concreto.....	11
Tabela 2. Fatores que influenciam a porosidade, a permeabilidade e a absorção....	12
Tabela 3. Análise química em termos de principais óxidos do Cimento Portland e suas abreviações.....	16
Tabela 4. Principais compostos constituintes do Cimento Portland.	17
Tabela 5. Propriedades dos compostos do cimento Portland.	18
Tabela 6. Tipos de cimento Portland e normas regulamentadoras.	22
Tabela 7. Propriedades dos agregados de acordo com as condicionantes.	26
Tabela 8. Principais alternativas de disposição final do lodo.	36
Tabela 9. Formulações dos concretos para estudo com traço unitário em massa....	60
Tabela 10. Quantitativo de corpos de prova utilizados para a pesquisa.	61
Tabela 11. Volume total de concreto produzido por cada traço.	62
Tabela 12. Quantidade de material utilizado na produção dos concretos.....	62
Tabela 13. Granulometria do resíduo industrial.....	68
Tabela 14. Análise química do lodo industrial.	71
Tabela 15. Início de pega do cimento Portland.	74
Tabela 16. Expansibilidade a frio do cimento Portland.....	75
Tabela 17. Finura do cimento Portland.	75
Tabela 18. Resistência do cimento CP V ARI aos 1, 3 e 7 dias.	76
Tabela 19. Massa específica do cimento CP V ARI.	77
Tabela 20. Composição granulométrica da areia.	78
Tabela 21. Massa específica e unitária da areia.	79
Tabela 22. Composição granulométrica da brita.	80
Tabela 23. Massa específica e unitária da brita.	81

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ARI – Alta Resistência Inicial

ASTM – American Society for Testing and Materials

C₂S – Silicato Bicálcico

C₃A – Aluminato Tricálcico

C₃S – Silicato Tricálcico

C₄AF – Ferro-Aluminato Tetracálcico

CH – Hidróxido de Cálcio

CP – Corpo de Prova

C-S-H – Silicato de Cálcio Hidratado

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

DRX – Difração de Raios X

EDS – Espectrografia por Dispersão de Energias

EMPARN – Empresa de Pesquisa Agropecuária do Rio Grande do Norte

ETE – Estação de Tratamento de Esgoto

FRX – Fluorescência de Raios X

IFRN – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte

MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura

NBR – Norma Brasileira Registrada

PAC – Policloreto de Alumina

UFRN – Universidade Federal do Rio Grande do Norte

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	1
1.1 Justificativa	3
1.2 Objetivos da pesquisa.....	4
1.2.1 Objetivo geral	4
1.2.2 Objetivos específicos	4
CAPÍTULO 2.....	5
2.1 Concreto	5
2.1.1 Tipos de concreto	6
2.1.2 Propriedades do concreto no estado fresco	7
2.1.2.1 Trabalhabilidade	7
2.1.2.2 Consistência	8
2.1.2.3 Coesão e exsudação	9
2.1.3 Propriedades do concreto no estado endurecido.....	10
2.1.3.1 Resistência à compressão.....	10
2.1.3.2 Permeabilidade e absorção	11
2.1.4 Macroestrutura e microestrutura do concreto	13
2.2 Aglomerante	14
2.2.1 Cimento Portland	15
2.2.1.1 Composição química do cimento Portland	16
2.2.1.2 Hidratação do Cimento Portland	18
2.2.1.3 Tipos de cimento	21
2.3 Agregados	23
2.3.1 Classificação dos agregados	24
2.3.2 Propriedades dos agregados.....	25
2.4 Aditivos.....	27
2.5 Adições minerais	29
2.6 Lodo de estações de tratamento de esgoto (ETE).....	30
2.6.1 Caracterização do lodo.....	32
2.6.2 Tratamento do lodo.....	33
2.6.3 Disposição final.....	33
2.6.4 Utilização do lodo como insumo na construção civil	37
2.6.4.1 Matéria prima na indústria cimentícia.....	39

2.6.4.2 Incorporação de lodo na fabricação de argamassas	40
2.6.4.3 Incorporação de lodo na fabricação de concretos	42
CAPÍTULO 3	46
3.1 Coleta e caracterização do resíduo	48
3.1.1 Análise granulométrica.....	50
3.1.2 Massa específica real.....	51
3.1.3 Índices de consistência	51
3.1.4 Índice de atividade pozolânica.....	51
3.1.5 Teor de matéria orgânica.....	52
3.1.6 Análise química.....	52
3.1.7 Análise mineralógica	53
3.2 Cimento	53
3.2.1 Índice de finura.....	54
3.2.2 Tempo de início de pega	54
3.2.3 Expansibilidade a frio do cimento	55
3.2.4 Resistência à compressão	56
3.2.5 Massa específica real.....	57
3.3 Agregado miúdo	57
3.4 Agregado graúdo	58
3.5 Água.....	58
3.6 Escolha do traço e produção dos concretos com e sem resíduo	59
3.6.1 Escolha do traço	59
3.6.2 Cálculo dos quantitativos de materiais.....	60
3.6.3 Produção dos corpos de prova de concreto	63
3.7 Ensaio de caracterização dos concretos.....	64
3.7.1 Ensaio de abatimento do tronco de cone	64
3.7.2 Ensaio de resistência à compressão.....	65
3.7.3 Índice de vazios e absorção de água	65
3.7.4 Análise microestrutural	65
CAPÍTULO 4	67
4.1 Caracterização do resíduo	67
4.1.1 Análise granulométrica.....	67
4.1.2 Índices de consistência	70
4.1.3 Massa específica.....	70

4.1.4 Análise química.....	70
4.1.5 Análise mineralógica	71
4.1.6 Índice de atividade pozolânica.....	73
4.1.7 Teor de matéria orgânica.....	73
4.2 Cimento	74
4.2.1 Ensaio de início de pega	74
4.2.2 Ensaio de expansibilidade	74
4.2.3 Ensaio de Finura do cimento	75
4.2.4 Ensaio de resistência à compressão do cimento.....	76
4.2.5 Ensaio de massa específica real	77
4.3 Agregado miúdo	78
4.3.1 Análise granulométrica.....	78
4.3.2 Massa específica e massa unitária.....	79
4.4 Agregado graúdo	80
4.4.1 Análise granulométrica.....	80
4.4.2 Massa específica e massa unitária.....	81
4.5 Caracterização dos concretos com e sem resíduo.....	82
4.5.1 Ensaio de consistência.....	82
4.5.2 Ensaio de resistência à compressão.....	83
4.5.3 Absorção de água e índice de vazios.....	86
4.5.4 Análise microestrutural	88
4.6 Avaliação técnica e ambiental	92
4.6.1 Avaliação de viabilidade econômica	93
CAPÍTULO 5.....	94
CAPÍTULO 6.....	97
Referências	98

CAPÍTULO 1

Introdução

A geração de resíduos remete desde o aparecimento do homem na terra. Quando possuíam uma organização social nômade, já se geravam resíduos provenientes das atividades humanas. Entretanto, o meio ambiente e sua capacidade de autoregulação e autocontrole, a homeostase, era capaz de absorver esses pequenos desequilíbrios, de forma que a geração era menor do que a capacidade de absorção do meio.

A partir do momento em que se deu o crescimento da população e com isso o fenômeno da urbanização, essa geração de resíduos se intensificou e passou a constituir um problema, superando a capacidade de absorção da natureza. Aliado a isso, o descumprimento de políticas ambientais leva à disposição inadequada desses resíduos, agravando o quadro ambiental, uma vez que estes não recebem qualquer tipo de tratamento (COSTA, 2014).

A importância da destinação adequada destes resíduos se deu a partir da Agenda 21 na Conferência Mundial do Meio Ambiente que ocorreu no Rio de Janeiro em 1992, e que instruiu em seu capítulo 21 o tema sobre o manejo ambientalmente saudável dos resíduos sólidos além de discutir questões relacionadas com esgotos, definindo algumas diretrizes. Dentro destas encontra-se a maximização da reutilização e reciclagem dos resíduos e onde se insere o contexto da incorporação de lodo de estações de tratamento de efluentes em matrizes cimentícias para confecção de novos produtos (ANDREOLI *et al.*, 2001).

O setor industrial gera, em grandes quantidades, diversos tipos de resíduos, sejam eles líquidos ou sólidos. A partir daí, e a fim de enquadrar essas indústrias no âmbito da sustentabilidade, as legislações ambientais tem se tornado cada vez mais restritivas, especificando parâmetros sobre o correto tratamento e disposição final desses resíduos (PINHEIRO, 2008).

Nesse contexto, estão inseridas indústrias como as de papel e celulose, têxtil e de produtos de limpeza que devido aos seus processos produtivos geram resíduos líquidos e sólidos como é o caso do lodo. O destino final desse resíduo envolve uma série de medidas e estudos que estão relacionados com seu acondicionamento, estabilização, bem como, impactos ambientais causados.

Com isso, os elevados custos inerentes a esse processo de tratamento e disposição tem levado as indústrias a buscarem novas alternativas de reaproveitamento. Segundo Ingunza *et al.* (2006) a reciclagem de resíduos na construção civil vem ganhando espaço como uma prática sustentável, permitindo a transformação de um item de custo em faturamento e resultando na oferta de produtos alternativos.

É a partir daí que a indústria cimentícia, devido à peculiaridade em seu processo de produção, com a capacidade de imobilização do resíduo na matriz endurecida de cimento e pouca influência nas propriedades físicas e mecânicas dos concretos e argamassas com resíduo, surge como uma potencial receptora para os mais variados tipos de descartes, como o caso do lodo de estações de tratamento de efluentes, sejam domésticos ou industriais.

Para Geyer (2001) outra alternativa também se concretiza com a transformação do lodo em cinzas, por meio de incineração, reduzindo seu volume original e melhorando as condições de disposição. Entretanto, esse processo dá origem a um novo resíduo que pode gerar novas formas de contaminação. Inclusive, conforme o CONAMA (Resolução nº 316, 2002) o tratamento térmico de resíduos só deve ser implementado quando não houver outra técnica disponível, devido ao alto risco de poluição atmosférica.

Localizadas no município de São José do Mipibu no Rio Grande do Norte, duas indústria de fabricação de produtos de limpeza, produzem grandes quantidades de lodo advindo de uma estação de tratamento de efluente, sendo este gerado ao longo da linha de produção desses artigos. A partir daí surge a necessidade de se encontrar uma destinação final sustentável e financeiramente atrativa para as empresas, que como geradoras desse resíduo devem se preocupar em atender as normalizações ambientais vigentes.

Em virtude desta situação desenvolveu-se no presente trabalho um estudo de caso que visa, primeiramente caracterizar o resíduo da estação de tratamento e então proporcionar sua incorporação em misturas de concreto estudando as propriedades físicas, mecânicas e aspectos microestruturais desses concretos com resíduo.

O trabalho contribui para o conhecimento das características do concreto com incorporação do lodo industrial, abrindo caminho para sua inserção nestes materiais. Desse modo, possibilitando a redução na destinação desse resíduo para outros locais que poderiam se enquadrar como inviáveis, dado os potenciais impactos associados e por tratarem esse material como passível apenas de confinamento, não prezando pelo seu reaproveitamento e contribuindo apenas para o agravamento da presente situação.

1.1 Justificativa

Os lodos resultantes dos processos de tratamento de efluentes vem tomando grande importância no cenário mundial de questões ambientais e sustentabilidade devido a sua disposição inadequada, na maioria dos casos, e contribuição para um agravamento dos impactos ambientais. As indústrias de produtos de limpeza, localizadas na cidade de São José do Mipibu no Estado do Rio Grande do Norte, não estão fora deste contexto, sendo assim buscou-se minimizar esses impactos bem como os custos associados ao tratamento do resíduo e disposição final, proporcionando sua reutilização em fontes alternativas.

Dada pesquisas como as de Geyer (2001), Fontes (2004) e Lima (2013), sabe-se que é possível incorporar eficientemente o lodo de estações de tratamento, seja de água, efluentes domésticos ou industriais em matrizes cimentícias para confecção de concretos. Dessa forma, representando ganhos tanto para a indústria geradora que soluciona o problema da disposição final dos lodos gerados, quanto para a indústria receptora que pode economizar na utilização de matérias primas mais essenciais para o processo, bem como alcançar a certificação ambiental, cada vez mais requisitada para os processos de comercialização de produtos.

Dada as peculiaridades do processo de fabricação dos produtos de limpeza, tornou-se necessário verificar se a incorporação do lodo no concreto permitiria ainda

assim o atendimento as especificações das normas vigentes, principalmente no que tange os critérios mecânicos e físicos como resistência dos corpos de prova e porosidade. Desse modo poder-se-ia avaliar ainda os aspectos microestruturais dos concretos com incorporação, observando a interação entre as partículas dos dois materiais e sua contribuição para a alteração dos aspectos físico-mecânicos dos corpos de prova.

1.2 Objetivos da pesquisa

1.2.1 Objetivo geral

Avaliar os efeitos da incorporação de lodo de uma indústria de produtos de limpeza nas propriedades físicas e mecânicas, bem como aspectos microestruturais de concretos com cimento Portland.

1.2.2 Objetivos específicos

- Realizar uma caracterização física, química e mineralógica do lodo industrial coletado, bem como física das demais matérias primas.
- Identificar o teor máximo de lodo, dentre os estudados, que pode ser incorporado, levando em conta o desempenho do compósito nos estados fresco e endurecido.
- Avaliar o desempenho dos concretos fabricados em diferentes teores de lodo, no que tange suas propriedades de consistência, resistência à compressão e porosidade total.
- Analisar a microestrutura do concreto com a incorporação desse resíduo.
- Realizar uma avaliação de viabilidade técnica e ambiental do processo de reaproveitamento do resíduo.

CAPÍTULO 2

Fundamentação Teórica

2.1 Concreto

O concreto é um material compósito que consiste basicamente de uma mistura de um meio contínuo aglomerante, onde estão mergulhadas partículas ou fragmentos de agregados, além de aditivos e adições que quase sempre estão presentes devido aos seus vários benefícios (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Em função de sua fácil moldagem e execução em um variedade de tamanhos e formas, durabilidade, alta disponibilidade e baixo custo, esse material tem se tornado um dos mais utilizados pelo homem ao longo dos séculos (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Para Kaefer (1998) a história do concreto é muito antiga e se confunde com a própria história da civilização humana. Com a evolução desse material passaram a se desenvolver diversos concretos especiais a fim de adaptá-lo aos novos desafios das obras de engenharia. Surgiram os concretos de alto desempenho, alto adensável, leve, pesado, com fibras, dentre outros que utilizam grandes variedades de cimentos, agregados, aditivos e adições minerais.

Atualmente, com os avanços na área é possível utilizar o concreto em grandes obras com segurança e economia. Suas propriedades, tanto no estado fresco quanto endurecido, já são bastante pesquisadas e conhecidas, permitindo seu emprego nos mais variados tipos de estruturas (GIAMUSSO, 1992). O maior desafio que se encontra é o de aumentar a durabilidade dessas estruturas, bem como restaurar estruturas danificadas e compreender os mecanismos físicos e químicos dos cimentos e concretos (KAEFER, 1998).

Segundo Gabrich (2008), uma dosagem correta dos materiais constituintes desse compósito resultam em propriedades vantajosas como:

- Elevada resistência, se comparado a outros materiais utilizadas na área da construção civil.
- Versatilidade de conformação, uma vez que, em seu estado plástico, pode ser moldado em diversas formas e tamanhos, tornando-se um material enrijecido e durável.
- Baixo custo, já que os materiais utilizados para sua fabricação são de fácil obtenção e custo relativamente baixo.

2.1.1 Tipos de concreto

Segundo Mehta e Monteiro (2008) os concretos podem ser classificados segundo a sua massa específica em:

- a) Concreto leve: com massa específica inferior a 1800 kg/m^3
- b) Concreto de peso normal: massa específica em torno de 2400 kg/m^3 , sendo o mais usado geralmente em peças estruturais.
- c) Concreto pesado: usados em blindagens de radiações, é produzido a partir de agregados de alta densidade e possuem massa específica, geralmente, superior a 3200 kg/m^3 .

Também se torna útil, do ponto de vista das relações estrutura-propriedade, classificar os concretos quanto a sua resistência à compressão aos 28 dias em:

- Concreto de baixa resistência: resistência à compressão menor que 20 Mpa.
- Concreto de resistência moderada: resistência à compressão de 20 a 40 Mpa.
- Concreto de alta resistência: resistência à compressão superior a 40 Mpa.

Atrelado a esse ramo, a descoberta de concretos especiais a partir da inserção de novos materiais tem representado uma grande evolução frente a estruturas cada vez maiores e mais complexas. A utilização de resíduos como adições minerais tem

gerado benefícios às características do concreto e, além disso, contribuindo para o desenvolvimento sustentável (SOUZA, 2007).

2.1.2 Propriedades do concreto no estado fresco

As propriedades desejáveis para um concreto fresco são aquelas que garantam uma mistura fácil de transportar, lançar e adensar, sem que ocorra o fenômeno de segregação. Sendo assim as principais propriedades contempladas para esse estado são (ARAÚJO *et al.*, 2000):

- trabalhabilidade;
- consistência;
- coesão;
- exsudação.

2.1.2.1 Trabalhabilidade

A trabalhabilidade, segundo a *American Society for Testing and Material* (ASTM), pode ser definida como o esforço necessário para a manipulação de uma determinada quantidade de concreto nas operações de lançamento, adensamento e acabamento, com perda mínima de homogeneidade (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

De acordo com o processo de lançamento e adensamento, a trabalhabilidade é a característica fundamental para que o concreto sofra um bom processo de adensamento, desse modo, sua consistência deve ser adequada de maneira que não haja o fenômeno de segregação. É uma característica não apenas intrínseca ao concreto mas que depende do tipo de construção e dos métodos de produção utilizados na obra (GIAMUSSO, 1992; BAUER, 2000).

A trabalhabilidade é uma propriedade constituída de dois componentes principais (MEHTA e MONTEIRO, 2008):

- a) A fluidez, que descreve a facilidade de mobilidade;

b) A coesão, que descreve a resistência à exsudação ou à segregação.

Os principais fatores que influenciam na trabalhabilidade são (SOUZA, 2007).

- Fatores internos:
 - Consistência;
 - Traço do concreto;
 - Granulometria do concreto;
 - Forma do grão dos agregados;
 - Aditivos.
- Fatores externos:
 - Tipo de mistura;
 - Tipo de transporte;
 - Lançamento;
 - Adensamento;
 - Dimensões e armadura da peça a executar.

2.1.2.2 Consistência

A consistência é usada como um índice para se medir a mobilidade ou fluidez da massa de concreto fresco e pode ser determinada por meio de ensaios como o de abatimento do tronco de cone, aparelho Vebe ou ensaio do fator de compactação (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

É uma propriedade que depende, principalmente, da quantidade de água empregada para a confecção da massa, representando o grau de umidade desta massa e estando relacionada intimamente com sua plasticidade. Um aumento da quantidade de água torna a mistura fresca mais mole, plástica e trabalhável (GIAMMUSSO, 1992).

A mistura de concreto fresco consegue deformar-se sob a ação de um processo na medida que a água presente entre os grãos permite o movimento relativos das

partículas. A película de água formada elimina o atrito interno da massa, facilitando sua movimentação (ALVES, 1993).

A demanda de água é função da área superficial total do material sólido, incluindo partículas de cimento e agregados, e da consistência desejada (GIAMUSSO, 1992). Sendo assim, o principal fator que afeta a consistência das massas é a relação entre a água e materiais secos (ARAÚJO *et al.*, 2000).

A NBR 6118/2014 determina que a consistência deve ser adequada as dimensões da peça a ser concretada, taxa de armadura e com as operações de lançamento e adensamento utilizadas na obra.

2.1.2.3 Coesão e exsudação

A coesão pode ser definida como a capacidade que o concreto tem de se manter misturado, evitando os fenômenos de segregação e exsudação. A segregação é entendida como uma alteração na distribuição do concreto de forma que não se mantenha mais uniforme e ocorre uma separação de seus componentes no estado fresco. Já a exsudação é definida como um fenômeno que é caracterizado pelo aparecimento de água na superfície do concreto após este ter sido lançado e adensado (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Existem dois tipos de segregação. O primeiro está relacionada às misturas secas, consistindo na separação dos agregados da argamassa do concreto. A exsudação é o segundo tipo de segregação estando relacionada com misturas de concretos muito fluidas. Os sólidos tendem a sedimentar sob a ação da gravidade, separando-se da água que é o componente mais leve da mistura. De maneira geral, são resultantes de uma combinação inadequada, quantidade excessiva de partículas de agregado graúdo com altos ou baixos valores de massa específica e métodos de lançamento e adensamento inapropriados (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Na prática a coesão das misturas pode ser avaliada, através de seu aspecto, de acordo com as seguintes características (GIAMUSSO, 1992):

- Os agregados não tendem a se mostrar limpos ou lavados;
- As bordas da mistura se mostram convexas;

- Não há evidência de separação de água ou pasta, principalmente nas bordas das misturas.

A quantidade e velocidade de exsudação dependem da dosagem de concreto, teor de água, temperatura, finura do cimento, granulometria do agregado e da ação de aditivos (ANDRIOLO, 1984). Para minorar esse fenômeno é necessário alterar a dosagem do concreto, aumentando-se a proporção de finos e o teor de cimento (ARAÚJO *et al.*, 2000).

2.1.3 Propriedades do concreto no estado endurecido

O concreto como um material enrijecido é considerado a partir do momento que se dá o fim da pega, de maneira que as propriedades relacionadas ao estado fresco, não incidem sobre o material, mas influenciam suas características no estado endurecido.

Neste estado são analisadas as seguintes propriedades: massa específica, resistência à compressão, resistência à tração, permeabilidade e absorção, retração, fluência e durabilidade. Nesta seção serão apresentadas apenas as propriedades analisadas no trabalho.

2.1.3.1 Resistência à compressão

A resistência à compressão do concreto pode ser definida como a tensão máxima que pode ser aplicada sem que o material entre em colapso. É um parâmetro geralmente especificado uma vez que sua função nas estruturas de concreto armado se resume basicamente a resistir a esforços de compressão, enquanto que as armaduras resistem aos esforços de tração (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Dentre os fatores que afetam a resistência à compressão dos concretos, pode-se destacar:

- Tipo e dosagem de aglomerante;
- Relação água/cimento;

- Idade;
- Dimensão máxima, forma e textura superficial dos agregados; e
- Condições de adensamento e cura.

A resistência do concreto está diretamente relacionada com a resistência da pasta e consequentemente do cimento utilizado, principalmente nas primeiras idades. Já no que tange a relação água/cimento, à medida que este parâmetro aumenta, maior será a porosidade da pasta formada, e portanto menor sua resistência (GIAMUSSO, 1992).

Os mecanismos de ruptura dos concretos, geralmente, ocorrem na zona de transição, que nesses casos possuem resistência inferior à pasta e ao agregado graúdo. Dessa maneira, a resistência do agregado graúdo não interfere, decisivamente, na resistência final do concreto. Porém, suas características como forma e textura, podem influenciar nas propriedades dessa zona, principalmente, devido ao teor de umidade presente, alterando os compostos hidratados formados e consequentemente sua resistência (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Vale ressaltar que, a medida da resistência é função das reações de hidratação dos compostos cimentícios, sendo avaliada em corpos de prova curados por um período de cerca de 28 dias. Giamusso (1992) apresentou uma tabela (Tabela 1) com a variação da resistência relativa de um traço comum de concreto ao longo das idades.

Tabela 1. Influência da idade nas resistências relativas do concreto.

Idade (dias)	3	7	21	28
Resistência	50%	70%	92%	100%

Fonte: Giamusso (1992).

2.1.3.2 Permeabilidade e absorção

A permeabilidade do concreto pode ser definida como a propriedade que possibilita a entrada de água para seu interior devido aos vazios existentes. Já o termo

absorção se refere à entrada de água na estrutura porosa do concreto devido a forças capilares que ocorrem em virtude de uma diferença de pressão entre a superfície nos poros capilares e a superfície livre da água no exterior do concreto (COUTINHO, 1998).

Na Tabela 2 estão mostrados os principais fatores que influenciam na porosidade, permeabilidade e absorção do concreto.

Tabela 2. Fatores que influenciam a porosidade, a permeabilidade e a absorção.

Materiais constituintes	Água	Quantidade Pureza
	Cimento	Composição Finura
	Agregados	Quantidade Tipo Diâmetro Graduação Impurezas
	Adições	Quimicamente ativos Quimicamente inerentes
Modos de preparação	Mistura Lançamento Adensamento Acabamento	
Condições posteriores	Idade Cura Condições de ensaio	

Fonte: Petrucci (1998).

Os vazios no interior do concreto se devem em razão de se existir uma quantidade de água superior a necessária para a hidratação do cimento, dessa forma, no momento que ocorre a evaporação da água excedente, os vazios aparecem. Além disso, outras razões, são (PETRUCCI, 1998):

- Incorporação de ar na massa;
- Vazios existentes no agregado;
- Combinação química entre o cimento e água com diminuição do volume.

A quantidade de água irá influenciar diretamente nos índices de permeabilidade do material, de maneira que esta propriedade diminui com a diminuição do fator água/cimento e com a evolução dos processos de hidratação do concreto (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

2.1.4 Macroestrutura e microestrutura do concreto

A nível macroscópico, referindo-se aos componentes que são visíveis à olho nu, pode-se ver o concreto como um material bifásico, composto por partículas de agregados dispersos em uma matriz de cimento. Em outra vertente, este material pode ser visto como uma composição de três fases, em que inclui-se os vazios presentes (MEHTA e MONTEIRO, 2008). Na Figura 1 pode ser visualizado a seção transversal de um corpo de prova de concreto, onde pode-se identificar os componentes da macroestrutura deste material.



Figura 1. Seção transversal de um corpo de prova de concreto. Fonte: Autor (2015).

Quanto à microestrutura, há uma composição mais complexa de três fases que são: partículas de agregado, matriz da pasta de cimento e zona de transição. Cada qual encaradas como um material também heterogêneo, uma vez que, as partículas de agregado podem conter inúmeros minerais além de microfissuras e vazios, bem

como a matriz de pasta e zona de transição diferentes tipos e quantidades de fases sólidas e microfissuras.

A zona de transição possui uma espessura com cerca de 10 a 50 μm , constituindo uma região microscópica que contorna o agregado. Esta zona, geralmente, é mais fraca do que a pasta de cimento hidratada e o agregado e possui bastante influência no comportamento mecânico do concreto (NEVILLE, 1997). Na Figura 2, pode-se visualizar as três fases componentes da microestrutura de um concreto convencional.

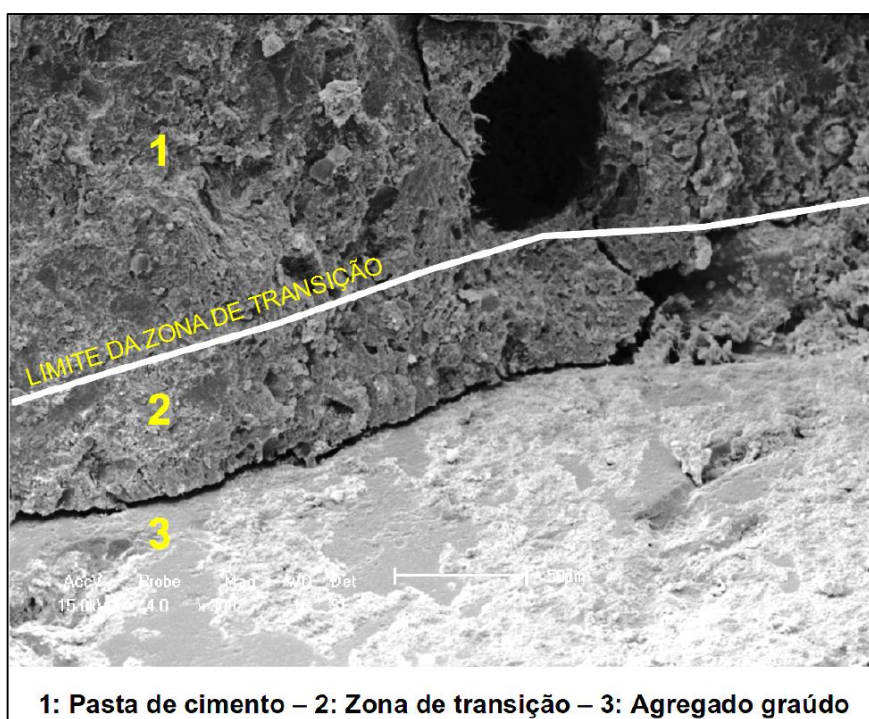


Figura 2. Microestrutura de um concreto convencional. Fonte: Lima (2013).

2.2 Aglomerante

Os aglomerantes são materiais, geralmente pulverulentos, com propriedades aglutinantes que tem como principal função unir os grãos do agregado, elevando a resistência do material resultante. Quando são misturados aglomerante, areia e água, têm-se a formação de uma argamassa. Já no caso da mistura de aglomerante e água,

tem-se a formação de uma pasta, que por possuir elevada retração, dificilmente é utilizada (BAUER, 2000).

Estes materiais podem ser classificados como ativos ou inertes. Os aglomerantes ativos podem ser subdivididos em:

- a) Aéreos: São aglomerantes em que sua reação de endurecimento se dá a partir de um contato com o CO₂ do ar, além disso, seus produtos de hidratação não são resistentes à água. São derivados, geralmente, da calcinação da gipsita, ou carbonatos como a rocha calcária (TARTUCE e GIOVANNETTI, 1990; MEHTA e MONTEIRO, 2008).
- b) Hidráulicos: São aglomerantes que endurecem na presença de água e, além disso, seus produtos de hidratação também são resistentes à ação da água. São exemplos a cal hidráulica, o cimento natural e o cimento Portland (VERÇOZA, 1984).
- c) Poliméricos: São aglomerantes em que sua reação ocorre devido à polimerização de uma matriz.

Os aglomerantes inertes, são os casos das argilas e betumes, são aqueles em que seu efeito de endurecimento se dá por meio de secagem (TARTUCE e GIOVANNETTI, 1990).

2.2.1 Cimento Portland

O cimento Portland pode ser definido como um aglomerante hidráulico, fabricado através da moagem do Clínquer, composto, principalmente, por silicatos de cálcio hidráulicos, com uma ou mais formas de sulfato de cálcio e, eventualmente, adições minerais que modificam suas propriedades e facilitam o seu emprego (BAUER, 2000).

Os clínqueres são nódulos de 5 a 25 mm de diâmetro, de uma mistura pré-determinada de calcário e argila, além de outros materiais de comprovada reatividade, por apresentarem cálcio e sílica em sua composição, que são aquecidas a altas temperaturas, próximas a 1450°C (TAYLOR, 1997; MEHTA e MONTEIRO, 2008).

2.2.1.1 Composição química do cimento Portland

Os principais componentes do cimento Portland, determinados através de análises químicas rotineiras, e expressos em termos de óxidos, são a cal (CaO), sílica (SiO₂), alumina (Al₂O₃), o óxido de ferro (Fe₂O₃), certa quantidade de magnésia (MgO) e uma baixa quantidade de anidrido sulfúrico (SO₃). Este último, é adicionado após a calcinação com a finalidade de retardar a tendência de pega instantânea do clínquer pulverizado de cimento Portland, devido à alta reatividade de um de seus componentes, visto mais adiante (BAUER, 2000).

Os óxidos do clínquer que compõe o cimento Portland comum estão expressos na Tabela 3. Já os compostos individuais desses óxidos são expressos seguindo-se as abreviações mostradas na Tabela 4.

Tabela 3. Análise química em termos de principais óxidos do Cimento Portland e suas abreviações.

Óxido	Abreviação
CaO	C
SiO ₂	S
Al ₂ O ₃	A
Fe ₂ O ₃	F
MgO	M
SO ₃	S
H ₂ O	H

Fonte: Mehta e Monteiro (2008).

Podem estar presentes na composição do cimento, ainda e, em menor quantidade, componentes como os álcalis (Na₂O, K₂O), o óxido de magnésio (MgO), a cal livre (CaO), dentre outros. É importante ressaltar que a presença de alguns destes componentes em quantidades maiores pode se tornar prejudicial, como visto adiante (SOUZA e RIPPER, 1998).

Tabela 4. Principais compostos constituintes do Cimento Portland.

Nome	Composição	Abreviação	Teores típicos
Silicato tricálcico	3 CaO.SiO ₂	C ₃ S	45 – 60%
Silicato bicálcico	2 CaO.SiO ₂	C ₂ S	15 – 30%
Aluminato tricálcico	3 CaO.Al ₂ O ₃	C ₃ A	6 – 12%
Ferroaluminato tetracálcico	4 CaO.Al ₂ O ₃ .FeO ₃	C ₄ AF	6 – 8%

Fonte: Neville (1997).

A cal (CaO) é um componente essencial do cimento Portland, de maneira que as propriedades mecânicas desse material aumentam com o aumento do teor de cal, quando completamente combinada. A existência de cal livre, decorrente de falhas do processo de fabricação, podem influenciar na estabilidade dimensional das argamassas e concretos. Quando combinada com a sílica (SiO₂), este material resulta nos principais componentes do cimento (NEVILLE, 1997).

A alumina (Al₂O₃) do cimento tem origem na argila, além disso, quando combinada com a cal promove a aceleração da pega e reduz a resistência ao ataque por sulfatos, devendo existir em pequenas quantidades na composição do aglomerante. O óxido de ferro (Fe₂O₃) é útil pelo seu papel fundente, uma vez que, combinada com a alumina, facilita a produção de cal que é convertida em C₃S (NEVILLE, 1997).

A magnésia (MgO) provém sua maioria da dolomita, devendo estar presente em baixas quantidades, uma vez que, sua reação de hidratação se dá de forma lenta e expansiva, agindo de forma nociva e podendo causar deterioração ou imperfeições nos concretos e argamassas (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Para Araújo *et al.* (2000), analisando-se o comportamento mecânico dos componentes hidratáveis do cimento, é possível verificar que:

- O silicato tricálcico (C₃S) é o principal contribuinte para a resistência dos cimentos em todas as idades, especialmente no primeiro mês;

- O silicato dicálcico (C_2S) é o maior responsável pelo ganho de resistência em idades avançadas, especialmente após um ano de idade;
- O aluminato tricálcico (C_3A) é um componente que contribui com a elevação da resistência, principalmente, no primeiro dia de cura.
- O ferroaluminato tetracálcico (C_4F) tem pouca contribuição para a resistência do cimento;
- O C_3S e o C_3A apresentam grande contribuição para a elevação da temperatura do cimento, devido à liberação de calor de hidratação relacionado com o ganho de resistência nas primeiras idades.

É possível constatar que cada um dos quatro compostos agem de forma diferente nas propriedades do aglomerante. Na Tabela 5 estão resumidos as características desses compostos.

Tabela 5. Propriedades dos compostos do cimento Portland.

Propriedades	C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF
Resistência à compressão nas primeiras idades	Boa	Fraca	Boa	Fraca
Resistência à compressão nas idades posteriores	Boa	Boa	Fraca	Fraca
Velocidade de reação de hidratação	Média	Lenta	Rápida	Rápida
Quantidade de calor de hidratação	Média	Pequena	Grande	Média
Resistência à águas agressivas	Média	Boa	Fraca	Fraca

Fonte: Tartuce (1990).

2.2.1.2 Hidratação do Cimento Portland

Segundo Taylor (1997), na química do cimento, o termo hidratação é definido como a totalidade de alterações químicas que ocorrem quando o cimento anidro, ou um de seus constituintes é misturado com a água. Essas reações são, geralmente,

mais complexas do que simples conversões dos componentes anidros em seus respectivos componentes hidratados.

A hidratação do cimento ocorre mediante a hidratação dos seus quatro principais constituintes: C_3S , C_2S , C_3A e C_4AF . O processo de perda de consistência e pega advém, principalmente, da hidratação dos aluminatos (C_3A e C_4AF), enquanto que o ganho de resistência se dá devido a hidratação dos silicatos (C_3S , C_2S) (NEVILLE, 1997). Isso ocorre pois nem todos os compostos reagem na mesma velocidade, os aluminatos tem sua velocidade de hidratação superior à dos silicatos.

Conforme Mehta e Monteiro (2008) a pasta endurecida de cimento é caracterizada pela presença de três compostos hidratados principais:

- Silicato de cálcio hidratado (C-S-H): que constituem o maior volume dentre os sólidos da pasta e é o mais importante na determinação de suas propriedades. São cristais pequenos e fibrilares, de composição química variada e responsáveis pela resistência da pasta endurecida a esforços mecânicos.
- O hidróxido de cálcio (C-H): tende a formar grandes cristais com forma de prismas hexagonais e sua contribuição para resistência do concreto é limitada, uma vez que possui menor área específica, além disso, quando presente em grandes quantidades possui efeito desfavorável na resistência do concreto. Seu tamanho aumenta conforme o espaço livre presente, ocupando de 20% a 25% do volume de sólidos da pasta.
- Sulfoaluminatos de cálcio: desempenham um papel menor nas relações estrutura-propriedade devido ao seu baixo volume de sólidos na pasta, durante os primeiro estágios de hidratação é favorecida a formação de etringita (importante constituinte do concreto). Com o passar dos estágio de hidratação, a etringita se transforma em monossulfato hidratado.
- Grãos de clínquer não hidratados: se formam a depender do tamanho das partículas de cimento anidro e do grau de hidratação.

Na Figura 3 pode-se visualizar uma micrografia eletrônica de varredura da pasta de um cimento Portland comum, demonstrando os aspectos dos compostos

hidratados etringita, C-S-H e C-H. Já na Figura 4, é possível visualizar uma micrografia com as características dos cristais de etringita e monossulfato hidratado.

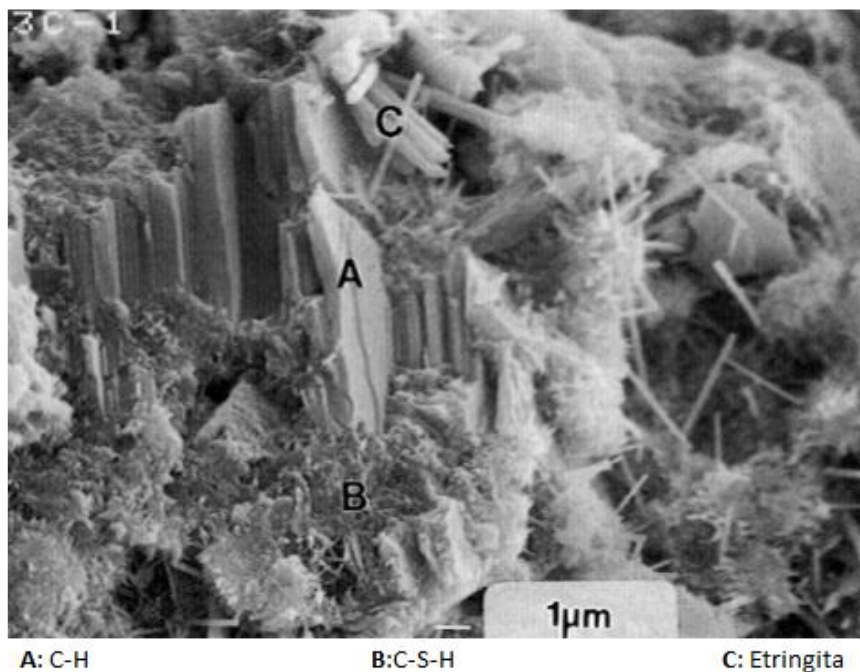


Figura 3. Microestrutura da pasta de cimento com aspectos dos C-S-H, C-H e etringita. Fonte: Sarkar *et al.* (2001) *apud* Lima (2013).

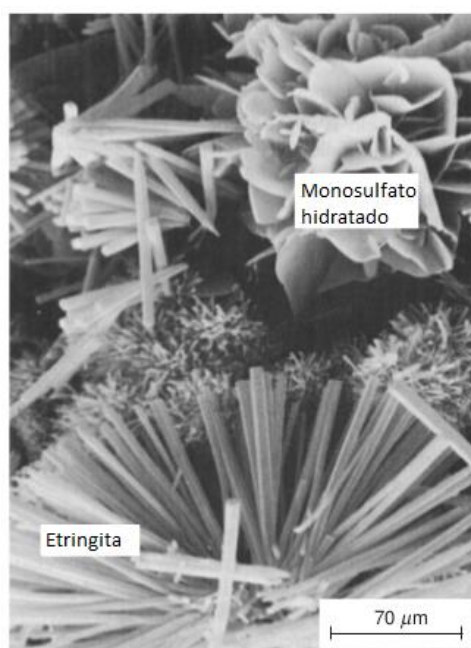


Figura 4. Aspectos dos cristais de etringita e monossulfato hidratado. Fonte: Mehta e Monteiro (1994).

2.2.1.3 Tipos de cimento

Com o passar do tempo, na busca por materiais mais econômicos, de maior resistência e durabilidade, e em função das propriedades físicas e químicas que o concreto deve possuir, novas misturas de cimento foram produzidas.

Os diferentes tipos de cimento são identificados por siglas e sua classe de resistência. As siglas são compostas pelo prefixo CP que remete ao termo cimento Portland, acrescido de algarismos romanos de I a V, de acordo com o tipo de cimento. Já as classes são indicadas pelos números 25, 32 e 40, referindo-se a resistências de, respectivamente, 25 MPa, 32 MPa e 40 MPa, determinada aos 28 dias (GIAMUSSO, 1992).

Na Tabela 6 está apresentado o resumo dos principais tipos de cimento oferecidos no mercado nacional e as normas que regulamentam o recebimento e conferência de cada tipo.

No cimento Portland Comum (CP I) a composição se dá, basicamente, de grãos de clínquer, gesso e pouca ou nenhuma quantidade de adições minerais.

Já no cimento Portland Composto (CP II) são adicionados de 6 a 34% de escória de alto forno, 6 a 14% de material pozzolânico ou 6 a 10% de fíler.

As escórias de alto forno são materiais obtidos no processo de fabricação de ferro-gusa que se dá nas indústrias siderúrgicas. Esse material possui propriedades cimentantes, por apresentar uma composição semelhante ao do clínquer do cimento, além disso, melhoram a durabilidade e resistência do concreto (ABCP, 2002).

A reação química entre a água e escória de alto forno se processa em uma velocidade mais lenta, comparado ao clínquer moído, proporcionando um menor calor de hidratação. Em face disto, o processo de endurecimento demanda um maior tempo, porém, melhora as características de durabilidade e ganho de resistência em idades avançadas devido à uma melhor ligação entre as partículas e redução dos vazios (ARAÚJO *et al.*, 2000).

Tabela 6. Tipos de cimento Portland e normas regulamentadoras.

ABNT	Sigla	Denominação
5732/1991	CP I	Portland Comum
	CP I-S	Portland Comum com adição de Fíler Carbonático
11578/1991		Portland Comum com adição de Escória ou Pozolana
	CP II-E	Portland Composto com Escória
	CP II-Z	Portland Composto com Pozolana
5735/1991	CP II-F	Portland Composto com Fíler
	CP III	Portland de Alto-Forno
5736/1999	CP IV	Portland Pozolânico
5733/1991	CPV-ARI	Portland de Alta Resistência Inicial
12989/1993	CPB	Portland Branco
13116/1994	BC	Portland de Baixo Calor de Hidratação

Fonte: ABCP (2002).

Os materiais pozolânicos são rochas vulcânicas ou materiais orgânicos de componentes silicosos ou silico aluminosos não cristalizados que por si só possuem baixa ou nenhuma propriedade cimentante, porém, quando finamente moídos e na presença de água, reagem com o hidróxido de cálcio liberado na hidratação do clínquer, em temperatura ambiente, para formar compostos cimentantes. Age diminuindo o grau de porosidade do material final, otimizando sua impermeabilização e, consequentemente, resistência à agentes agressivos (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Os fílers são materiais com, aproximadamente, a mesma finura do cimento, de natureza inorgânica mineral, naturais ou artificiais que, em virtude de suas propriedades físicas, apresentam um efeito benéfico nas propriedades do concreto como esvadação e resistência. Esses materiais podem ser inertes ou possuírem

características hidráulicas, com atividades pozolânicas ou cimentantes. Vale ressaltar que, esse componente quando adicionado ao concreto não deve aumentar sua demanda por água ou prejudicar sua resistência (CANOVAS, 1996 *apud* GEYER, 2001).

O cimento Portland pozolânico (CP IV) possui cerca de 15 a 50% de material pozolânico em sua composição. O elevado teor de pozolâna aumenta a durabilidade do concreto a meios ácidos além de proporcionar estabilidade no uso com agregados reativos. Em consequência dos baixos ganhos de resistência nas primeiras idades, esse tipo de cimento não é recomendado para o uso em argamassas armadas, concretos de rápida desforma e concreto protendido (AVELINO, 2011).

Os cimentos Portland de alta resistência inicial (CP V ARI), como o próprio nome sugere, possuem um ganho de resistência, nas primeiras idades, superior quando comparado aos outros tipos de cimento. Isso se dá, principalmente, devido a uma dosagem diferenciada de calcário e argila em sua composição, bem como, devido à sua elevada finura, alcançada com um maior tempo de moagem, e que otimiza as reações de hidratação. Em consequência disto, é gerado um maior calor de hidratação, não sendo recomendado o seu uso em concretos massa, assim como em concretos com agregados reativos, em vista da baixa quantidade de pozolâna. É largamente difundido na produção de artefatos de rápida desforma, concretos protendidos e pisos industriais (AVELINO, 2011).

2.3 Agregados

Os agregados são materiais granulares, geralmente inertes, utilizados como um material de enchimento e resistente, que são unidos por um meio cimentante para formar as argamassas e concretos. Constitui cerca de 60 a 80% do volume total do concreto, sendo utilizado em quase todas as obras de infraestrutura civil, como pavimentação, edificações, barragens, saneamento e outros (NEVILLE, 1997).

Possuem influência do ponto de vista econômico e técnico pois proporcionam economia de materiais, com redução de custos e são responsáveis por importantes propriedades do concreto tanto no estado fresco quanto endurecido. Nesse aspecto, a composição química ou mineralógica das fases sólidas desse material são,

comumente, menos relevantes do que suas características físicas como volume, tamanho e distribuição dos poros (TARTUCE e GIOVANETTI, 1990).

De acordo com Mehta e Monteiro (2008) as principais características dos agregados que influenciam nas propriedades do concreto são:

- Porosidade;
- Composição granulométrica;
- Absorção de água;
- Forma e textura superficial das partículas;
- Resistência à compressão;
- Módulo de elasticidade; e
- Tipos de substâncias deletérias.

Quanto a sua influência no concreto, esta fase é consideravelmente preponderante nas propriedades de massa unitária, módulo de elasticidade, e estabilidade dimensional do compósito.

Desse modo, o controle rigoroso da qualidade deste material torna-se imprescindível para uma manutenção, principalmente, do fator água/cimento do concreto, que deve ser mantido o mais baixo possível (SILVA, 2006).

2.3.1 Classificação dos agregados

De uma forma geral, os agregados são classificados quanto a sua origem, dimensões, massa específica e composição mineralógica.

No que se refere à sua origem, segundo Bauer (2000), os agregados podem ser classificados em naturais, quando provém da natureza prontos para serem utilizados, necessitando no máximo de processos de lavagem e classificação, e em artificiais quando devem passar por transformações para se tornarem aptos ao uso.

Quanto as suas dimensões, a norma NBR 7211/2009 classifica os agregados em miúdos e graúdos. Os agregados graúdos são provenientes da britagem de rochas estáveis, possuindo um máximo de 15% de material passante na peneira de 4,8mm,

como é o caso do pedregulho natural, seixo rolado, pedra britada e outros. Já o agregado miúdo, ao contrário do anterior, possui no máximo 15% de material retido na mesma peneira, sendo exemplos a areia quartzosa, o pedrisco, entre outros (PETRUCCI, 1998).

Quanto a massa específica os agregados podem ser classificados em leves, médios e pesados. Para agregados comumente utilizados na construção civil, o valor para a massa específica real, na qual se excluem o volume dos vazios, giram em torno de 2600 a 2700 kg/m³. Este parâmetro é importante, principalmente, na produção de concretos especiais, como concretos leves, utilizados na confecção de blocos para isolamento térmico, ou concretos pesados, aplicados em blindagens na indústria atômica.

Para a fabricação de concretos e argamassas é importante o conhecimento da mineralogia dos agregados, tendo em vista que muitas de suas propriedades físicas e mecânicas advém de sua rocha mãe. Neste contexto, podem ser provenientes da decomposição de três tipos de rochas: ígneas, sedimentares ou metamórficas (PETRUCCI, 1998).

2.3.2 Propriedades dos agregados

As propriedades dos agregados são altamente dependentes das características mineralógicas da rocha fonte, das condições de exposição ao meio em que se encontram e da metodologia de extração utilizada (MEHTA e MONTEIRO, 2008). Em face disto, as propriedades dos agregados podem ser divididos em três grupos, como explicitado na Tabela 7.

Mehta e Monteiro (2008) afirmam que a forma e a dimensão dos agregados podem influenciar na quantidade de água acumulada junto à superfície do agregado, alterando a resistência da zona de transição e consequentemente do concreto. As partículas alongadas, achatadas e grandes tendem a acumular mais água, causando o fenômeno de esxudação interna que enfraquece a zona de transição.

Tabela 7. Propriedades dos agregados de acordo com as condicionantes.

	Condicionantes		
	Porosidade	Composição química e mineralógica	Condições prévias condicionantes de fabricação
Características	Massa específica aparente	Resistência	Tamanho
	Absorção de água	Módulo de Elasticidade	Forma
	Resistência	Substâncias deletérias presentes	Textura das partículas
	Módulo de Elasticidade	Cargas elétricas	
	Sanidade		

Fonte: Farias e Palmeira (2007).

A textura e mineralogia das partículas também influenciam nas características da zona de transição, além de poderem interferir na demanda de água e consequentemente na resistência e permeabilidade dos concretos (HAHIN, 1984). Em vários casos, os agregados possuem uma porosidade superior a pasta de cimento de reduzida relação água/aglomerante, em virtude de sua natureza e condições de cristalização, diminuindo a resistência do concreto a agentes agressivos (PRUDENCIO, 1986).

A granulometria do agregado pode influenciar na porosidade total, uma vez que a utilização de agregados bem graduados tendem a proporcionar uma redução na quantidade e tamanho dos vazios, aumentando o empacotamento e diminuindo o consumo de cimento. Quanto a sua resistência, uma vez que se apresentam, na maioria dos casos, com valores bem superiores à resistência da argamassa, tendem a possuir pouca influência para a determinação desse parâmetro em concretos convencionais. Já no caso de concretos de alto desempenho, onde as argamassas

possuem elevadas resistências, esse aspecto pode ser tornar um fator limitante (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

2.4 Aditivos

Os aditivos são produtos químicos usados em pequenas quantidades no concreto com o intuito de melhorar as propriedades deste material no estado fresco e endurecido e adequá-los a determinadas condições. São usados para otimizar suas características de manuseio, mecânicas, resistências a solicitações físicas e químicas, ou ainda para torná-los mais econômicos e duráveis (GIAMUSSO, 1992).

Sua eficiência depende de fatores tais como (SOUZA, 2007):

- escolha correta para a finalidade a que se pretende;
- realização de dosagem do concreto;
- utilização do teor correto;
- utilização da maneira correta.

O uso desses aditivos no preparo do concreto resulta em diversos benefícios, dentre eles destacam-se:

- aumento da compacidade do concreto endurecido;
- melhoria da coesão do concreto fresco;
- aumento da resistência a esforços mecânicos;
- melhoria da trabalhabilidade;
- redução da permeabilidade;
- diminuição da retração;
- aumento da durabilidade;
- aceleração da desforma;
- diminuição do calor de hidratação;
- retardamento ou aceleração da pega;

- possibilidade de obtenção de concretos auto adensáveis.

Esses materiais são classificados a partir de sua ação no interior do concreto. Alguns agem instantaneamente no sistema água-cimento, seja por alteração na tensão superficial ou por adsorção à superfície das partículas de cimento. Outros tipos, se dissociam e afetam as reações químicas entre os compostos de hidratação, de alguns minutos até algumas horas após sua aplicação. Dentre os tipos produzidos pelas indústrias destacam-se (MEHTA e MONTEIRO, 2008):

- ✓ Plastificantes;
- ✓ Superplastificantes;
- ✓ Retardadores de pega;
- ✓ Aceleradores de pega;
- ✓ Incorporadores de ar.

Os aditivos plastificantes melhoram a plasticidade da mistura possibilitando uma redução no consumo de água, por essa razão são chamados também de redutores de água ou dispersores. Por possuírem moléculas polares agem fixando-se as partículas de cimento e proporcionando sua repulsão e a manutenção da camada de água entre elas.

Os aditivos aceleradores agem diminuindo o tempo de início e fim de pega, bem como acelerando o desenvolvimento das resistências iniciais. Em contrapartida o seu uso leva a uma liberação mais rápida do calor de hidratação, além disso, vale ressaltar que, em idades mais avançadas a resistência pode apresentar algumas perdas. O cloreto de cálcio é o mais utilizado com esta função, porém, também são utilizados outros materiais como carbonatos, silicatos, fluossilicatos e compostos orgânicos com trietanolamina (GIAMUSSO, 1992).

Os retardadores de pega, ao contrário do anterior, são utilizados para aumentar os tempos de início e fim de pega. Em geral, são a base de açúcares (glicose, gluconatos e sacarose) que reagem com os compostos de cálcio, gerando produtos instáveis que se decompõem após algum tempo, permitindo a retomada do curso normal da hidratação (GIAMUSSO, 1992).

Os aditivos superplastificantes tem um comportamento semelhante aos plastificantes, porém com um efeito muito mais intenso. Enquanto os primeiros

reduzem de 5 a 10% do teor de água, esses aditivos podem reduzir até 25% desse teor, mantendo a mesma consistência. São formados por tensoativos aniônicos de cadeia longa e elevada massa molecular, que reduzem consideravelmente a tensão superficial da água e aumentam a fluidez do sistema (NEVILLE, 1997).

Os aditivos incorporadores de ar funcionam adsorvendo minúsculas bolhas de ar esféricas que se mantêm entre as partículas de água e ar ou água e cimento, aumentando a trabalhabilidade e reduzindo a quantidade de água de amassamento necessária. Também aumentam a resistência dos concretos ao congelamento e são úteis na produção de concretos leves. Consistem, geralmente, de sais de resinas de madeira, materiais proteicos e ácidos graxos, e alguns detergentes sintéticos (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

2.5 Adições minerais

Segundo Lohtia e Joshi (1996) as adições minerais são materiais inorgânicos, finamente divididos, de natureza silico aluminosa que ao serem adicionados ao concretos promovem melhorias no desempenho desse material no que tange suas propriedades mecânicas e durabilidade.

Possuem propriedades cimentícias, pozolânicas ou de preenchimento dos poros e são incorporados aos concretos em proporções que podem chegar em até 100% da massa do cimento. São utilizados de duas formas geralmente: em substituição de parte do cimento com a finalidade de reduzir os custos e; como adição em diferentes percentuais em relação à massa do cimento, tendo como objetivo principal proporcionar um destino final sustentável para o material (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

São utilizados em grandes quantidades com a finalidade de reduzir custos, bem como melhorar as propriedades do concreto no estado fresco e endurecido como sua trabalhabilidade, resistência mecânica, à fissuração térmica, à expansão álcali-agregado e ao ataque por sulfatos (GOMES E BARROS, 2009).

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

- Quimicamente ativas: Quando os materiais utilizados possuem propriedades pozolânicas ou cimentantes. Como explicitado na seção 2.2.1.3, os materiais pozolânicos reagem quimicamente com o hidróxido de cálcio, resultante da hidratação do cimento, para formar compostos cimentantes como o C-S-H. Já os materiais cimentantes já possuem em sua composição o hidróxido de cálcio necessário, porém sua hidratação se dá, geralmente, de forma mais lenta e não é suficiente para proporcionar resistências ao material para fins estruturais.
- Sem atividade química: possuem efeito predominantemente físico, sendo dividido em três ações principais: efeito fíler que, como já foi visto, aumenta a densidade da mistura com um preenchimento dos vazios pelas partículas da adição; o refinamento da estrutura de poros e dos produtos de hidratação do cimento, devido as pequenas partículas da adição que podem funcionar como pontos de nucleação para os produtos de hidratação; e alteração da microestrutura da zona de transição, reduzindo o efeito da exsudação interna no material.

2.6 Lodo de estações de tratamento de esgoto (ETE)

Os processos de tratamento de efluentes são, em uma abordagem final, mecanismos de separação das partículas sólidas da água. Enquanto que a água pode retornar para os rios ou ser inserida novamente como recurso de abastecimento, a fase sólida necessita ser estabilizada e disposta de forma a não causar impactos ambientais ao meio ou prejuízos à saúde pública (CASSINI, VAZOLLER E PINTO, 2003).

As estações de tratamento geram um resíduo sólido em grande quantidade e com características variáveis, denominado de lodo, que pode ser biológico ou químico a depender do tipo de afluente e da técnica aplicada para tratamento. Esse resíduo exige uma destinação final adequada em termos de saúde pública e preservação ambiental. Embora sua gestão seja complexa e envolva a maior parte dos custos de uma ETE, o planejamento e execução de sua gestão é negligenciada, em diversos momentos, nos países em desenvolvimento (ANDREOLI E PINTO, 2001).

Segundo Nuvolari e Costa (2010), o lodo é um resíduo sólido resultante do tratamento de águas residuais. É um material, na maior parte dos casos, rico em matéria orgânica, heterogêneo, e que apresenta elevada umidade, mesmo após ter sido submetido a processos de desidratação. Ademais, possui concentrações substancialmente elevadas de nitrogênio, substâncias químicas e outros minerais, podendo ainda possuir elementos potencialmente tóxicos.

Jordão e Pessoa (2011) comentam que as características do lodo, como as físicas, químicas e biológicas vão depender, principalmente das características do esgoto afluente e dos mecanismos de tratamento utilizados na estação. Sendo assim, para a escolha do tratamento e disposição final adequados, é necessário verificar alguns aspectos primordiais do lodo, como: matéria orgânica, organismos patogênicos, metais pesados, nutrientes, substâncias tóxicas, produtos químicos e outros.

A depender da etapa do fluxograma de tratamento do esgoto afluente e do mecanismo utilizado o lodo pode ser classificado de diferentes formas. Aqueles advindos dos decantadores primários que recebem o esgoto afluente, composto por sólidos sedimentáveis é chamado de lodo primário. Já o lodo advindo de uma etapa de tratamento biológico é chamado de lodo secundário ou lodo biológico, sendo a própria biomassa que se desenvolveu a partir do alimento fornecido pelo esgoto afluente. Por fim, tem-se o lodo misto resultante, como o nome sugere, da mistura do lodo primário com o secundário e, por último, o lodo químico obtido em sistemas de tratamento que utilizam etapas físico-químicas em seu fluxograma (VON SPERLING, 2014).

Para Von Sperling (2014), geralmente, o termo lodo é utilizado para se referir aos subprodutos sólidos gerados no tratamento dos esgotos. O lodo secundário constituído principalmente de sólidos biológicos também pode ser chamado de bio-sólidos, de modo que suas características físicas e químicas sejam apropriadas para uma utilização produtiva, como na agricultura. Assim valoriza-se sua reutilização, em contraste com sua disposição sem fins reais, considerando apenas seu confinamento, como ocorre em aterros, disposição no solo ou incineração.

2.6.1 Caracterização do lodo

Conforme Van Haandel e Sobrinho (2006) o lodo produzido nos sistemas de tratamento de águas residuárias podem possuir algumas características indesejáveis, seriam elas:

- instabilidade biológica: uma vez que o lodo se torna putrescível caso parte do lodo, em específico, o material biodegradável, se apresente em alta concentração;
- constitui um problema à saúde pública devido à grande quantidade de vírus, bactérias e parasitas que degradam a qualidade higiênica do lodo;
- baixa concentração de sólidos suspensos com alta produção de lodo.

Metcalf & Eddy (2003) comentam que para um tratamento e disposição mais eficientes dos sólidos produzidos pelo tratamento de águas residuárias é muito importante o conhecimento das características dos sólidos que serão processados. Essas características dependem da origem desses sólidos, de sua idade, e do tipo de processo pelos quais foram submetidos.

Muitos dos constituintes químicos, incluindo os nutrientes, são importantes na consideração da disposição final dos sólidos processados e dos líquidos removidos durante o tratamento. O conhecimento e medição do pH, alcalinidade, e quantidade de ácidos orgânicos presentes é importante no controle de processos de digestão anaeróbia. A quantidade de metais pesados, pesticidas e hidrocarbonetos devem ser determinados quando métodos de incineração e a aplicação em solos são realizados.

O lodo bruto não é recomendado para sua utilização com fins agrícolas, devendo, inicialmente ser realizado sua estabilização biológica e até mesmo desidratação. O lodo seco não representa perigo algum no que tange a possibilidade de transmissão de doenças. Além disso a presença de metais pesados, substâncias tóxicas e produtos químicos, está relacionada, na maioria dos casos, à efluentes industriais. A disposição desses elementos deve ser cuidadosa, já que, em elevadas concentrações podem prejudicar o tratamento biológico e contaminar áreas de aterro, além de serem tóxicos ao homem, plantas e animais (JORDÃO E PESSÔA, 2011).

Os lodos provenientes de estações de tratamento de efluentes industriais, dependendo da tipologia da indústria, dos produtos fabricados e das operações

realizadas, podem conter maior ou menor grau de diversos poluentes, relativos aos constituintes típicos de esgotos domésticos e àqueles específicos da linha de produção (VON SPERLING, 2014).

2.6.2 Tratamento do lodo

O tratamento dos subprodutos sólidos gerados no tratamento da fase líquida dos esgotos é de fundamental importância. Embora o lodo possua em sua composição o equivalente a 95% de água, é chamado de fase sólida visando distingui-lo do fluxo líquido que é tratado (DOS SANTOS, 2007).

O gerenciamento do lodo apresenta como fases principais: adensamento; estabilização; condicionamento; desidratação; higienização e disposição final. A escolha por cada uma dessas etapas irá depender do tratamento utilizado para a fase líquida bem como da etapa seguinte de tratamento e da disposição final do resíduo (VON SPERLING, 2014).

Imhoff (1996) afirma que a função do planejador da estação de tratamento é combinar as possíveis e diferentes soluções de tratamento visando uma sequência de processos de baixo custo e alta confiabilidade. Em um caso hipotético, se a fase de tratamento do lodo falha, a eficiência da estação fica comprometida, uma vez que, as áreas de armazenamento rapidamente se esgotam e o lodo passa a ser retirado conjuntamente com o efluente.

2.6.3 Disposição final

Embora possam ser aplicadas todas as técnicas de tratamento citadas no capítulo anterior, não se deve ter a ilusão de que a questão da disposição do resíduo esteja resolvida. A preocupação principal é a de encontrar uma forma sustentável e economicamente viável para o seu descarte. Uma estação de tratamento que não consiga alguma forma adequada de disposição está fatalmente condenada ao insucesso (IMHOFF, 1996).

A disposição desse resíduo é uma preocupação mundial. Em muitos casos, os projetos de ETEs negligenciam esse aspecto, acarretando em situações de gerenciamento emergencial que demandam elevados custos ambientais e financeiros, comprometendo, até mesmo, a eficiência de todo o sistema de tratamento. Sendo assim, é uma atividade de grande importância e complexidade, que pode extrapolar os limites das estações e exige a participação e integração de outros setores da sociedade (ANDREOLI E PINTO, 2001).

Conforme descrito por Pegorini e Andreoli (2006), no Brasil, assim como em outros países em desenvolvimento, essa questão não tem tomado a devida importância, o que tem gerado acúmulos de passivos ambientais de grandes dimensões, que enquadram essas práticas em multas e autuações pelos órgãos ambientais. Como já abordado, esse assunto ganhou grande importância com a realização da Agenda 21 que instruiu em seu Capítulo 21 o manejo ambientalmente saudável dos resíduos sólidos.

Os programas prioritários que deveriam ser adotados incluem (Lara *et al.*, 2001):

- minimização na geração de resíduos;
- maximização do reuso e da reciclagem;
- disposição e tratamento ambientalmente adequados para os resíduos; e
- ampliação da cobertura dos serviços que se ocupam com os resíduos.

Além disso, as normalizações brasileiras, assim como a legislação de outros países, deixam claro que a responsabilidade pelos impactos ambientais que podem ser causados por uma destinação inadequada desse resíduo é de seu gerador, podendo ser enquadrado até mesmo na lei de crimes ambientais, Lei nº 9.605 de 12/12/1998. Com isso, os próprios órgãos de licenciamento ambiental passaram a exigir, nos projetos das estações, a definição e especificação do destino final do lodo gerado, representando um grande avanço para a sustentabilidade do processo (ANDREOLI E PINTO, 2001).

Jordão e Pessoa (2011) apontam que a destinação do lodo envolve uma série de estudos e decisões relacionados a critérios como o seu condicionamento, estabilização, grau de desidratação, transporte e os custos e impactos associados a

essa disposição. Na decisão sobre a forma e local de destinação devem-se conhecer fatores como:

- ✓ Processo de produção e características do lodo da estação;
- ✓ Características especiais, geralmente advindas de poluentes específicos de esgotos industriais;
- ✓ Quantidade de lodo gerado, utilizada para os critérios de dimensionamento das instalações durante sua vida útil.
- ✓ Características físicas, químicas ou biológicas diferenciadas e comportamento geomecânico do lodo, no caso de aplicações em aterros sanitários.

Existem diversas formas de disposição do lodo de estações de tratamento de esgotos. As alternativas mais comumente empregas são listadas a seguir (VON SPERLING, 2014):

- descarga oceânica;
- incineração;
- aterro sanitário;
- “landfarming” – disposição superficial no solo;
- recuperação de áreas degradadas;
- reciclagem agrícola;

Para Lara *et al.* (2001) a composição do lodo, que é função do tipo de tratamento utilizado e das características dos esgotos tratados, é um dos principais fatores para a escolha do tipo de disposição final. Deve-se sempre buscar alternativas que estejam associadas a algum uso benéfico do resíduo, evitando a formação de novos compostos poluentes. Na Tabela 8 são descritos alguns comentários a respeito de cada forma de disposição.

Conforme Ingunza *et al.* (2006) outra alternativa para a disposição desses resíduos é no setor da construção civil, sendo uma prática que vem crescendo demasiadamente. A utilização do resíduo tem se mostrado uma atividade promissora no âmbito da absorção de novos materiais no setor, principalmente, devido as

características de produção com utilização de materiais heterogêneos e de variadas composições.

Segundo Pedroza, Vieira e Sousa (2011) todas as formas de disposição apresentam algum tipo de inconveniente em sua concepção. O emprego no cultivo de algumas culturas agrícolas pode ser inviabilizado pela presença de metais pesados na composição química do lodo, já a incineração é um processo de custos relativamente altos e que pode gerar novas formas de poluição a partir de emissões para ar, solo e água. Quanto aos aterros, estes podem gerar inconvenientes no que tange a diminuição da vida útil dos aterros que estão programados para o recebimento de outros resíduos sólidos urbanos.

Tabela 8. Principais alternativas de disposição final do lodo.

Alternativa	Comentário
Descarga Oceânica	Destinação de esgotos no mar, após pré-condicionamento, através de emissários oceânicos ou de navios lameiros. Disposição sem fins agrícolas.
Incineração	Processo de decomposição térmica via oxidação, onde os sólidos voláteis do lodo são queimados na presença de oxigênio, convertendo-os em dióxido de carbono e água, sendo que uma parcela dos sólidos fixos é transformada em cinzas. Disposição sem fins benéficos.
Aterro Sanitário	Disposição de resíduos em valas ou trincheiras, compactadas e recobertas com solo até seu total preenchimento, quando então são seladas. O lodo de esgoto pode ser disposto em aterro sanitário ou co-disposto com resíduos sólidos urbanos. Disposição sem fins benéficos.
“Landfarming” – disposição superficial no solo	Áreas de disposição de resíduos onde o substrato orgânico do resíduo é degradado biologicamente na camada superior do solo e a parte inorgânica é transformada ou fixada nesta mesma camada de solo. Disposição sem fins agrícolas.
Recuperação de área degradada	Disposição de altas doses de lodo em locais drasticamente alterados, como áreas de mineração, onde o solo não oferece condições ao desenvolvimento e fixação da vegetação, em função da falta de matéria orgânica e de nutrientes do solo.
Reciclagem agrícola	Disposição do lodo em solos agrícolas em associação ao plantio de culturas. Destinação benéfica para o lodo, neste caso, considerado bio-sólido.

Fonte: Adaptado de Lara *et al.* (2001).

Os impactos ambientais que estão associados a cada tipo de disposição podem ser mais ou menos complexos, e são função de parâmetros como a quantidade de lodo disposto, frequência, duração e extensão da disposição, características físicas, químicas e biológicas do resíduo, e outros aspectos que determinam a magnitude os impactos.

Segundo Von Sperling (2014), no Brasil, a utilização do lodo de ETE's e seus derivados em culturas agrícolas é regulada pela Resolução do Conama 375/2006, de 29/08/2006 que define critérios e procedimentos para essa reutilização, caracterizando duas classes de lodos:

- Classe A: poderão ser utilizados em quaisquer culturas (respeitadas algumas restrições);
- Classe B: utilização restrita ao cultivo do café, silvicultura, culturas para produção de fibras e óleos, com a aplicação mecanizada, em sulcos ou covas, seguida de incorporação.

Essa normalização impõe uma série de restrições, definindo a necessidade de projetos agrônômicos, taxas de aplicação, e portanto, deve ser consultada em sua íntegra. Ela ainda apresenta alguns requisitos quanto parâmetros de qualidade do resíduo como a concentração máxima de substâncias inorgânicas e de patógenos no lodo.

2.6.4 Utilização do lodo como insumo na construção civil

Em virtude da necessidade de disposição adequada e sustentável do lodo, aliado a escassez de espaço físico para a disposição de aterros sanitários, e ainda com perspectiva de aumento na produção desse resíduo, ampliaram-se os estudos a respeito de sua viabilização como insumo na construção civil (MENEZES *et al.*, 2002). Além disso, o setor da construção civil é um dos maiores consumidores de recursos naturais do planeta, chegando até valores de 20 a 50%, o que evidencia ainda mais a necessidade de se encontrar meios de preservar as matérias primas utilizadas (HOPPEN *et al.*, 2005).

Para Ingunza *et al.* (2006) a utilização do lodo, em processo de reciclagem, nesse setor tem se mostrado uma atividade promissora, no entanto, deve-se atentar para o valor de mercado dos produtos gerados, com vistas aos custos envolvidos na reciclagem e potenciais impactos ambientais decorrentes.

Para Pinto (2005) o processo de estabilização do lodo por solidificação é um processo que envolve a imobilização do resíduo dentro de uma matriz solidificada, de maneira que este fique adsorvido a sua microestrutura, podendo ou não se dar por meio de uma interação química. Para Brehm (2013) geralmente envolvem-se aglomerantes como a cal e o cimento Portland como agente solidificante e fixador no processo de encapsulamento, porém, outra alternativa é a cerâmica vermelha, amplamente estudada por autores como Herek *et al.* (2005), Jordan *et al.* (2005) e Teixeira *et al.* (2002).

No material cerâmico, a eficiência de encapsulamento irá depender da qualidade da matriz que por sua vez depende de fatores como composição da argilas e características do processo de queima (KAZMIERCZAK, 2010). Além disso, as partículas coloidais das argilas silicatadas, por apresentarem, em geral, carga negativa, podem promover a adsorção e retenção de cátions em sua superfície (MCBRIDE, 1994).

As matrizes à base de cimento Portland estão entre as mais empregadas uma vez que as reações químicas desse compósito são ativadas somente pela água, ocorrendo em temperatura ambiente e com endurecimento, dando origem a uma matriz de microestrutura sólida. Um dos principais determinantes da eficiência do processo é a quantidade de água empregada que influencia na estrutura de poros do material, bem como a quantidade de resíduo empregada e as condições de exposição (BREHM, 2013).

Conforme Menezes *et al.* (2002), no Brasil, embora o processo de reutilização de resíduos na construção civil ainda não tenha se consolidado, devido a fatores como a falta de integração entre pesquisas, falta de incentivo para as indústrias e falta de tecnologia mais adequada, existem diversas pesquisas que buscam incorporar o lodo de ETEs em materiais como concretos, argamassas e materiais cerâmicos. Isso se dá, devido às peculiaridades de suas produções e a capacidade de inertização de possíveis materiais tóxicos em sua microestrutura.

Diferentemente de outros países, que possuem legislações específicas para garantir a segurança ambiental nesse processo de incorporação, o Brasil não dispõe de normas que possam avaliar essa potencialidade. Entretanto, podem ser utilizadas normas como a ABNT NBR 10004/2004 que avaliam o risco ambiental de destinação dos resíduos de construção e demolição, considerando que o material com lodo após seu uso e consequente demolição, também se constitui um resíduo (INGUNZA *et al.*, 2006).

Com essa norma é possível classificar o resíduo em duas categorias, de acordo com sua periculosidade, o que é função de suas propriedades físicas, químicas ou infectocontagiosas. As categorias são (ABNT, 2004a):

- Resíduos Classe I: Perigosos;
- Resíduos Classe II A: Não perigosos e não inertes;
- Resíduos Classe II B: Não perigosos e inertes

São considerados inertes quando colocados em água destilada ou deionizada, à temperatura ambiente, e nenhum de seus constituintes são solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, com exceção dos aspectos cor, turbidez, dureza e sabor (ABNT, 2004a).

Essa norma é complementada pela NBR 10005/2004 e 10006/2004 que estabelecem os procedimentos para obtenção dos extratos lixiviados e solubilizados de maneira que estes não venham a ultrapassar os limites máximos especificados na NBR 10004/2004.

De forma geral, estudos realizados com diversos tipos de lodo, sejam eles de ETEs domésticas ou industriais, mostram que na maioria dos casos, o resíduo final é classificado como resíduo classe II A, não perigosos e não inertes, o que viabiliza ainda mais a difusão dessa prática.

2.6.4.1 Matéria prima na indústria cimentícia

A incorporação de resíduos em materiais cimentícios, como visto, pode se dar por meio de mecanismos de adição à mistura sem alteração na quantidade dos outros componentes ou em substituição a um destes, sejam aglomerantes ou agregados.

Segundo Mehta e Monteiro (2008) essas adições podem funcionar como materiais pozolânicos, que contribuem para o aumento da resistência da mistura ao longo do tempo, materiais cimentantes ou ainda como materiais inertes, não apresentando atividade química e de efeito predominante físico, podendo ser distinguido em três ações principais: efeito fíler, refinamento da estrutura de poros e dos produtos de hidratação do cimento e alteração da zona de transição.

Nos próximos capítulos, alguns importantes trabalhos sobre a incorporação desse resíduo são apresentados, evidenciando as situações de viabilidade e as peculiaridades necessárias para tal.

2.6.4.2 Incorporação de lodo na fabricação de argamassas

Bhatty e Reid (1989) utilizaram CLE em adição a argamassas de cimento e areia concluindo que esse resíduo pode apresentar atividade pozolânica na argamassa, além de funcionarem como finos, aumentando seu desempenho mecânico. Atentaram ainda para o grande potencial de incorporação devido aos altos índices de produção de argamassas no setor da construção civil.

Com o intuito de avaliar a influência da adição de diferentes teores de cinzas de lodo de esgoto (CLE) na trabalhabilidade de argamassas em substituição ao cimento, Monzó *et al.* (2003) aplicaram 7,5% e 30% do resíduo na massa, utilizando também diferentes teores de aditivos superplastificantes e de água. Os resultados dos ensaios mostraram que o aumento do teor de CLE promoveu uma diminuição da trabalhabilidade o que pode ser explicado pela morfologia irregular da CLE e a alta absorção de água de suas partículas.

Fontes *et al.* (2004) promoveram a incorporação também de CLE em argamassas e concretos de alto desempenho, sendo para as argamassas utilizados os teores de 0% e 30%. Foram avaliados parâmetros como resistência à compressão, porosidade total e absorvidade. Para o primeiro quesito a substituição por 30% de lodo promoveu uma redução de 10% de seu valor. Com relação à porosidade total houve um incremento de 5% a 22% para todas as amostras, porém sua absorvidade diminuiu em relação à mistura de referência, devido a um refinamento dos poros, o que tornou as estruturas com uma maior durabilidade.

Em estudo onde incorporou-se CLE incinerada a 550°C, em três traços de referência 1:3, 1:4 e 1:6, além de três porcentagens de adição 5%, 10% e 20% em relação à massa de cimento, Lessa (2005) pôde concluir que o resíduo apresentou um bom potencial químico, tendo promovido um incremento de resistência à compressão na argamassa. Além disso, com os testes ambientais de lixiviação e solubilização o resíduo foi classificado como Classe II A – não perigosos e não inerte, o que indica uma boa estabilização e fixação dos compostos perigosos na matriz.

As cinzas utilizadas por Coutland *et al.* (2006) apresentaram em sua composição principalmente fosfatos de cálcio, quartzo e vidro, com baixo teor de sílica. Essa cinza foi utilizada em substituição ao cimento nos teores de 25% e 50% em um traço de 1:3, tendo promovido um aumento da resistência das argamassas ao longo do tempo. Porém, os autores observaram que as partículas de CLE são compostas principalmente por grãos irregulares com elevada superfície específica, o que aumentou a demanda de água e pode ter causado uma diminuição no desempenho mecânico das massas.

Cyr *et al.* (2007) adicionaram teores de 25% e 35% de CLE em argamassas e concluíram que o aumento do teor desse resíduo na massa provocou uma perda de trabalhabilidade, além de retardo no tempo de início e fim de pega, redução na resistência mecânica dos corpos de prova fabricados e uma leve atividade pozolânica. Segundo estes autores, a influência na trabalhabilidade pode ser atenuada com o aumento da relação água/aglomerante. Quanto à pega, o principal fator foi a redução do teor de cimento utilizado, assim como presença de alguns elementos, provenientes das cinzas, que alteram o processo de hidratação, é o caso do zinco e fósforo.

Utilizando um lodo gerado em estação de tratamento de efluentes de uma indústria de papel como adição para a produção de argamassas, Paiva (2007) incorporou teores de 0, 5, 10, 20 e 30% em massa do cimento. Foram analisadas a massa específica aparente, absorção de água por capilaridade e imersão, retratibilidade, o isolamento acústico, a resistência à compressão e microestrutura. Determinou-se o teor de 12% como o ideal para a fabricação de blocos sem função estrutural onde é exigida uma resistência mínima de 2,5 MPa.

2.6.4.3 Incorporação de lodo na fabricação de concretos

Fontes (2004) também analisou a influência da adição de CLE em concretos de alto desempenho, utilizando teores de 0 a 10%. A incorporação pôde ser classificada pelos autores como viável uma vez que não trouxe alterações significativas na resistência à compressão dos concretos. Nos ensaios de porosidade e absorção, apenas as misturas com 10% de adição tiveram alteração significativa, fato também evidenciado nas misturas de argamassa. Por fim, os ensaios ambientais mostraram o efetivo encapsulamento dos compostos tóxicos na matriz cimentícia comprovando a viabilidade de aplicação das cinzas como material alternativo em concretos e argamassas.

Em estudos conduzidos por Geyer (2001) ficou evidente a viabilidade de aplicação deste resíduo do ponto de vista ambiental e técnico em concretos, entre outros fatores, devido ao encapsulamento dos compostos perigosos e otimização das propriedades físicas e mecânicas com redução no consumo de cimento Portland. Entretanto, o autor afirma que as possibilidades de utilização das cinzas ficam restritas a concretos de baixa resistência. Na Figura 5 é apresentado a influência isolada do teor de adição de cinzas na resistência à compressão dos concretos, onde se observa uma tendência de redução da resistência para um aumento no teor de adição.

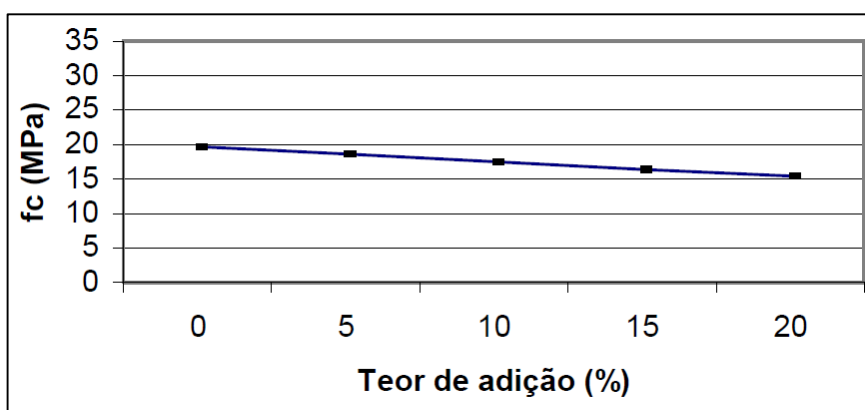


Figura 5. Influência do teor de adição de cinzas na resistência à compressão do concreto. Fonte: Geyer (2001).

Em pesquisa destinada a verificar a viabilidade do uso de resíduo de ETE como agregado miúdo para produção de concretos, Sebben *et al.* (2013) utilizaram lodo de esgoto doméstico incinerados à 350°C em substituição à areia da mistura. Essa substituição se deu em proporções de 15%, 25% e 40%, além disso, foram fabricados 32 corpos de prova, onde foram avaliados a trabalhabilidade, resistência à compressão e massa específica. Os resultados mostraram a viabilidade de incorporação para o teor de 15% onde foram obtidas melhorias consideráveis nos parâmetros analisados.

No sentido de avaliar a influência da temperatura de queima do lodo séptico no índice de atividade pozolânica (IAP) das cinzas, bem como as implicações técnicas e microestruturais da utilização desse resíduo como adição mineral em concretos de cimento Portland, Lima (2013) variou o teor de resíduo em 10%, 20% e 30%. Com os resultados o autor concluiu não haver alterações significativas no IAP das cinzas de lodo de esgoto CLE em função da temperatura de queima. Verificou-se uma diminuição na trabalhabilidade dos concretos para todos os teores de incorporação, porém houve melhoria na resistência mecânica à compressão dos corpos de prova (Figura 6), índice de vazios, absorção de água (Figura 7) e comportamento microestrutural para os concretos com 10% e 20% de resíduo.

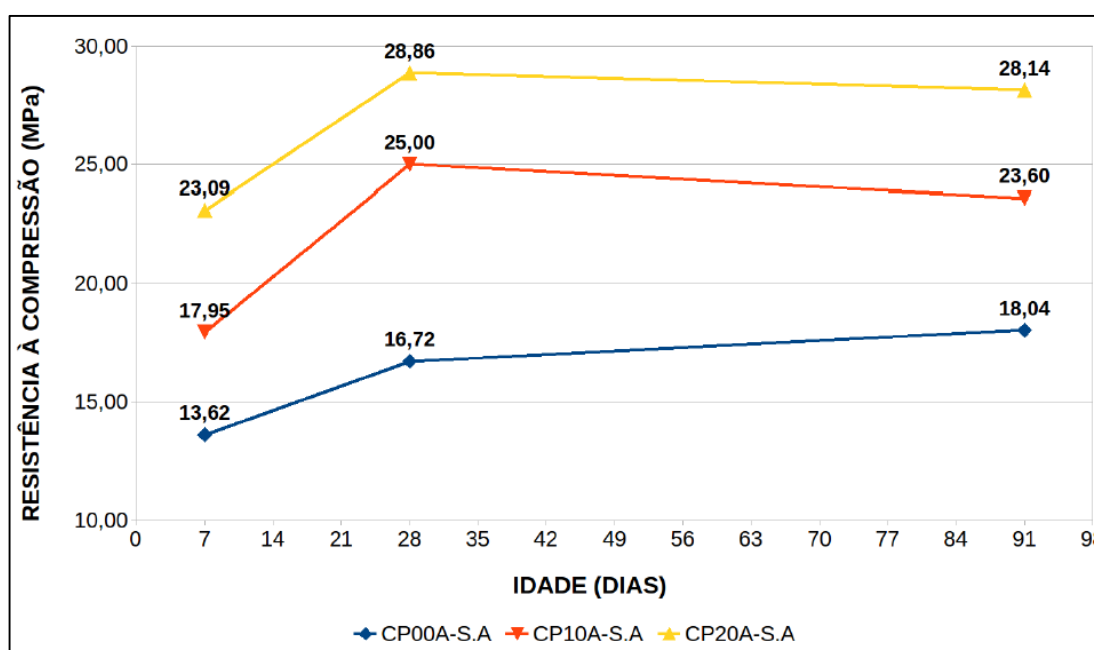


Figura 6. Evolução da resistência à compressão dos concretos produzidos por Lima. Fonte: Lima (2013).

Valls *et al.* (2004) conduziram uma pesquisa que objetivou avaliar a viabilidade de incorporação de lodo natural seco de uma estação de tratamento de esgotos em diferentes teores em concreto de proporções 1:3,65:3,14 e relação a/c 0,56 e verificar suas propriedades físicas e mecânicas. Concluíram que até 10% de resíduo pode ser incorporado em condições bem especificadas, para esse teor de incorporação, foram obtidos como resultados 8% de absorção de água e 6 MPa de resistência à compressão, o que comprova a necessidade de certos cuidados para utilização desses concretos.

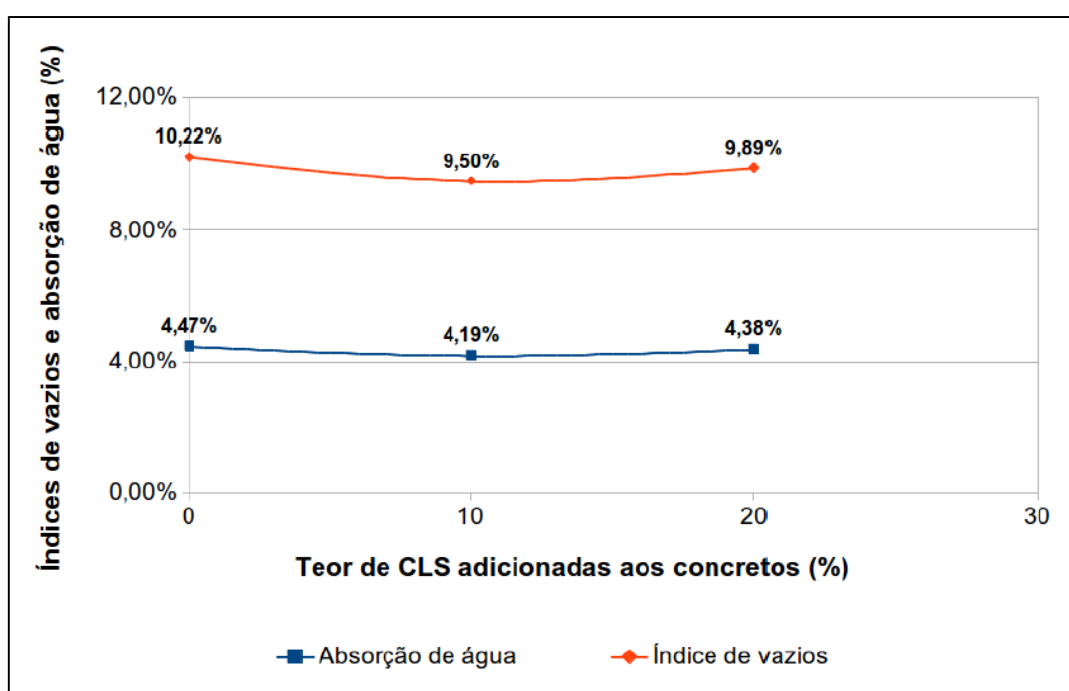


Figura 7. Absorção e índice de vazios em função do teor de CLS adicionada aos concretos. Fonte: Lima (2013).

Rodrigues, Brito e Sardinha (2015) avaliaram as propriedades de concretos estruturais fabricados com agregados muito finos provenientes de lodo gerado no corte de mármore. Foram incorporados, em substituição ao cimento, teores de 0, 5, 10 e 20% do volume total desse aglomerante. Os resultados demonstraram uma viabilidade de incorporação para teores superiores a 10% de resíduo, além disso, a adição de aditivos plastificantes permitiu compensar a redução de propriedades como resistência à compressão e à abrasão em relação ao concreto padrão.

Em pesquisa sobre a adição de lodo de estação de tratamento de uma indústria de batatas pré-fritas em substituição parcial ao cimento para a confecção de concretos, Resende, Bezerra e Gouveia (2012) produziram misturas com 3, 5, 7 e 10% de resíduo. Os compósitos foram ensaiados para a obtenção da resistência à compressão e do módulo de elasticidade dinâmico. Os resultados apontaram para um impacto negativo de forma mais relevante para o parâmetro de resistência à compressão, porém, para misturas com 3 e 5% de lodo os ensaios foram considerados satisfatórios.

Gonçalves (2000) estudou a utilização de resíduo do corte de granito (RCG) como adição para a produção de concretos. Foram incorporados teores de 10 e 20% em relação à massa do cimento e avaliadas propriedades do concreto endurecido como resistência à compressão axial e resistência à tração na flexão, além de parâmetros de durabilidade como absorção por imersão. A análise dos resultados permitiu constatar a viabilidade técnica de incorporação do resíduo, sendo 10% o teor que apresentou melhor desempenho frente as variáveis analisadas.

CAPÍTULO 3

Materiais e Métodos

Neste capítulo serão abordados os procedimentos utilizados ao longo da pesquisa, com vistas ao alcance dos objetivos propostos, incluindo os materiais utilizados e as normalizações consultadas. São descritos todo o planejamento dos estudos e etapas envolvidas.

O planejamento da pesquisa foi realizado com o intuito de avaliar o potencial de incorporação do resíduo, no caso, o lodo proveniente da estação de tratamento de efluentes de uma indústria de produtos de limpeza, como uma adição mineral em concretos de cimento Portland. Foram estudadas as implicações dessa incorporação nas propriedades físicas e mecânicas, bem como, comportamento microestrutural dos concretos produzidos, utilizando-se para tal diferentes teores de incorporação.

A metodologia da pesquisa foi dividida em duas etapas. A primeira fase se deu com a visita as empresas e coleta do resíduo, seguida de sua preparação e caracterização através de ensaios físicos e químicos com o objetivo de se avaliar o potencial de reaproveitamento desse material. Nessa avaliação foram utilizados parâmetros estudados em outras pesquisas e que poderiam indicar uma previsão de comportamento dos concretos com resíduo, frente aos ensaios desenvolvidos na segunda fase.

Na etapa seguinte, os demais materiais necessários para a produção dos concretos (cimento, agregado miúdo e graúdo), foram caracterizados. Além disso, foi procedida a etapa de dosagem e produção das misturas com confecção dos corpos de prova e realização dos ensaios de desempenho tanto no estado fresco quanto endurecido. Na Figura 8 é apresentado esquematicamente todo o procedimento experimental desse trabalho.

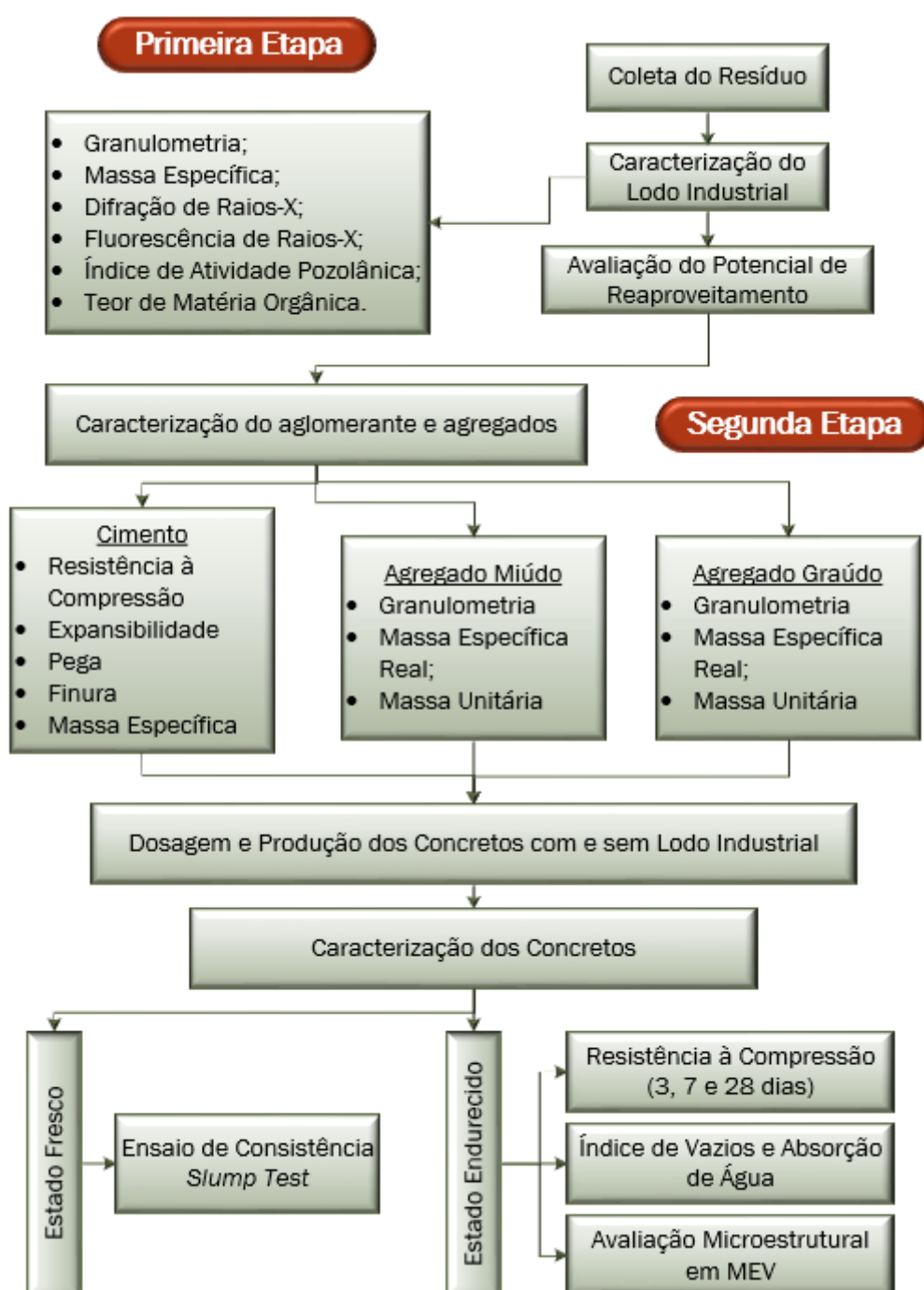


Figura 8. Fluxograma da metodologia experimental da pesquisa. Fonte: Autor (2015).

A caracterização do resíduo, em parte, foi realizada no Laboratório de Mecânica dos Solos do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN). Os ensaios químicos e mineralógicos foram conduzidos pelo Centro de Tecnologias do Gás e Energias Renováveis (CTGAS-ER).

A caracterização dos demais materiais, produção e confecção dos corpos de prova e ensaios de desempenho foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção da UFRN.

3.1 Coleta e caracterização do resíduo

O lodo utilizado neste trabalho é proveniente de uma estação de tratamento de efluentes de duas indústrias de produtos de limpeza localizadas no município de São José do Mipibu/RN (Figura 9-a).

O efluente resultante principalmente da lavagem dos equipamento de produção, como os tanques de mistura das matérias primas, é destinado por meio de instalações de esgotamento até a ETE do local (Figura 9-b), a partir daí sofre uma série de tratamentos físico-químicos até que seja obtido o particulado sólido, no caso o lodo que foi reaproveitado nesta pesquisa.



a)

b)

Figura 9. a) vista da entrada principal da fábrica. b) estação de tratamento. Fonte: <http://www.industriasbecker.com.br/galeria/fabrica>. Acesso em 09/01/2015.

O efluente, inicialmente, é direcionado para tanques de equalização que permitem a regularização das vazões para os cilindros floco-decantadores. Logo após são dosados, através de bombas dosadoras, os reagentes de coagulação (PAC e cal) nos pontos de grande turbulência no interior da tubulação. Na entrada do floco-

decantador é então adicionado o policloreto de alumina (PAC) que juntamente com um polieletrólito complementa o processo de tratamento.

Nos floco-decantadores ocorrem a formação dos flocos que se sedimentam fazendo acontecer a separação entre o material líquido e o sólido. O material sólido, com alto teor de umidade, segue por gravidade para os leitos de secagem. Esse material permanece por longos períodos (até três meses) nos leitos, onde ocorre a redução de sua umidade, parte por percolação (retornando a parte líquida para o tanque de equalização), parte por evaporação. Após sua secagem, o resíduo é transferido para uma caçamba localizada no pátio da área industrial a partir de onde é transportado para um aterro sanitário.

O resíduo utilizado foi coletado de uma caçamba com descartes de um período de cerca de dois meses (Figura 10), garantindo uma maior homogeneidade frente às sazonalidades de fabricação de diferentes produtos. O processo se deu em conformidade com a NBR 10007/2004 que trata da amostragem de resíduos sólidos, sendo coletado ao total, cerca de 50 Kg de material.



Figura 10. Caçamba para armazenamento do lodo industrial enviado para o aterro. Fonte: Autor (2015).

Após a coleta, o resíduo foi estocado em sacos plásticos identificados e encaminhado para o Laboratório de Mecânica dos Solos. Inicialmente, passou por um processo de secagem em estufa a 110°C por um período de 24 horas seguido de

destorroamento e então foram separadas as quantias necessárias para os ensaios de caracterização. Foram realizados ensaios de análise granulométrica por difração a laser, massa específica real, índices de consistência, índice de atividade pozolânica e teor de matéria orgânica, além de ensaio químico de fluorescência de Raios X e mineralógico de difração de Raios X.

3.1.1 Análise granulométrica

Devido à percepção visual de grande quantidade de finos e formação de espuma no processo de preparação do resíduo para ensaio de sedimentação, escolheu-se a utilização da análise granulométrica por difração a laser que foi realizada no granulômetro a laser CILAS modelo 1090D que pertence ao Laboratório de Cimentação de Poços da UFRN. Vale ressaltar que a amostra foi previamente seca em estufa a uma temperatura de 110°C durante 24h e destorroada.

Para complementar esse ensaio, uma vez que o granulômetro utilizado identifica partículas com no máximo 500 µm, foi realizada a granulometria por peneiramento seguindo-se os procedimentos descritos na NBR NM 248/2003 que determina a composição granulométrica de agregados.

Na técnica de granulometria por difração a laser as partículas da amostra são dispersas em um fluido em movimento. Estas partículas interferem no fluxo deste fluido, causando descontinuidades que são identificadas por meio de uma luz que incide no fluido, sendo posteriormente correlacionado com o tamanho das partículas. A luz incidida ao se chocar com as partículas sofre os fenômenos de difração, refração, reflexão e absorção, formando um invólucro de luz tridimensional (HILDEBRAND, 1999).

As características deste invólucro dependem do índice de refração relativo da partícula no meio dispersante, comprimento de onda da luz incidida e tamanho e forma da partícula. São registrados a intensidade e ângulo da luz espalhada e então, estes sinais, são convertidos, através de recursos matemáticos na distribuição de tamanho das partículas (ALLEN, 1997).

A curva granulométrica pôde ser utilizada para verificar os teores de resíduo que se enquadram como materiais finos ou agregados, otimizando o entendimento de sua interação com os demais componentes dos concretos.

3.1.2 Massa específica real

A massa específica real do lodo foi obtida a partir de procedimentos experimentais típicos de agregados. Foi utilizada a norma NBR NM 52/2009 que trata sobre a determinação desse parâmetro em agregados miúdos para concreto, sendo este ensaio realizado no Laboratório de Mecânica dos Solos da UFRN.

3.1.3 Índices de consistência

Neste ensaio foram determinados os limites de liquidez e plasticidade, através das normas NBR 6459/1984 e NBR 7180/1984, respectivamente, e que ao final são utilizados para o cálculo do índice de plasticidade. Todo o procedimento se deu no Laboratório de Mecânica dos Solos da UFRN.

O limite de plasticidade é considerado o teor de água, expresso em função da massa de pasta seca em estufa, acima do qual a massa argilosa, moldada em cilindros com cerca de 3 a 4 mm de diâmetro e 15 cm de comprimento, pode ser obtida.

Já o limite de liquidez é considerado o teor de água, no qual a massa argilosa ao receber 25 golpes consegue unir os dois lados separados por um contador de metal, e que é obtido com o aparelho de Casagrande.

3.1.4 Índice de atividade pozolânica

Para determinação desse parâmetro foi utilizado o método com cimento Portland, prescrito pela NBR 5752/2014 e o método com a cal, prescrito pela NBR 5751/2012. O ensaio com o cimento foi conduzido no Laboratório de Materiais de Construção da UFRN, com utilização do cimento CP II F-32, que não possui material

pozolânico, fato que poderia interferir nos resultados. Já no método da cal foi utilizada uma cal CH-I por possuir uma maior pureza, sendo atendidos os requisitos físicos e químicos presentes na NBR 5751/2012.

Esse índice é de grande importância para verificar, segundo a NBR 12653/2014, que estabelece os requisitos para materiais pozolânicos, a reatividade do resíduo e sua classificação como material com essa característica em adição aos concretos.

3.1.5 Teor de matéria orgânica

O ensaio de teor de matéria orgânica para o resíduo em questão foi realizado no laboratório de análises de solo, água e planta da Empresa de Pesquisa Agropecuária do Rio Grande do Norte (EMPARN).

Essa informação é de grande valia tendo em vista que elevadas quantidade de matéria orgânica no concreto podem interferir nas reações de hidratação dos compostos, alterando os valores de resistência final do material endurecido (NEVILLE, 1997).

3.1.6 Análise química

A análise da composição química dos materiais utilizados foi conduzida por meio de fluorescência de Raios X, uma análise química que segundo Klein e Dutrow (2012) é fundamentada na medida da intensidade dos Raios X característicos gerados pelos elementos que compõem a amostra quando excitados.

As amostras foram transportadas para o Laboratório de Ensaios de Materiais do Centro de Tecnologias do Gás e Energias Renováveis (CTGÁS-ER) onde utilizou-se o equipamento EDX-720 da marca Shimadzu. Inicialmente a amostra foi peneirada em malha de 45 µm e então realizado o ensaio. Os resultados são expressos em termos de concentrações de óxidos mais estáveis dos elementos químicos presentes.

Vale ressaltar que o material foi também, moído e quarteado e que por limitação do método, somente os elementos entre Sódio (11) e Urânio (92) foram analisados. Para a avaliação da perda ao fogo, o material após seco em estufa por 24 h em temperatura de 110°C, foi aquecido até 1000°C por 60 minutos.

A análise por FRX é de fundamental importância para a classificação do material como pozolânico, visto que a NBR 12653/2014 estabelece valores mínimos e máximos de certos compostos químicos, bem como teores máximos para a perda ao fogo.

3.1.7 Análise mineralógica

A análise mineralógicas das amostras foi realizada por meio de ensaio de difração de Raios X que segundo Callister (2008) se dá através da incidência de um feixe de Raios X sobre o material sólido e medição dos ângulos de difração através de um difratômetro, além da intensidade dos picos difratados.

Inicialmente, a amostra passou por um peneiramento até granulometria inferior a 45 µm, em seguida foi submetida ao ensaio realizado em um equipamento Shimadzu XRD-6000 com radiação CuKα, varredura de 2°/min e 2θ de 10° a 60° localizado no CTGÁS-ER.

Este ensaio, segundo Geyer (2001), auxilia na avaliação do potencial pozolânico do material, visto que materiais cristalinos apresentam baixa atividade, enquanto materiais amorfos uma maior atividade pozolânica.

3.2 Cimento

O cimento utilizado nesta pesquisa foi o Portland de alta resistência inicial e resistente a sulfatos (CP V ARI RS), da marca Mizu. A escolha desse aglomerante se deu em virtude de os concretos produzidos com incorporação do resíduo serem destinados para utilização na própria empresa geradora, principalmente, com a

fabricação de artigos pré-moldados onde torna-se necessário o aumento da produtividade associado a resistências elevadas nas primeiras horas de aplicação.

Sua aquisição se deu em uma indústria desse setor que também comercializa esse tipo de cimento em sacos de 40 Kg. Ao todo, foram adquiridos 120 Kg de cimento que foram estocados segundo as recomendações da ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland), ou seja, suspensos do chão, em estrados secos, afastados das paredes e envoltos por lonas plásticas, além de utilizados dentro do prazo de validade de três meses.

Foram realizados ensaios de caracterização física e mecânica para o cimento Portland segundo as normas da ABNT. Os ensaios utilizados para comprovar a viabilidade do cimento foram:

- Determinação do índice de finura;
- Determinação do tempo de início de pega;
- Determinação da expansibilidade a frio;
- Determinação da resistência à compressão axial;
- Determinação da massa específica real.

3.2.1 Índice de finura

O ensaio de finura do cimento é normatizado pela NBR 11579/2012 que determina o índice de finura desse material através do material retido na peneira de 75 μm (nº 200) em porcentagem de massa.

Essa variável está relacionada com o tamanho dos grãos do produto e segundo a NBR 5733/1991 que trata das condições exigíveis para o recebimento do cimento Portland de alta resistência inicial, o seu valor não deve exceder 6%.

3.2.2 Tempo de início de pega

O ensaio para a determinação do tempo de início de pega do cimento é realizado seguindo-se os procedimentos descritos na NBR NM 65/2003. Segundo esta

norma o tempo de início de pega equivale ao tempo transcorrido desde adição da água ao cimento até o instante em que a agulha de Vicat correspondente penetra na pasta a uma distância de 4 ± 1 mm da placa da base (Figura 11-a e Figura 11-b).

A quantidade de água utilizada para a confecção da pasta deve ser previamente estabelecida através da NBR NM 43/2003, para uma pasta de consistência normal (Figura 11-c). O resultado do ensaio é expresso em horas e minutos, com uma aproximação de cinco minutos.

Com esse resultado é possível prever o tempo máximo que pode transcorrer desde a fabricação do concreto e transporte até seu lançamento em sua posição definitiva. A norma 5733/1991 fixa esse valor em no mínimo 1 hora.

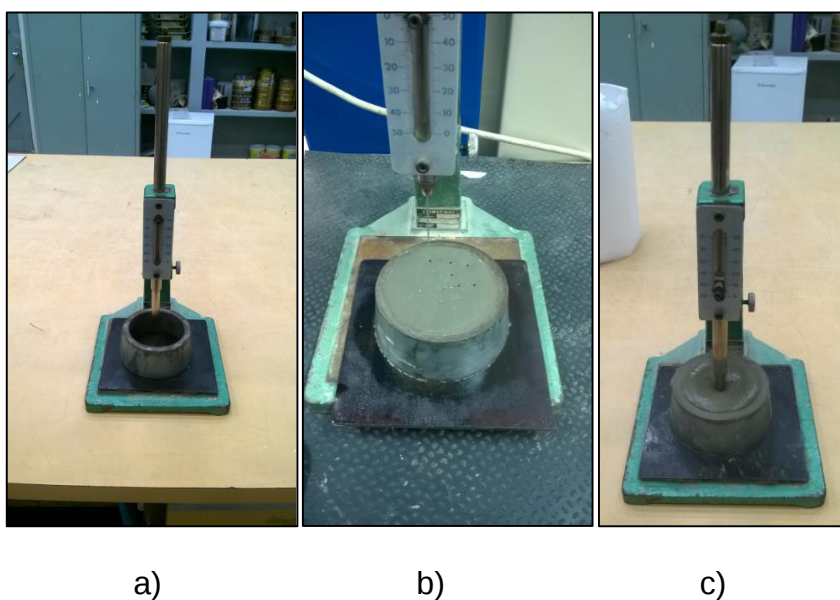


Figura 11. a) Agulha de Vicat. b) Ensaio de início de pega. c) Ensaio da pasta de consistência normal. Fonte: Autor (2015).

3.2.3 Expansibilidade a frio do cimento

Para o ensaio de expansibilidade a frio tomou-se por referência a norma NBR 11582/2012. Nessa metodologia são utilizadas três agulhas Le Chatelier preenchidas com uma pasta de cimento com consistência normal, obtida através dos procedimentos descritos na NBR NM 43/2003. Na Figura 12 está ilustrado a realização do ensaio.



Figura 12. Ensaio de expansibilidade a frio do cimento. Fonte: Autor (2015).

Depois de moldados, os corpos de prova, ainda nas respectivas agulhas, são colocados em cura submersa com água à temperatura de $23 \pm 2^\circ\text{C}$. O resultado do ensaio é expresso em milímetros compreendendo a diferença entre os valores medidos de afastamento das extremidades das agulhas após a moldagem e após sete dias de cura. A norma 5733/1991 limita a expansibilidade a um valor máximo de cinco milímetros.

3.2.4 Resistência à compressão

O ensaio de resistência à compressão é baseado na norma NBR 7215/1997 e tem como princípio a confecção de corpos de prova de argamassa com dimensões de 50 mm de diâmetro por 100 mm de altura para rompimento à compressão em prensa hidráulica (Figura 13). Assim como nos outros ensaios de caracterização, tem por objetivo a confirmação do valor fornecido pelo fabricante.

Os rompimentos são efetuados na idades de 1, 3 e 7 dias, para o caso de cimento CP-V ARI RS, sendo moldados quatro corpos de prova para cada idade. Ao final é calculada a média de resistência dos quatro corpos de prova, sendo seu valor o quociente entre a carga aplicada e a área da superfície de contato da carga no corpo de prova.

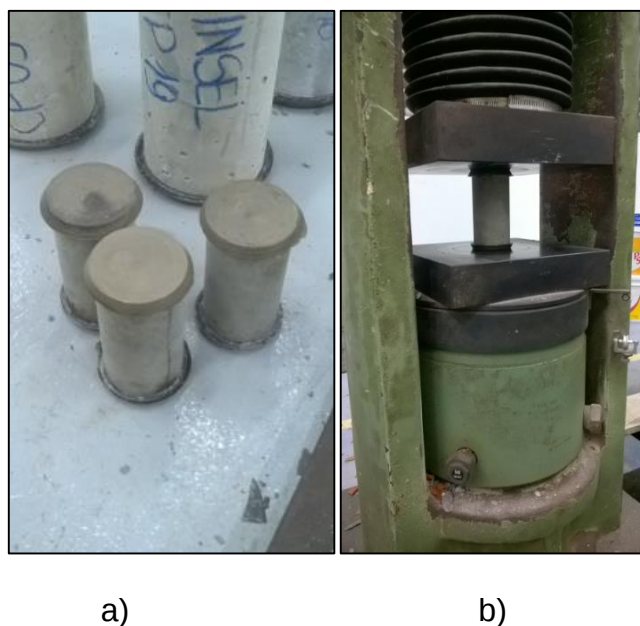


Figura 13. a) Corpos de prova de cimento. b) Ensaio de compressão nos cp's de cimento. Fonte: Autor (2015).

3.2.5 Massa específica real

O ensaio para determinação da massa específica real é normatizado pela NBR NM 23/2001 onde utiliza-se o frasco de Le Chatelier. São colocados 60g de cimento no frasco preenchido com querosene e a densidade é determinada pelo quociente entre a massa do material e a diferença de leitura de volume no frasco, antes e depois de sua inserção.

3.3 Agregado miúdo

O agregado miúdo utilizado para a confecção dos concretos foi uma areia quartzosa de origem natural, adquirida em loja de materiais de construção da cidade de Natal/RN, proveniente de jazidas localizadas na região metropolitana e bastante utilizada nas obras locais.

Foram coletados cerca de 700 Kg de areia, acondicionados em área próxima ao laboratório e posteriormente em tambores com tampa e guardados em locais

protegidos de intempéries. O material foi previamente seco em estufa a 110°C por um período de 24 horas e então submetido aos ensaios de caracterização.

Foi realizada uma análise granulométrica em conformidade com as prescrições da NBR NM 248/2003 com o intuito de se classificar o agregado de acordo com o tamanho de suas partículas. Além disso, procedeu-se com os ensaios de determinação da massa específica real e massa unitária de acordo, respectivamente, com as normas NBR NM 52/2009 e NBR NM 45/2006.

3.4 Agregado graúdo

O agregado graúdo utilizado nesta pesquisa foi uma brita granítica adquirida em loja de materiais de construção do município de Natal/RN e proveniente, segundo informações repassadas pelo fornecedor, de jazidas localizadas na cidade de Macaíba/RN.

Foram coletados cerca de 500 Kg de agregado, estocados em tambores plásticos com tampa, sendo estes guardados em locais protegidos de intempéries. Este material passou por processo de caracterização quanto a análise granulométrica, segundo a NBR NM 248/2003, além de massa específica real e massa unitária segundo as normas NBR NM 53/2009 e NBR NM 45/2006, respectivamente.

3.5 Água

Para a confecção dos concretos desta pesquisa foi utilizada água potável convencional, proveniente da concessionária local e coletada nas instalações do Laboratório de Materiais de Construção da UFRN.

3.6 Escolha do traço e produção dos concretos com e sem resíduo

3.6.1 Escolha do traço

Para a realização dessa pesquisa, que se baseou na confecção e estudo de concretos de cimento Portland com adição de lodo industrial, foi fixado um traço base com proporções em massa de 1:2:3 (cimento, areia e brita), para uma relação água cimento de 0,65. A escolha desse traço ocorreu em virtude de pesquisas anteriores como as de Souza (2007), Lima (2013) e Sampaio (2013) terem constatado se tratar de uma mistura com boas características de resistência mecânica, economia e de fácil preparo.

Para a determinação do fator água cimento foi realizado um teste preliminar onde fabricou-se um concreto, manualmente, com o referido traço e com o maior teor de resíduo utilizado na pesquisa, ou seja, 20%. O intuito desse teste foi de se encontrar a menor quantidade de água necessária para a moldagem dos cp's na condição mais desfavorável, de menor trabalhabilidade, tendo em vista que o resíduo aumenta a quantidade de material seco e também absorve água, aumentando essa demanda. Para o fator a/c de 0,65 foi possível realizar essa moldagem, mesmo a massa apresentando, visualmente, uma trabalhabilidade muito baixa.

Com isso, tendo em mente a confecção dos concretos em betoneira, onde tem-se uma maior energia de mistura e maior homogeneidade, a tendência seria o aumento da trabalhabilidade, facilitando os processos de moldagem e proporcionando um maior abatimento da massa.

A referida dosagem também facilitou o incremento do resíduo no concreto na medida que não se utilizaram aditivos plastificantes para se atingir uma boa trabalhabilidade da massa.

Os teores de resíduo incorporado, visando a avaliação das implicações técnicas e ambientais desse processo no concreto, se deram em valores de 5%, 10%, 15% e 20% em relação a massa de cimento utilizado nas misturas, além do traço de referência com 0% de resíduo. Os corpos de prova de concreto produzidos foram

identificados conforme o padrão apresentado na Figura 14. A Tabela 9 mostra os traços em massa utilizados na pesquisa.

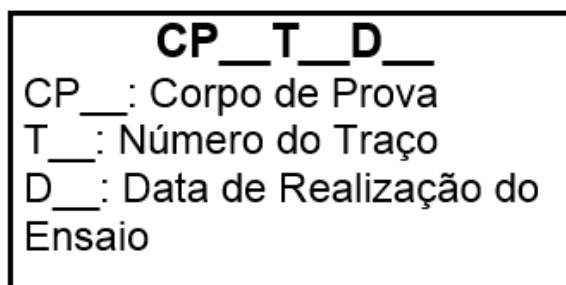


Figura 14. Padrão para identificação dos corpos de prova. Fonte: Autor (2015).

Tabela 9. Formulações dos concretos para estudo com traço unitário em massa.

Concreto	Cimento	Areia	Brita	Água	Lodo Ind.
CP-00%	1,00	2,00	3,00	0,65	0,00
CP-05%	1,00	2,00	3,00	0,65	0,05
CP-10%	1,00	2,00	3,00	0,65	0,10
CP-15%	1,00	2,00	3,00	0,65	0,15
CP-20%	1,00	2,00	3,00	0,65	0,20

Fonte: Autor (2015).

3.6.2 Cálculo dos quantitativos de materiais

Por meio de uma consulta as normas vigentes que regulamentam a realização dos ensaios de caracterização dos materiais e os de desempenho nos concretos, seja no estado fresco ou endurecido, foram verificadas as quantidades mínimas de corpos de prova necessários. Na Tabela 10 são apresentados os ensaios realizados, juntamente com a quantidade de cp's mínima e a norma utilizada.

Para cada adição de lodo industrial foram produzidos ao todo 14 corpos de prova cilíndricos com dimensões de 10cm de diâmetro por 20cm de altura, uma vez que, a dimensão máxima do agregado graúdo utilizado não foi superior a 19mm.

Com a definição do traço, realizado na seção anterior, foram calculadas as quantidades de cada material a ser utilizado. A partir do traço unitário utilizou-se um fator multiplicador e então dividindo-se pela massa específica real de cada material calculou-se o volume total de concreto produzido por traço, conforme ilustrado na Tabela 11.

Tabela 10. Quantitativo de corpos de prova utilizados para a pesquisa.

Aplicação	CP's	Norma
Resistência à compressão com 3 dias	3	
Resistência à compressão aos 7 dias	3	NBR 5738/2015
Resistência à compressão aos 28 dias	3	
Índice de vazios e absorção	3	NBR 9778/2009
Análise microscópica	1	-
Reserva	1	-
Total	14	-

Fonte: Autor (2015).

É possível visualizar que a estimativa de concreto a ser produzido através da dosagem empregada é suficiente para confecção dos 14 corpos de prova utilizados em cada traço. Vale ressaltar que o volume do resíduo da estação de tratamento não foi considerado para o enchimento dos corpos de prova.

Logo, considerando-se as concentrações de resíduos a serem empregados na pesquisa (0%, 5%, 10%, 15% e 20%), serão produzidos ao todo cinco traços de concreto. As quantidades totais requeridas dos materiais estão indicadas na Tabela

12, sendo adicionados ainda 20% de cada componentes, em virtude de imprevistos e ensaios de caracterização.

Tabela 11. Volume total de concreto produzido por cada 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	18	27	5,85
Massa específica real	3,00	2,601	2,633	1,00
Volume dos materiais	3	6,93	10,26	5,85
Volume produzido por traço	26,04 litros			
Volume necessário para 14 CP's	22,00 litros			

Fonte: Autor (2015).

Tabela 12. Quantidade de material utilizado na produção dos concretos.

Concreto	Quantidade de materiais em Kg				
	Cimento	Areia	Brita	Água	Lodo
CP-00%	9,00	18,00	27,00	5,85	0,00
CP-05%	9,00	18,00	27,00	5,85	0,45
CP-10%	9,00	18,00	27,00	5,85	0,90
CP-15%	9,00	18,00	27,00	5,85	1,35
CP-20%	9,00	18,00	27,00	5,85	1,80
Total	45,00	90,00	135,00	29,25	4,50
Total + 20%	54,00	108,00	162,00	35,1	5,40

Fonte: Autor (2015).

3.6.3 Produção dos corpos de prova de concreto

Para a produção dos concretos, inicialmente, os materiais constituintes, brita, areia, cimento e água foram pesados individualmente, em balança digital da marca FILIZOLA, modelo CS 15, com capacidade de carga de 15.000 g e resolução de 5 g e então armazenados em baldes plásticos para posterior produção dos concretos. Já o resíduo foi pesado em uma balança de maior precisão, tendo em vista a utilização de pequenas quantidades, da marca OHAUS com capacidade de carga de 8.100 g e resolução de 0,1 g.

A mistura dos materiais foi realizada em uma betoneira de eixo inclinado da marca Menegotti com capacidade nominal de 120 litros. Vale ressaltar que o interior dessa betoneira foi lubrificada com água, antes de se iniciar a fabricação dos concretos, no intuito de se evitar que parte da água de amassamento fosse absorvida pelas paredes internas do equipamento.

Os procedimentos de introdução dos materiais na betoneira e moldagem dos corpos de prova seguiram a seguinte ordem:

- a) Com a betoneira ligada, inicialmente, colocou-se metade da água de amassamento.
- b) Em seguida, introduziu-se todo o agregado graúdo.
- c) Posteriormente, adicionou-se o cimento. Para os traços em que se adicionou o lodo industrial, este foi misturado previamente ao cimento em um recipiente de plástico e com o auxílio de uma colher de pedreiro.
- d) Colocou-se todo o agregado miúdo.
- e) Acrescentou-se o restante da água de amassamento.
- f) Com a inserção de todos os materiais, a betoneira foi mantida ligada, em movimento giratório, por um período de 5 minutos, promovendo assim a homogeneização da mistura.
- g) O concreto, em seu estado fresco, foi descarregado em carrinho de mão, estanque e previamente umedecido.
- h) Realizou-se o ensaio de abatimento do tronco de cone, seguindo as prescrições da NBR NM 67/1998.

- i) Com os moldes cilíndricos devidamente montados e lubrificados, realizou-se a moldagem dos corpos de prova segundo as especificações da NBR 5738/2015, sendo utilizado o soquete manual para o processo de adensamento.
- j) Após a moldagem, os moldes com concreto foram deixados em repouso, durante 24 horas, em ambiente protegido do sol e ventilado.
- k) Após o período de 24 horas, procedeu-se com o desmolde dos corpos de provas que foram submetidos ao processo de cura por submersão até a data de realização dos ensaios para o concreto no estado endurecido.

3.7 Ensaios de caracterização dos concretos

Após a produção dos concretos, foram realizados ensaios de caracterização no estado fresco e no estado endurecido. Para o estado fresco procedeu-se com o ensaio de Abatimento do Tronco de Cone (*Slump Test*). Com a confecção dos corpos de prova se deram os ensaios no estado endurecido, resistência à compressão, absorção de água e índice de vazios e análise microestrutural através de MEV.

3.7.1 Ensaio de abatimento do tronco de cone

Determinou-se a trabalhabilidade dos concretos produzidos por meio dos procedimentos abordados na NBR NM 67/1998, que trata do ensaio de abatimento de tronco de cone.

Esse ensaio é uma medida da fluidez ou mobilidade do concreto fresco, sendo este afetado por fatores como relação água/aglomerante, dimensão máxima dos agregados, uniformidade da granulometria, dentre outros. A realização desse procedimento se justifica na medida que a inserção do resíduo na composição do concreto pode diminuir esse índice em função da retenção de água por parte desse resíduo.

3.7.2 Ensaio de resistência à compressão

O ensaio de resistência à compressão foi realizado de acordo com a NBR 5739/2007 em corpos de prova cilíndricos nas idades de 3, 7 e 28 dias. Os corpos de prova foram retirados da cura por submersão e passaram por processo de regularização da superfície em máquina retífica para se evitar eventuais cargas pontuais durante a ruptura.

O equipamento utilizado para a ruptura dos cp's foi uma Máquina Universal de Ensaio Mecânicos da marca AMSLER, suíça nº 699/474, com capacidade de carga de 100 t, do laboratório de Materiais de Construção da UFRN.

3.7.3 Índice de vazios e absorção de água

Para os ensaios de determinação do índice de vazios e absorção de água foram moldados três corpos de prova para cada traço, ensaiados aos 28 dias e seguindo os procedimentos descritos na NBR 9778/2009.

3.7.4 Análise microestrutural

A análise microestrutural nas amostras de concreto foi realizado por meio de microscópio eletrônico de varredura da marca Shimadzu SSX – 550 SUPERSCAN com EDS acoplado do Laboratório de Materiais do CTGÁS-ER em amostras reduzidas aos 28 dias para os concretos de referência e com 20% de resíduo incorporado. Essa escolha se deu por estas amostras serem representativas frente às diversas variáveis estudadas.

Para obtenção das amostras reduzidas para o ensaio, inicialmente, os corpos de prova de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura de cada tipo de concreto foram serrados em disco diamantado diametralmente, a fim de se remover de seu centro uma fatia cilíndrica de 2 cm de altura. Desta fatia, realizaram-se cortes transversais,

obtendo-se barras prismáticas de dimensões aproximadas de 2 cm x 2 cm x 8 cm que foram identificadas de acordo com o teor de incorporação.

A fim de se evitar a quebra do material na zona de transição entre a matriz e o agregado graúdo as amostras passaram por um processo de criogenia em nitrogênio líquido. Esse processo uniformiza as tensões de fratura do material em todas as direções, permitindo a redução, através de impacto por talhadeira, para amostras de 2 cm x 2 cm x 2 cm que corresponde ao máximo tamanho suportado pelo microscópio.

A superfície a ser visualizada é a face interna das amostras reduzidas que não sofreram nenhum tipo de atrito da máquina de corte, o que poderia alterar características intrínsecas do concreto.

Antes da visualização no MEV as amostras passaram por processo de secagem em estufa a 100°C, e metalização com o intuito de se otimizar o contraste de visualização. Para a realização do ensaio foram utilizados os seguintes critérios de visualização:

- Para início da visualização, foi utilizado um aumento de 50 vezes, com o intuito de promover uma visão geral da amostra.
- Em seguida, foram identificadas as fases agregado e pasta de cimento, além do resíduo na estrutura do concreto, utilizando-se amplitudes variando de 150 a 700 vezes.
- Com amplitudes de 1.000 a 2.000 vezes foram focalizados pontos no interior da zona de transição e da matriz da pasta de cimento.
- Por fim, foram identificadas fases mineralógicas características das amostras utilizando-se de amplitudes de 4.000 a 10.000 vezes.

CAPÍTULO 4

Resultados e discussões

Neste capítulo serão apresentados, primeiramente, os resultados dos ensaios de caracterização do lodo industrial, analisando sua potencialidade de incorporação como adição mineral nos concretos de cimento Portland. Em seguida, será apresentada a caracterização dos demais constituintes (cimento, agregado miúdo e agregado graúdo) e, por fim, os resultados dos ensaios de desempenho nos concretos nos estados fresco e endurecido.

Ao longo do texto, buscou-se estabelecer correlações entre as diversas variáveis estudadas, verificando as alterações nos traços produzidos com a adição do resíduo em relação ao traço de referência. Com isso, tornou-se possível determinar a porcentagem máxima de incorporação, dentre aquelas estudadas na pesquisa, que permita a utilização dos concretos para fabricação de peças pré-moldadas e outras finalidades na própria empresa geradora do resíduo, levando-se em consideração as propriedades abordadas.

4.1 Caracterização do resíduo

4.1.1 Análise granulométrica

O resultado do ensaio de granulometria do lodo industrial, por peneiramento, está indicado na Tabela 13. A partir desse ensaio é possível determinar o módulo de finura e a dimensão máxima característica do material.

O módulo de finura encontrado para o resíduo foi de 1,40, confirmando o que a análise visual já sugeria, uma granulometria bastante fina, contribuindo para uma alta capacidade de absorção de água. A dimensão máxima característica encontrada foi de 2,4 mm. A curva granulométrica do resíduo está indicada na Figura 15.

Tabela 13. Granulometria do resíduo industrial.

Peneira (mm)	Material retido (g)	Porcentagem		
		<i>Retida</i>	<i>Passante</i>	<i>Acumulada</i>
9,5	0	0	100,0	0
6,3	0	0	100,0	0
4,8	0	0	100,0	0
2,4	29,86	4,3	95,7	4,3
1,2	78,76	11,3	84,5	15,5
0,6	93,46	13,4	71,1	28,9
0,3	86,06	12,3	58,8	41,2
0,15	73,76	10,5	48,3	51,7
Fundo	338,10	48,3	0,0	100,0
Total	700,00	100,0	-	-

Fonte: Autor (2015).

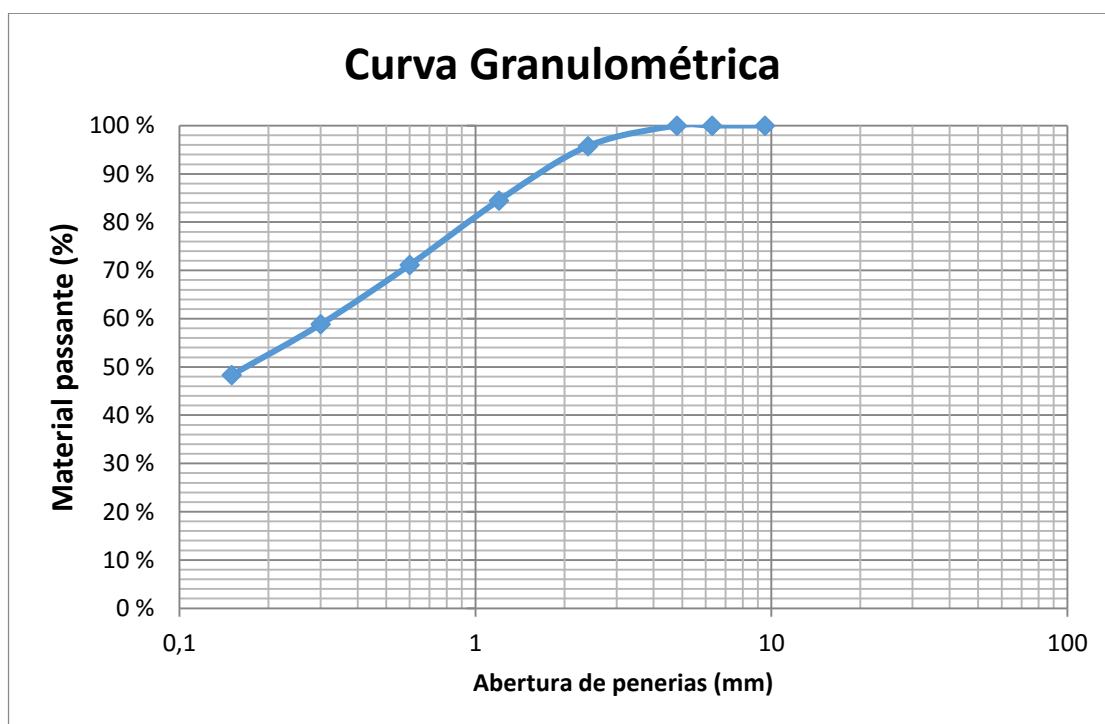


Figura 15. Curva granulométrica do lodo industrial. Fonte: Autor (2015).

Com o ensaio de granulometria a laser tornou-se possível avaliar o tamanho das partículas para a fração da amostra menor que 500 μm . O resultado desse ensaio está indicado na Figura 16.

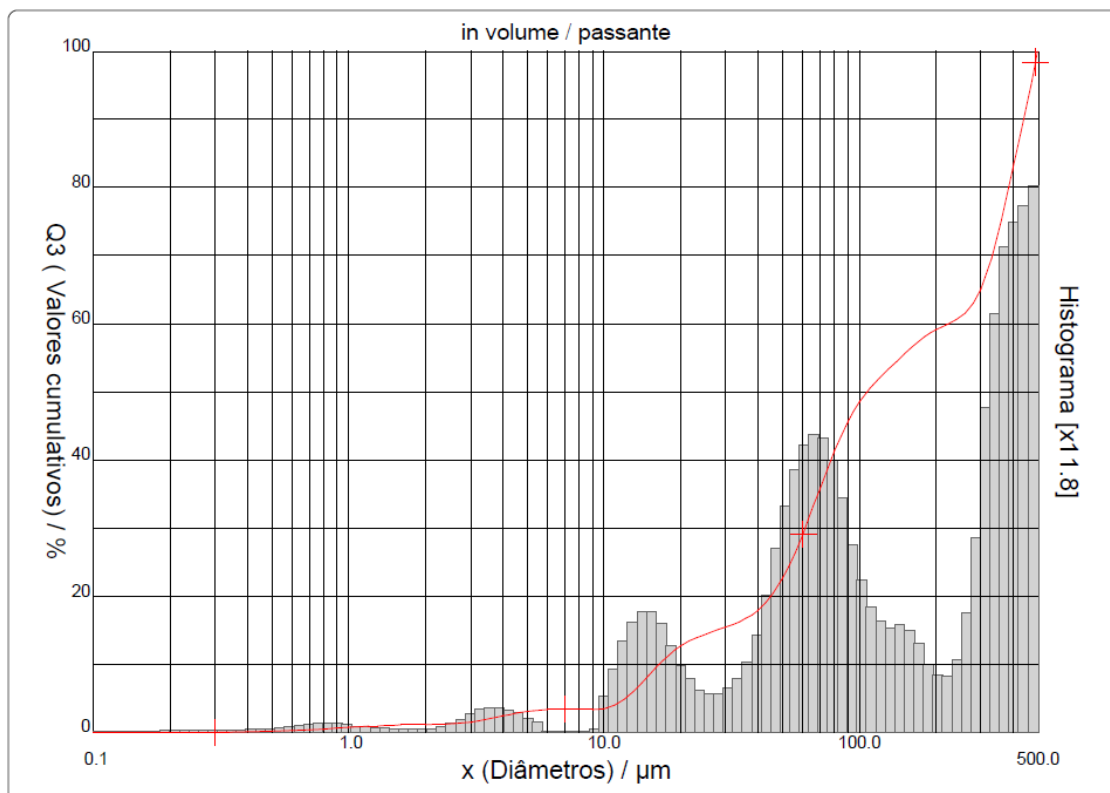


Figura 16. Granulometria a laser do lodo industrial. Fonte: Autor (2015).

As partículas de adições situadas em uma faixa granulométrica inferior a 50 μm contribuem para um melhoramento da matriz cimentícia, através do preenchimento dos vazios que existem entre os produtos de hidratação do cimento, ou devido a não hidratação de parte do material. Já as partículas de diâmetros médios entre 50 μm e 150 μm agem complementando descontinuidades na curva granulométrica do agregado miúdo (GONÇALVES, 2000).

Logo, através do resultado dos ensaios de peneiramento e granulometria a laser, é possível notar que cerca de metade da amostra está situada na faixa abaixo dos 150 μm , possibilitando uma contribuição com o efeito filler e complementação na granulometria do agregado para os concretos produzidos com adição do resíduo.

4.1.2 Índices de consistência

Quanto a plasticidade, o resíduo apresentou um limite de liquidez igual a 59, já o limite de plasticidade não pôde ser determinado, resultando em um material classificado como não plástico. Esse resultado é semelhante ao encontrado para agregados como a areia natural.

4.1.3 Massa específica

Neste ensaio, o resíduo apresentou massa específica igual a 2,04 g/cm³, inferior aos valores encontrados para os demais componentes do concreto.

4.1.4 Análise química

As porcentagens de cada componente identificados no ensaio de Fluorescência de Raios X estão apresentados na Tabela 14. É possível visualizar que o resíduo é composto principalmente pelos óxidos de cálcio, alumínio e magnésio, que representam juntos cerca de 47% da amostra. Ainda constaram óxidos de silício e enxofre, com teores somados na faixa de 10%. Além disso, outros óxidos como Fe₂O₃, K₂O e ZnO estiveram presentes com teores inferiores a 1%.

A significativa quantidade de óxido de cálcio encontrada é, provavelmente, decorrente da grande quantidade de cal adicionada no tratamento do efluente, visando melhorar o processo de decantação dos sólidos. Este componente pode servir aumentando as reservas de hidróxido de cálcio, necessárias para a ocorrência da reação pozolânica que culmina com a formação de C-S-H, um agente cimentante que pode aumentar a resistência do material. Porém, como visto, isso ocorre quando a cal entra em solução e é inteiramente combinada com elementos como a sílica. A existência de cal livre ou cristalina, devido a sua lenta reação de hidratação, pode causar deterioração nos concretos endurecidos.

Analisando a atividade pozolânica do resíduo através de parâmetros químicos, e levando em consideração os requisitos especificados na NBR 12653/2014, é possível inferir uma baixa reatividade quando incorporado ao concreto. Somando-se os teores de SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 o resíduo não se enquadra em nenhuma das classes para materiais pozolânicos especificados na norma (N, C ou E). Além disso, a perda ao fogo que pode ser de no máximo 10%, ultrapassou os 42%, como mostrado na Tabela 14.

É importante ressaltar que a significativa quantidade de MgO pode desencadear reações expansivas que causam deterioração ou imperfeições com fissurações do concreto no estado endurecido. Além disso, embora em pequenas quantidades, a sílica e a alumina, caso reativas, podem dar origem a reações de caráter pozolânico. (MEHTA e MONTEIRO, 2008). O MgO é derivado, provavelmente, de compostos utilizados nos produtos de limpeza para regular a alcalinidade e viscosidade desses materiais, influenciando na sua capacidade de formação de espuma.

Outro ponto é que a presença de alumínio e enxofre na forma de aluminatos e sulfatos pode alterar a formação de alguns compostos hidratados do cimento como a etringita e o monossulfato.

Tabela 14. Análise química do lodo industrial.

Amostra	CaO	Al_2O_3	MgO	SiO_2	SO_3	P_2O_5	Fe_2O_3	K_2O	Outros	P.F.
Resíduo	16,59	15,14	15,07	5,31	4,70	0,43	0,14	0,09	0,1	42,43

Fonte: Autor (2015).

4.1.5 Análise mineralógica

O resultado do ensaio de difratometria de Raios X aplicado ao resíduo está mostrado na Figura 17.

A amostra de lodo industrial apresentou como fases cristalinas a calcita, quartzo, dolomita, millosevichita, chloroapatita e hydroxylellestadita. A calcita e dolomita presentes no resíduo já eram esperadas devido a adição de grande quantidade de cal no tratamento do efluente. Além disso, é importante ressaltar que os compostos identificados corroboram com os elementos mostrados na análise química. Os minerais de composição mais complexa como a chloroapatita e hydroxylellestadita, são minerais de origem sintéticas, provavelmente, derivados de substâncias utilizadas na fabricação dos produtos de limpeza, assim como, dos aditivos incorporados no tratamento do efluente.

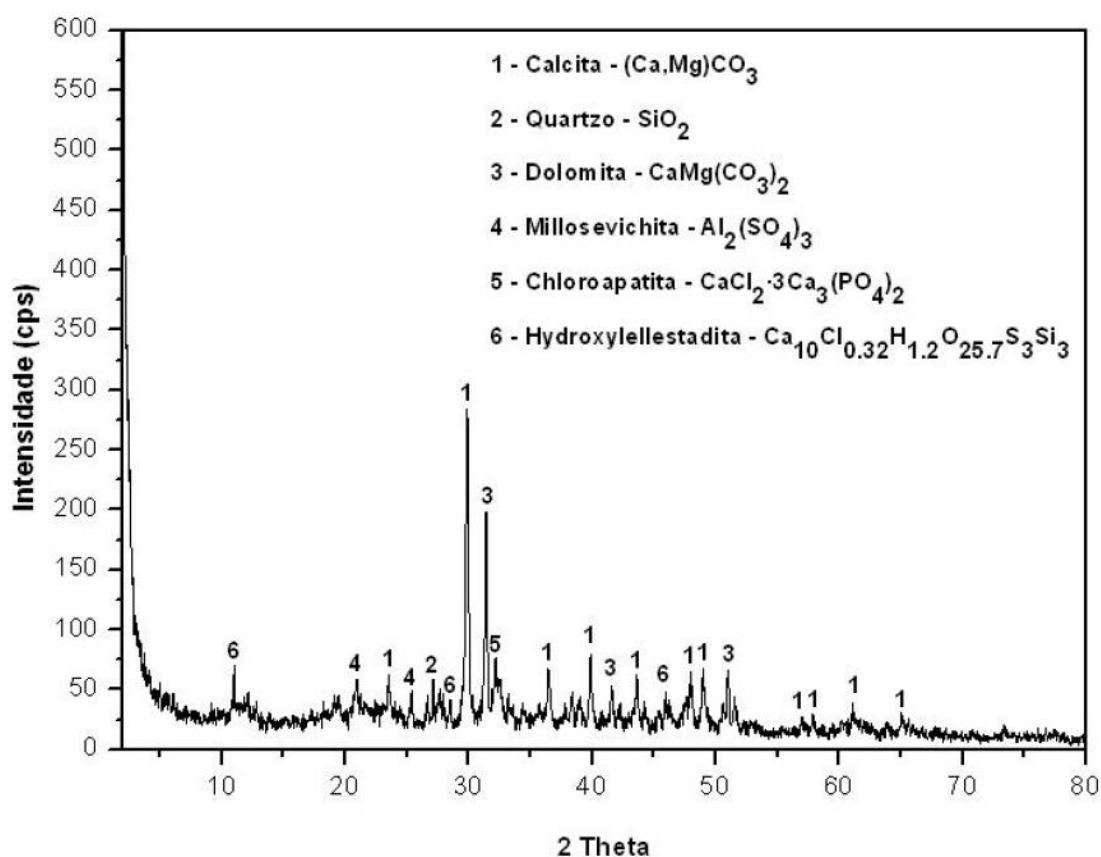


Figura 17. Difratoograma do lodo industrial. Fonte: Autor (2015).

A atividade pozolânica do material também é função do seu grau de cristalinidade. Materiais amorfos possuem maior potencial pozolânico, como é o caso da cinza volante que possui de 50 a 90% de sua composição amorfa (GEYER, 2001). Sendo assim, analisando o DRX é possível inferir que o resíduo possui uma baixa reatividade, uma vez que, diversos picos cristalinos são constatados no gráfico.

4.1.6 Índice de atividade pozolânica

Com o intuito de se avaliar a reatividade do resíduo em questão, foram realizados ensaios de pozolanicidade com cal e com cimento. No ensaio com cal, realizado aos 7 dias de cura dos corpos de prova, estes obtiveram uma resistência média à compressão de 0,5 MPa, valor este bem inferior ao mínimo necessário para que o resíduo fosse enquadrado em alguma das classes de material pozolânico, que é de 6 MPa.

Já no ensaio realizado com cimento, onde os corpos de prova são submetidos a uma processo de cura durante 28 dias, foi obtido um índice de desempenho de cerca de 71%, que representa a fração, em porcentagem, entre a resistência média dos cp's fabricados com resíduo e aqueles fabricados sem o resíduo. Este valor também é inferior ao mínimo necessário para enquadramento como material pozolânico, que é de 90% para qualquer uma das três classes especificadas em norma.

A reduzida atividade pozolânica do resíduo pode ser atribuído principalmente ao baixo teor de sílica contida nesse material, além de sua elevada perda ao fogo, constatados no ensaio de fluorescência de Raios X.

4.1.7 Teor de matéria orgânica

O teor de matéria orgânica encontrado foi de 17,41% o que seria considerado um pouco elevado se comparado com o nível máximo permitido de impurezas orgânicas em agregados miúdos, segundo a NBR 7211/2009, que é de 10%, por exemplo. Porém, é importante frisar que o resíduo é adicionado em pequenas quantidades em relação a massa dos agregados utilizados e, além disso, deve-se levar em consideração que nem toda matéria orgânica é nociva ao concreto.

Estudos realizados, segundo Neville (2015), apontaram que concretos produzidos com areais contaminadas por matéria orgânica apresentaram uma queda de resistência nas primeiras idades, quando comparados a concretos saudáveis, porém aos 28 dias essa propriedade se igualou, confirmando uma tendência de interferência apenas nos primeiros estágios de hidratação dos compostos.

4.2 Cimento

4.2.1 Ensaio de início de pega

A partir deste ensaio foi possível constatar que o tempo de início de pega do cimento utilizado na pesquisa se deu com duas horas, tempo este, superior ao mínimo, uma hora, exigido pela NBR 5733/1991, que trata das condições exigíveis para o recebimento de cimentos CP V ARI. Os resultados desse ensaio, bem como outros parâmetros como o fator água cimento da pasta de consistência normal estão mostrados na Tabela 15.

Tabela 15. Início de pega do cimento Portland.

Consistência da pasta		Tempo de pega	
Água	162,5 g	Início do Ensaio	14:00h
Cimento	500 g	Término	16:00h
Relação A/C	0,325	Início de Pega	2:00h

Fonte: Autor (2015).

4.2.2 Ensaio de expansibilidade

O resultado do ensaio de expansibilidade a frio do cimento CP V ARI, utilizado nesta pesquisa, realizado de acordo com a NBR 11582/2012 está mostrado na Tabela 16, sendo a média de três determinações. De acordo com a NBR 5733/1991, a expansibilidade a frio máxima é de cinco milímetros, estando o cimento utilizado dentro deste limite.

Tabela 16. Expansibilidade a frio do cimento Portland.

	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3
Antes (mm)	0	0	0
Depois (mm)	0	0	0
Expansibilidade (mm)	0	0	0
Média	0		

Fonte: Autor (2015).

4.2.3 Ensaio de Finura do cimento

O resultado do ensaio de finura do cimento CP V ARI da marca Mizu, normatizado pela NBR 11579/2013, está mostrado na Tabela 17.

Tabela 17. Finura do cimento Portland.

Finura	
	Amostra
Inicial	50 g
Retido	0,54 g
Finura	1,08%

Fonte: Autor (2015).

4.2.4 Ensaio de resistência à compressão do cimento

Os valores de resistência à compressão encontrados para o cimento CP V ARI, utilizado na pesquisa, através dos procedimentos prescritos na NBR 7215/1997, estão mostrados na Tabela 18.

Tabela 18. Resistência do cimento CP V ARI aos 1, 3 e 7 dias.

Corpos de Prova	Resistência (Mpa)		
	1 dia	3 dias	7 dias
CP 01	20,83	23,88	39,15
CP 02	16,00	31,92	34,62
CP 03	17,57	26,55	28,67
CP 04	18,02	31,52	34,37
Média	18,10	28,47	34,20

Fonte: Autor (2015).

Os resultados encontrados estão em conformidade com as especificações de recebimento deste cimento, no que tange sua resistência, prescritas pela NBR 5733/1991, que são de 14, 24 e 34 Mpa para as idades de 1, 3 e 7 dias, respectivamente. Na Tabela 18 pode ser visualizado um gráfico que demonstra a evolução da resistência à compressão dos corpos de prova de cimento ao longo das idades estudadas.

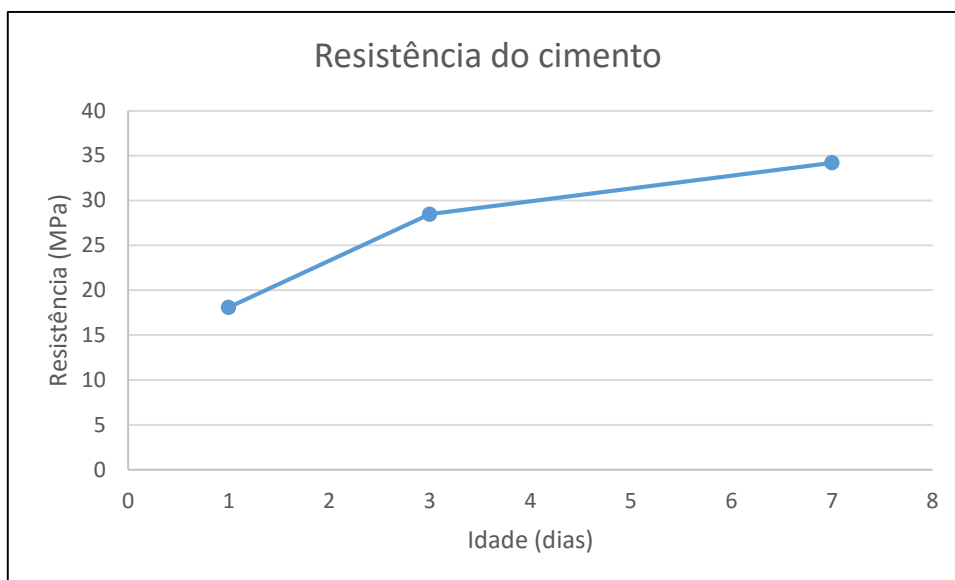


Figura 18. Resistência à compressão do cimento CP V ARI. Fonte: Autor (2015).

4.2.5 Ensaio de massa específica real

A partir dos resultados obtidos na Tabela 19, pôde-se verificar uma massa específica, como uma média de duas determinações, para o cimento CP V ARI de 3,00 g/cm³.

Tabela 19. Massa específica do cimento CP V ARI.

	Amostra 1	Amostra 2
Volume inicial (ml)	0,00	0,00
Volume final (ml)	20,20	20,20
Massa do cimento (g)	60,00	60,00
Massa específica (g/cm³)	3,00	3,00
Média (g/cm³)	3,00	

Fonte: Autor (2015).

4.3 Agregado miúdo

4.3.1 Análise granulométrica

Na Tabela 20 é expresso o resultado do ensaio de granulometria da areia utilizada na produção dos concretos, realizado de acordo com a NBR NM 248/2003. Também foram determinados o módulo de finura e dimensão máxima característica do agregado.

Tabela 20. Composição granulométrica da areia.

Diâmetro da peneira (mm)	Material Retido (g)	Porcentagem (%)	
		Retida	Acumulada
6,3	0	0	0,0
4,8	9,7	1,0	1,0
2,4	65,4	6,5	7,5
1,2	187,8	18,8	26,3
0,6	350,3	35,0	61,3
0,3	307,9	30,8	92,1
0,15	67,1	6,7	98,8
<0,15	11,8	1,2	100,0
Total	1.000,00	100	

Fonte: Autor (2015).

A partir deste ensaio, verificou-se que o agregado miúdo utilizado possui um módulo de finura igual a 2,87 e um diâmetro máximo característico igual a 4,8mm. A disposição granulométrica do agregado está demonstrada através da curva granulométrica, exposta na Figura 19.

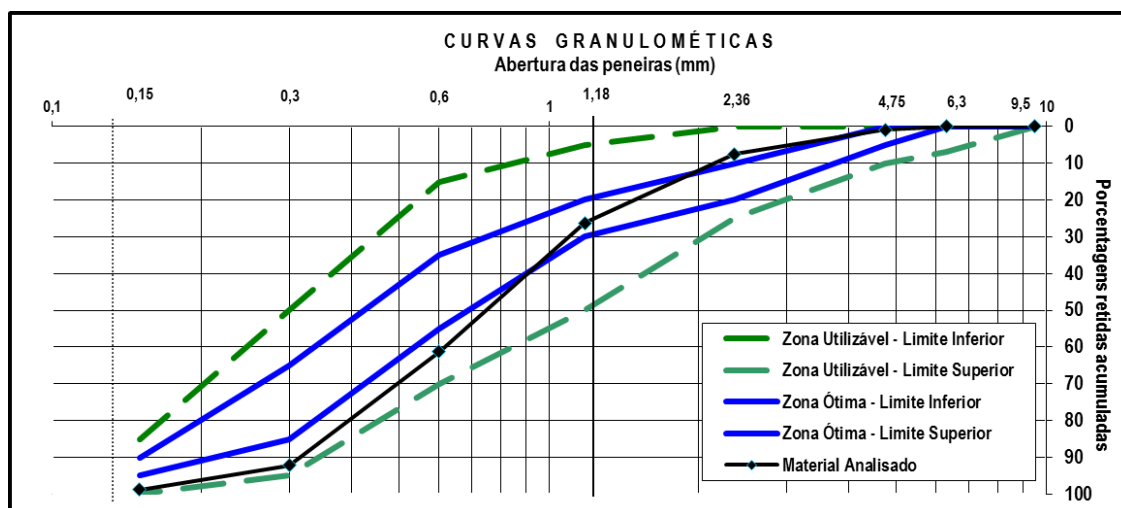


Figura 19. Curva granulométrica do agregado miúdo. Fonte: Autor (2015).

É possível visualizar que o agregado possui sua granulometria inserida na zona utilizável para concretos, como prescrito pela NBR 7211/2005. Esta característica também ocorre para o módulo de finura que de acordo com a referida norma pode variar de 2,20 a 2,90.

4.3.2 Massa específica e massa unitária

Os resultados do ensaio de massa específica e massa unitária do agregado miúdo estão indicados na Tabela 21. Os valores encontrados estão dentro da faixa comumente encontrada para areais utilizadas na produção de concretos, consistindo em um critério satisfatório para a utilização deste agregado.

Tabela 21. Massa específica e unitária da areia.

Amostra	Massa específica real (Kg/dm ³)	Amostra	Massa unitária (Kg/dm ³)
1	2,597	1	1,475
2	2,604	2	1,468
Média	2,600	Média	1,471

Fonte: Autor (2015).

4.4 Agregado graúdo

4.4.1 Análise granulométrica

Na Tabela 22 pode ser visualizado o resultado do ensaio de granulometria da brita utilizada na pesquisa, onde verifica-se que este material possui um diâmetro máximo característico de 19,0 mm, e módulo de finura igual a 6,84. Na Figura 20 é apresentada a curva granulométrica obtida para este material, nesta é possível constatar que o agregado encontra-se praticamente todo inserido na zona granulométrica 9,5/25 para agregados graúdos da norma NBR 7211/2009.

Tabela 22. Composição granulométrica da brita.

Diâmetro da peneira (mm)	Material Retido (g)	Porcentagem (%)	
		Retida	Acumulada
31,5	0	0	0,0
25	0	0	0
19	12,7	0,3	0,3
12,5	2.707,3	54,2	54,4
9,5	1.546,9	31,0	85,4
6,3	519,3	10,4	95,8
4,75	107,0	2,2	97,9
<4,75	102,6	2,1	100,0
Total	5.000,00	100	

Fonte: Autor (2015).

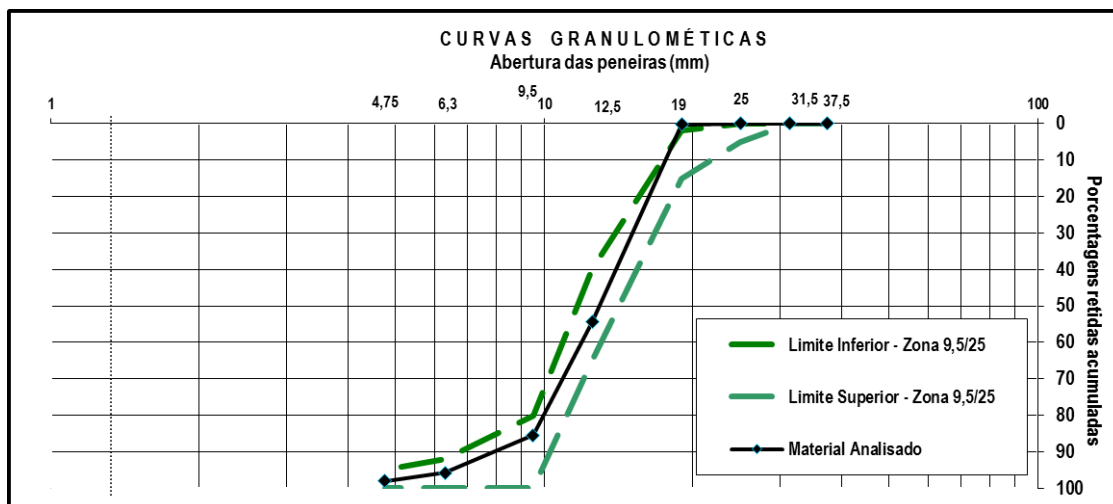


Figura 20. Curva granulométrica do agregado graúdo. Fonte: Autor (2015).

4.4.2 Massa específica e massa unitária

A média das duas determinações para a massa específica e massa unitária da brita utilizada na pesquisa estão mostradas na Tabela 23.

Tabela 23. Massa específica e unitária da brita.

Amostra	Massa específica real (Kg/dm ³)	Amostra	Massa unitária (Kg/dm ³)
1	2,633	1	1,475
2	2,640	2	1,465
Média	2,636	Média	1,470

Fonte: Autor (2015).

4.5 Caracterização dos concretos com e sem resíduo

4.5.1 Ensaio de consistência

Na Figura 21 está apresentado o gráfico do comportamento plástico dos concretos produzidos com e sem resíduo. Analisando-o é possível observar que todos os concretos apresentaram abatimento superior ao do concreto padrão, sendo o teor de 5% o de maior valor para esse parâmetro, resultando em um aumento de 33%.

Este fato se deve, provavelmente, à natureza do resíduo, proveniente do tratamento de um efluente resultante da lavagem de tanques utilizados na fabricação de produtos de limpeza. Esses produtos são constituídos principalmente de substâncias surfactantes, com características químicas semelhantes aos aditivos incorporadores de ar utilizados para aumentar a trabalhabilidade de concretos e argamassas com reduzidas relações água/cimento. Com isso, em baixas quantidades, assim como ocorre com essa classe de aditivos, o resíduo é capaz de adsorver bolhas de ar à massa e reduzir a tensão superficial da água, diminuindo o atrito entre as partículas e aumentando a plasticidade da mistura.

Porém, como evidenciado durante o processo de secagem do resíduo, este possui uma alta taxa de absorção de água. Logo, com o aumento do teor de incorporação no concreto, esta característica passou a superar a tendência de aumento da trabalhabilidade, reduzindo esta propriedade, fato constatado com a redução do incremento de abatimento da massa para os teores acima de 5%.

Além disso, um aumento da porcentagem de resíduo contribui para uma redução na relação água/materiais secos, uma vez que o lodo é acrescentado aos materiais constituintes ao invés de ser utilizado em substituição parcial a algum destes.

É importante ressaltar, ainda, que essa redução no abatimento dos concretos produzidos com teores de 10, 15 e 20%, em relação a mistura com 5% de resíduo, não se dá ao ponto de atingir a marca para o concreto de referência. Este, com um abatimento de 16,5 cm apresentou uma trabalhabilidade inferior ao concreto de maior teor de incorporação, 20%, que apresentou um valor de 17 cm para tal propriedade.

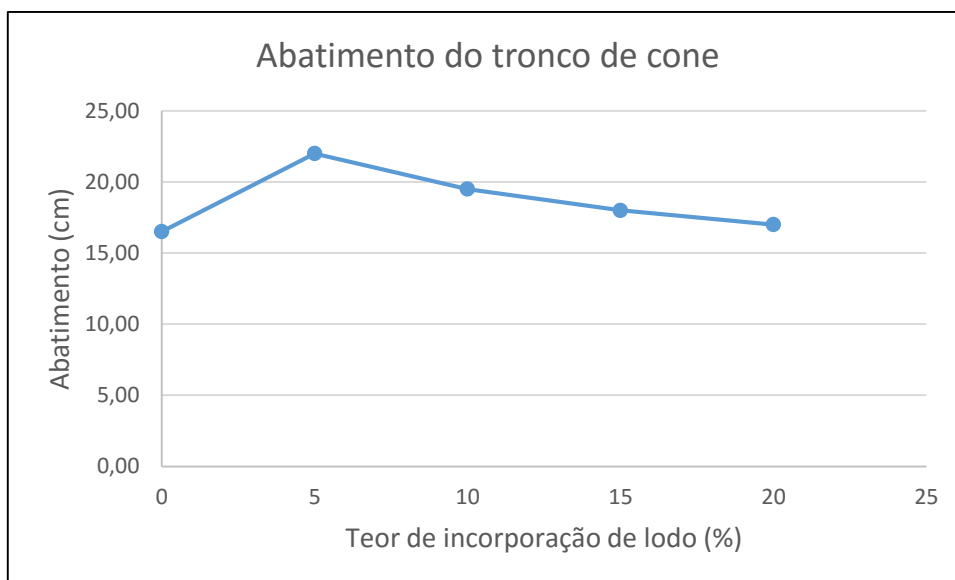


Figura 21. Consistência dos concretos em função do teor de resíduo. Fonte: Autor (2015).

4.5.2 Ensaio de resistência à compressão

Neste item são apresentados resultados dos ensaios de resistência à compressão para os corpos de prova com e sem resíduo, realizados aos 3, 7 e 28 dias, sendo expressos graficamente através da Figura 22, Figura 23 e Figura 24.

A análise desses gráficos demonstra que o concreto de referência apresentou uma resistência aos 28 dias de 22,8 MPa, superior ao esperado para este traço, que é de cerca de 20 Mpa. Além disso, para todas as idades os concretos com resíduo apresentaram valores de resistência inferiores ao concreto padrão, o que indica que a adição do lodo atuou de forma negativa para este parâmetro.

Esse fato pode ter sido causado pelo aumento da porosidade nos concretos, em decorrência da atuação do resíduo como uma substância surfactante, como discutido no item anterior. Isso pode interferir tanto na resistência mecânica como na durabilidade desse material, reduzindo sua resistência a agentes agressivos, responsáveis por fenômenos como a corrosão e carbonatação.

Aos três dias, o concreto com 5% de resíduo apresentou uma redução de cerca de 38% em sua resistência quando comparado ao concreto sem resíduo. Essa tendência de queda também ocorre para os traços com 10% de resíduo, sendo

modificada a partir do teor de 15% quando o parâmetro começa a aumentar e atinge seu valor máximo dentre os traços com resíduo.

Esse comportamento se dá de forma semelhante para os corpos de prova analisados aos sete dias. Já aos 28 dias, o concreto com 20% de incorporação apresenta uma leve redução em sua resistência, comparado ao traço com 15%. Em relação ao traço padrão a redução é de cerca de 39%.

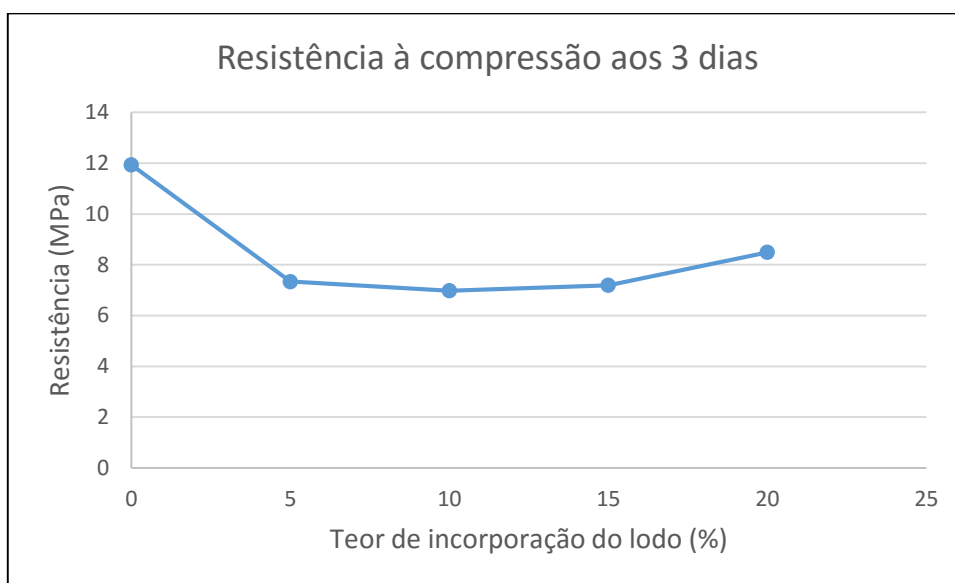


Figura 22. Resistência à compressão dos concretos aos 3 dias. Fonte: Autor (2015).

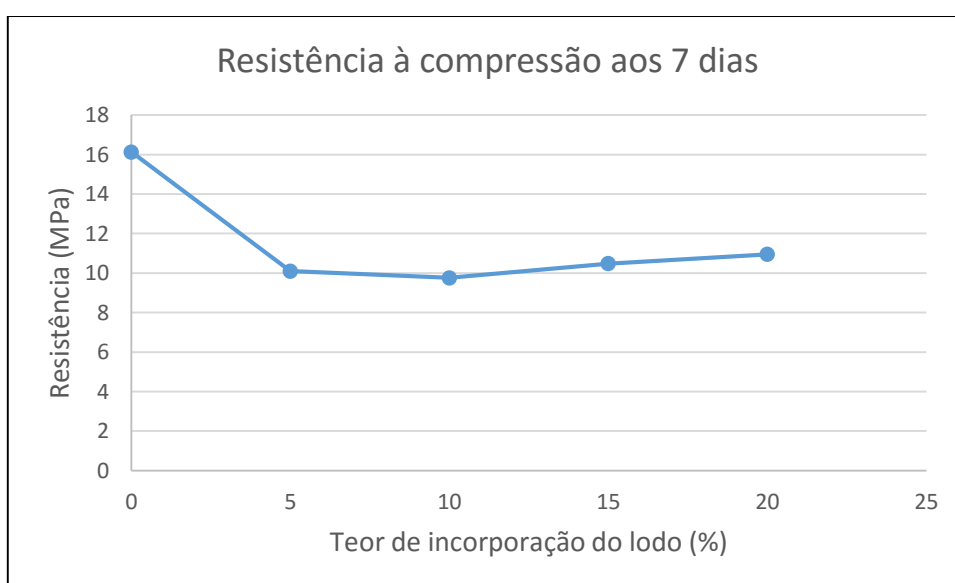


Figura 23. Resistência à compressão dos concretos aos 7 dias. Fonte: Autor (2015).

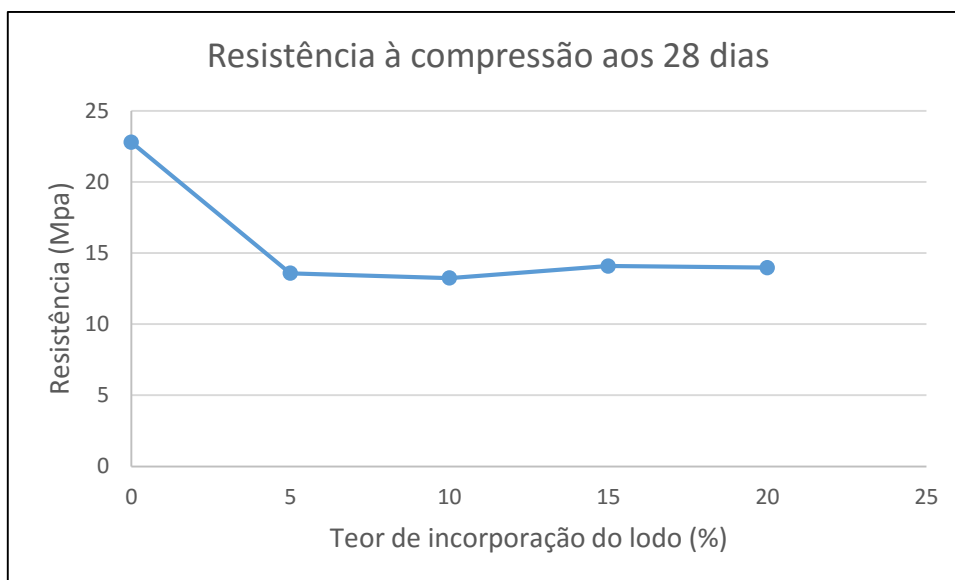


Figura 24. Resistência à compressão dos concretos aos 28 dias. Fonte: Autor (2015).

Na Figura 25 está expresso um gráfico com a evolução da resistência dos traços estudados ao longo das idades de controle. A partir dele é possível constatar que o concreto de referência apresentou um incremento de resistência à compressão dos 3 aos 7 dias de cerca de 35% e dos 7 aos 28 dias de, aproximadamente, 41%. Já os traços com resíduo apresentaram evoluções bem semelhantes entre si. O traço com 20% de lodo, por exemplo, obteve um aumento de resistência dos 3 aos 7 dias de cerca de 29%, e dos 7 aos 28 dias em torno de 28%.

Isso pode demonstrar uma ausência ou valor muito baixo de atividade pozolânica do resíduo nos concretos, além disso, os elementos presentes no lodo, como o alumínio e enxofre, podem ter influenciado na formação dos compostos hidratados do concreto, reduzindo a resistência e seu incremento ao longo das idades para todos os traços em que foi utilizado.

Com esses valores de resistência à compressão pode-se utilizar os concretos estudados na pesquisa visando sua aplicação para a fabricação de peças pré moldadas de caráter não estrutural, como placas ou blocos de concreto para alvenarias de vedação, meio fios, intertravados, sarjetas, dentre outros, conforme presente na NBR 15116/2004. Neste caso, vale apenas analisar as características de dimensões máximas para os agregados empregados, levando-se em consideração as dimensões das peças a serem fabricadas e os métodos de adensamento.

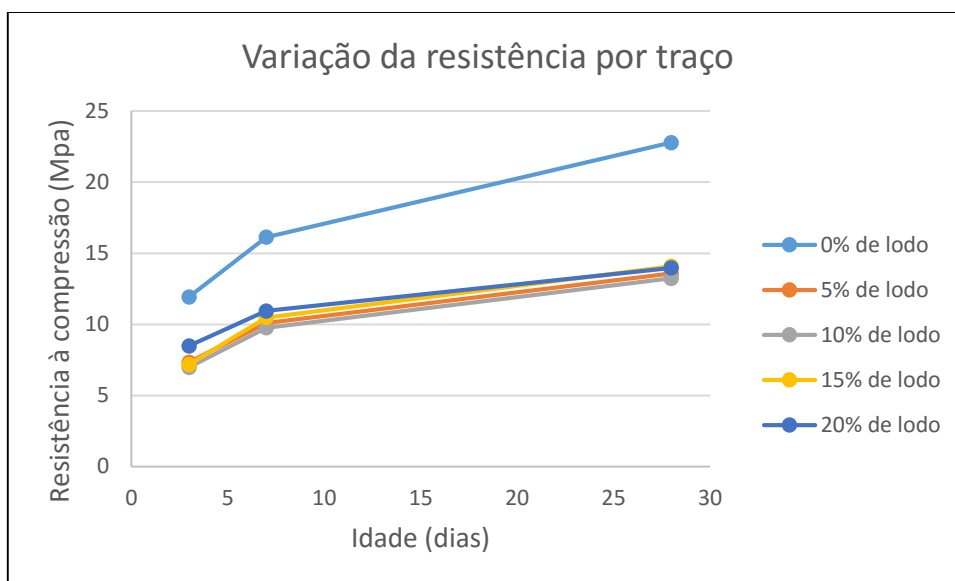


Figura 25. Variação da resistência à compressão dos concretos em função da idade.
Fonte: Autor (2015).

4.5.3 Absorção de água e índice de vazios

Os valores de absorção de água e índice de vazios para os traços estudados são apresentados na Figura 26 e Figura 27, respectivamente. Com a análise dos gráficos é possível constatar que todos os traços confeccionados com resíduo apresentaram valores desses dois parâmetros superiores ao concreto de referência, com exceção do traço de 20% que apresentou um índice de vazios inferior.

O concreto com 5% de resíduo foi o que obteve o maior valor para os dois quesitos, com um aumento de cerca de 31% para a absorção e 18% para o índice de vazios quando comparado com o traço padrão. Este comportamento pode ser explicado por se tratar da mistura que obteve maior plasticidade, em função da ação do resíduo, o que indica uma maior taxa de incorporação de ar na massa e consequente aumento da porosidade.

A tendência decrescente para os demais concretos pode ser atribuído a um possível refinamento dos poros em consequência do efeito fíler das partículas do resíduo e preenchimento de descontinuidades na granulometria do agregado miúdo,

bem como, a uma menor taxa de água livre na mistura, resultante de absorção por parte do resíduo.

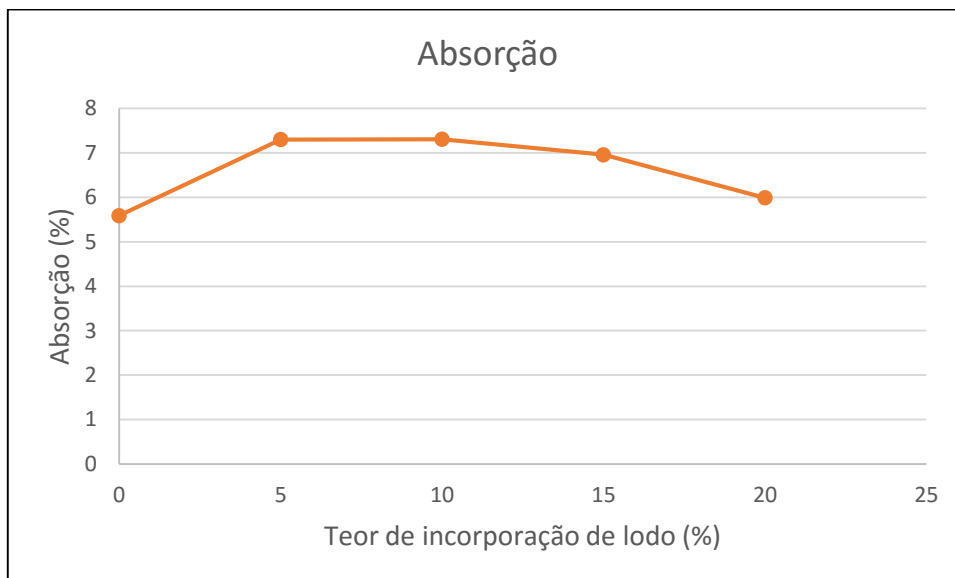


Figura 26. Variação da absorção de água aos 28 dias em função do teor de resíduo.
Fonte: Autor (2015).

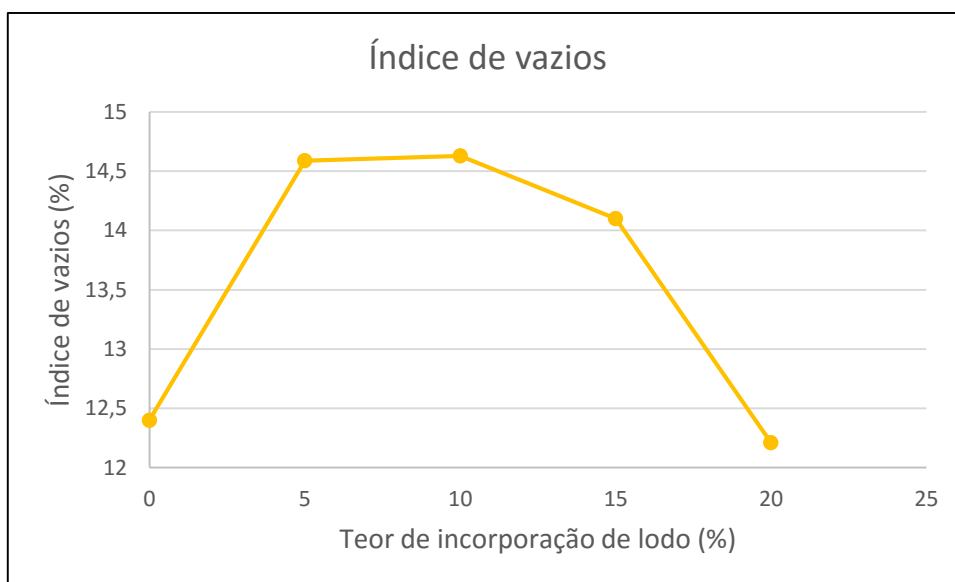
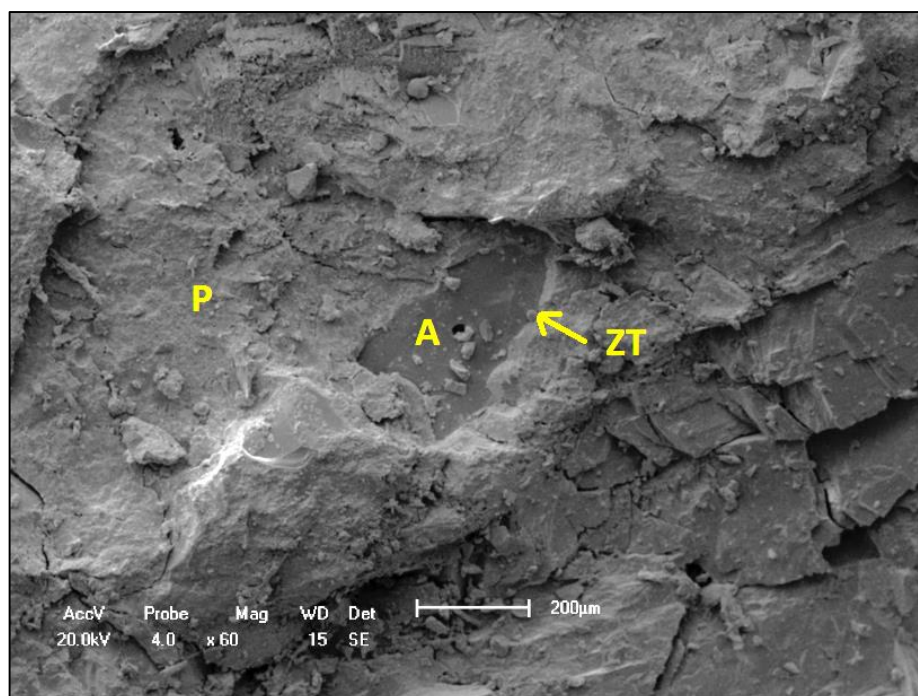


Figura 27. Variação do índice de vazios aos 28 dias em função do teor de resíduo.
Fonte: Autor (2015).

4.5.4 Análise microestrutural

Na Figura 28 e Figura 29 estão ilustradas, respectivamente, uma visão geral da microestrutura dos concretos padrão e com 20% de resíduo incorporado, utilizando leves aumentos, e onde pôde-se distinguir as fases pasta de cimento e agregado. Analisando-as pode-se observar que a porosidade para esses dois teores são semelhantes, o que corrobora os dados de absorção de água e índice de vazios já comentados na seção anterior.



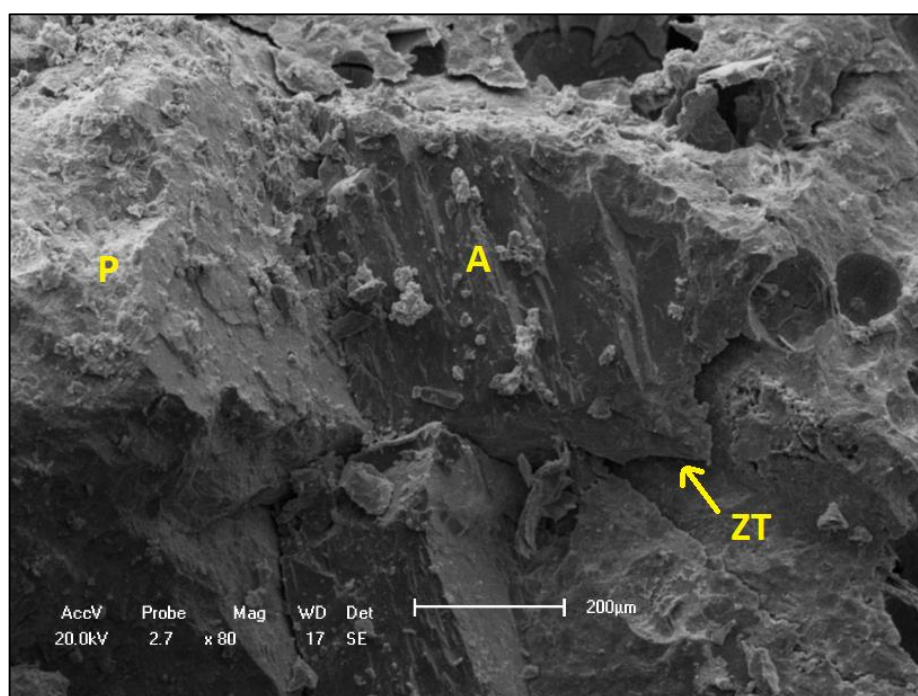
A – Agregado P – Pasta ZT – Zonta de transição

Figura 28. Visão geral da microestrutura para a amostra de concreto padrão. Fonte: Autor (2015).

Já se tratando da microestrutura da zona de transição para esses dois concretos, ilustradas na Figura 30 e Figura 31, é possível constatar que a amostra com resíduo apresenta uma zona mais porosa com maiores quantidades de etringita e estas, por sua vez, de maior tamanho, além de menores teores de silicato de cálcio hidratado (C-S-H). Este fato tem uma relação direta com os baixos valores de resistência à compressão encontrados para o concreto com resíduo incorporado.

O elevado índice de formação de etringita na zona de transição para o concreto com resíduo pode estar ligada à maiores quantidades de íons residuais de aluminato e sulfato, advindos de solubilização de elementos do lodo, e que são fundamentais na reação de formação deste composto hidratado (MEHTA e MONTEIRO, 2008). Comportamento semelhante foi encontrado por Hoppen *et al.* (2005), provavelmente devido a presença de íons residuais de sulfato advindos de coagulante utilizado no tratamento de água.

Para concretos fabricados com cimento CP V ARI RS, ou seja, de alta resistência inicial e resistente a sulfatos, os teores de C_3A , são limitados a 5% o que impede uma renovação de hidratação desse composto nas primeiras idades e garante a formação de etringita como produto estável e final dessas reações. Com isso, dado o possível aumento nas reservas de aluminato e sulfato esse composto é produzido em maior quantidade e não se converte em monossulfato como ocorre com a utilização de cimentos convencionais.

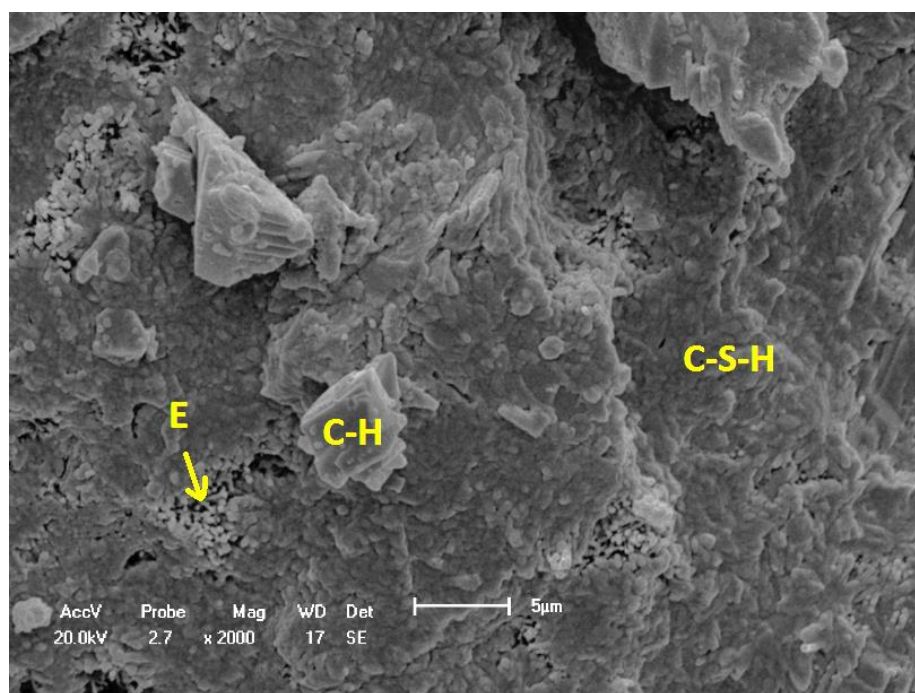


A – Agregado P – Pasta ZT – Zonta de transição

Figura 29. Visão geral da microestrutura para a amostra de concreto com resíduo. Fonte: Autor (2015).

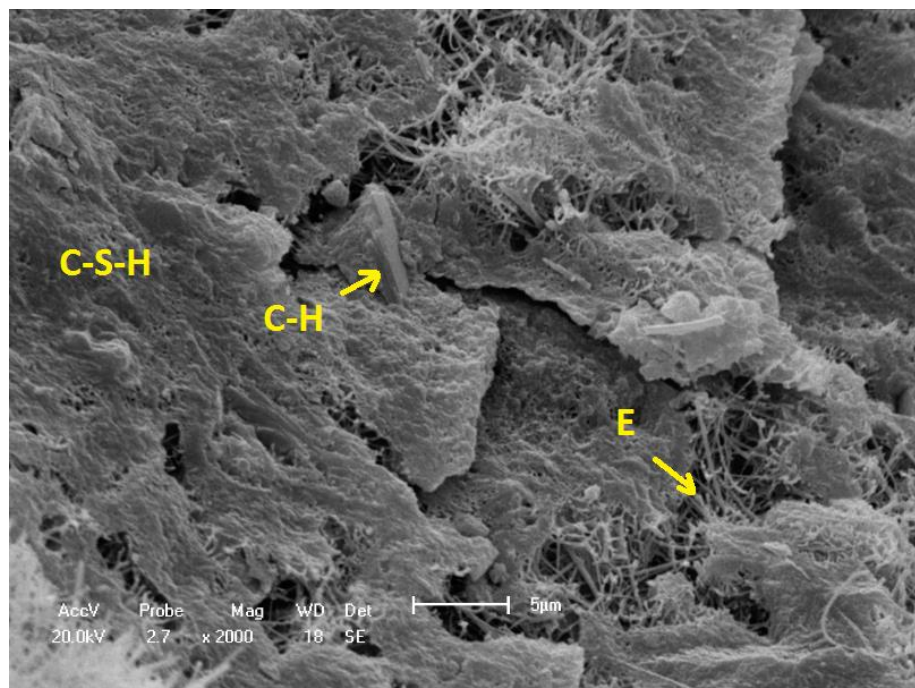
Na Figura 32 pode ser visto, introduzida na microestrutura da zona de transição da amostra com resíduo, um aglomerado de partículas rugosas e irregulares com forma esponjosa e tamanhos variados que acredita-se constituir o lodo industrial incorporado.

A presença desse material na zona de transição pode significar outro motivo para a queda de resistência nas amostras com lodo, isso porque, provavelmente, suas forças de coesão são fracas e não oferecem ganho de resistência a essa região. Com isso, ocupam o espaço de partículas de características cimentantes como o C-S-H, principal responsável pela propriedade de resistência na zona de transição.



C-S-H – Silicato de Cálcio Hidratado C-H – Hidróxido de Cálcio E – Etringita

Figura 30. Microestrutura da zona de transição do concreto padrão. Fonte: Autor (2015).



C-S-H – Silicato de Cálcio Hidratado C-H – Hidróxido de Cálcio E – Etringita

Figura 31. Microestrutura da zona de transição do concreto com resíduo. Fonte: Autor (2015).

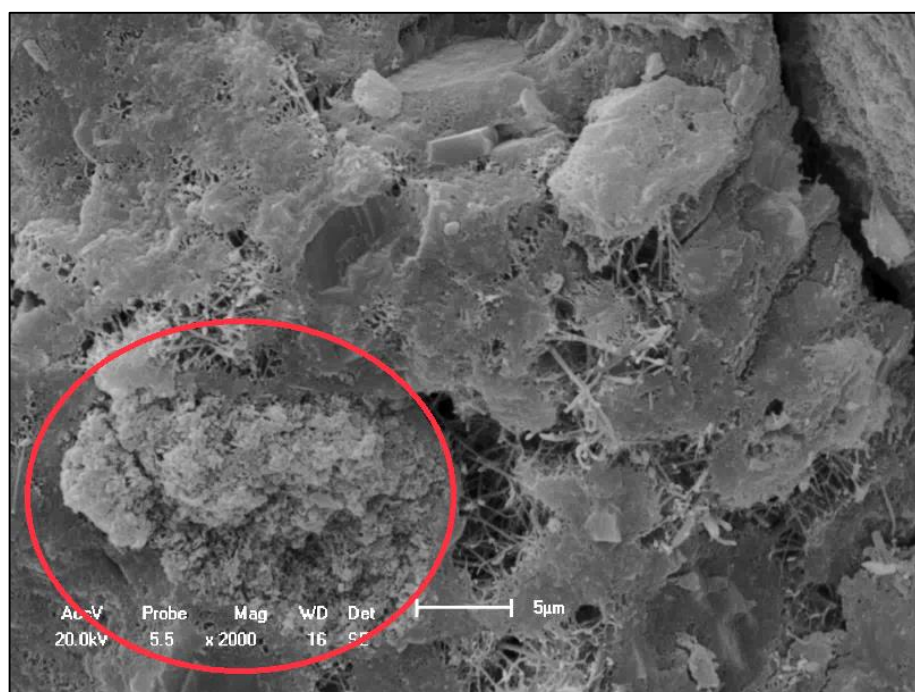


Figura 32. Detalhe de partícula na zona de transição de concreto com resíduo. Fonte: Autor (2015).

4.6 Avaliação técnica e ambiental

No âmbito técnico a incorporação do resíduo aos concretos promoveu uma alteração em suas características físicas e mecânicas, bem como em sua microestrutura. Os principais efeitos do processo foram um aumento da trabalhabilidade, absorção e índice de vazios, além de redução significativa da resistência à compressão para o concretos com resíduo, podendo chegar a 42% no caso das amostras com 10% de lodo e medida aos 28 dias.

No que tange a microestrutura das amostras, foi possível observar, através da dosagem com maior teor de resíduo, que a presença desse material pode ter influenciado no processo de hidratação dos compostos. Além disso, possíveis partículas de lodo de características esponjosas foram identificadas na zona de transição.

Apesar de alguns efeitos negativos, o processo de incorporação se demonstrou tecnicamente viável. A dosagem de 20% de resíduo foi considerada, dentre aquelas estudadas pela pesquisa, como a mais viável, tendo em vista que possuiu uma alta trabalhabilidade e porosidade inferiores ao do concreto padrão e por fim, resistência à compressão em conformidade para a produção de artigos como pisos de concreto pré-moldados, concreto magro e outras aplicações de caráter não estrutural.

Do ponto de vista ambiental a reutilização do resíduo na própria empresa geradora promove ganhos consideráveis na sustentabilidade do processo industrial. O resíduo, ao invés de destinado para aterros é agora confinado em uma matriz cimentícia endurecida que em grande parte dos casos impede a lixiviação e solubilização dos compostos para o ambiente.

Com isso, contribui para uma redução nas áreas de aterros, preservação da sanidade do meio e ainda na diminuição da utilização de matérias primas com processos de fabricação mais danosos, como é o caso dos cimentos.

Contudo, é importante, também, avaliar a viabilidade econômica do processo, tendo em vista que além de ambientalmente correto este processo deve ser atrativo financeiramente para a empresa geradora do resíduo, de maneira que esta, a par das vantagens envolvidas decida por adotar a prática.

4.6.1 Avaliação de viabilidade econômica

Primeiramente, para se realizar uma avaliação desta natureza é importante saber a quantidade de resíduo que é gerado e enviado para o aterro a cada remessa e o custo desse processo. Essa quantia de resíduo será a utilizada para a confecção dos concretos e peças pré-moldadas sendo necessária para calcular a produção máxima e consequente economia atingida.

Em consulta aos recibos emitidos pela empresa que administra o aterro sanitário foi possível saber que em um período de dois meses a indústria geradora enviou cerca de 1580 Kg de resíduo.

Com sua reutilização a empresa já é contemplada com uma economia que remete ao custo para transporte e acondicionamento no aterro sanitário. Além disso, o processo permite economia de concreto para a produção dos artigos pré-moldados, tendo em vista que é acrescentado ao volume total aquele referente ao resíduo industrial.

Sendo assim, caso todo o resíduo, referente ao período de dois meses, seja utilizado serão poupados um volume total de cerca de 0,78 m³ de concreto equivalente a um valor de cerca de R\$ 210,00 para concretos fabricados com matérias primas adquiridas na região. Além disso, ainda podem ser inclusas as diferenças relativas à compra dos produtos pré-moldados em comparação ao custo de fabricação na própria empresa.

Dado essas proposições, a reutilização não só traria quesitos técnicos e ambientais adequados como também proporcionaria uma economia para a empresa geradora, justificando todo o processo e permitindo uma aceitação racional por parte de seus gestores.

CAPÍTULO 5

Conclusões

A pesquisa sobre a incorporação do lodo industrial nas misturas de concreto foi motivada, principalmente, por questões ambientais, cujo objetivo era introduzir o rejeito gerado pela indústria de produtos de limpeza naquele material e avaliar as características do produto final.

Os resultados revelaram que a presença do resíduo na composição dos concretos promoveu alterações tanto no estado fresco quanto endurecido, sendo mais evidente nos parâmetros de trabalhabilidade e resistência à compressão.

As principais conclusões relativas ao processo para o comportamento do concreto no estado fresco são:

- Para todos os traços de concreto com incorporação do resíduo executados nesta pesquisa houve um incremento de trabalhabilidade, sendo o valor máximo obtido pelas misturas com 5% de lodo industrial. Para esse teor houve um aumento de cerca de 33% quando comparado com o traço padrão, isento de lodo.
- Este comportamento pode ser atribuído à natureza química do resíduo que apresenta em sua composição substâncias surfactantes capazes de adsorver partículas de ar na massa, aumentando sua trabalhabilidade. Este efeito é semelhante ao que ocorre com a injeção de aditivos incorporadores de ar que também possuem substâncias com essa propriedade em sua composição.
- Para as misturas posteriores este incremento foi sendo reduzido, culminando com a mistura executada com o maior teor de resíduo (20%) que apresentou a plasticidade mais próxima ao traço padrão, com cerca de 17 cm de abatimento. Essa diminuição pode ser atribuída ao aumento da demanda de água pelo resíduo e diminuição da relação água/materiais secos. Ademais, essa plasticidade é ideal para a fabricação de artigos pré-

moldados onde em alguns casos são requisitados uma melhor qualidade do acabamento externo.

No que tange o comportamento dos concretos fabricados no estado endurecido, para a resistência à compressão e porosidade total pode-se destacar:

- Para todas as misturas de concreto foi constatada uma redução no parâmetro de resistência à compressão, em relação ao traço padrão, com comportamentos semelhantes em todas as idades estudadas.
- Para a máxima concentração de resíduo, analisada aos 28 dias de cura, obteve-se uma redução de cerca de 39% deste parâmetro, com valores em média de 14 MPa de resistência. Sendo assim, as peças fabricadas com essa mistura podem ser utilizadas em caráter não estrutural, como é o caso de pisos pré-fabricados de concreto.
- Em todas as amostras com resíduo constatou-se uma redução no incremento de resistência dos 7 aos 28 dias quando comparado com o traço de referência. Esse fato reforça a ideia de que o resíduo não apresenta uma efetiva atividade pozolânica e corrobora os dados do ensaio de pozolanicidade realizado.
- Com relação ao índice de vazios e absorção de água têm-se que em todos os traços confeccionados com resíduo houve um aumento dos dois parâmetros, em relação ao traço padrão, com exceção do teor de 20% em que o índice de vazios foi inferior. Este fator pode influenciar negativamente na durabilidade desses concretos.
- O aumento da porosidade das amostras pode ser atribuído a uma maior taxa de incorporação de ar na massa resultante do efeito da adição, além disso pode justificar as pequenas variações de resistência entre os traços com resíduo.
- A tendência decrescente desses parâmetros a partir das amostras com 10% de resíduo pode estar relacionada com o efeito fíler e refinamento dos poros além crescimento da demanda de água pelo resíduo e redução da água livre na mistura.

Com a análise microestrutural foi possível observar, inicialmente, uma porosidade superficial semelhante entre os concretos sem resíduo e com 20% de incorporação, corroborando os dados dos ensaios de absorção de água e índice de

vazios. Além disso, no que tange a microestrutura da zona de transição foi possível constatar um aumento acentuado da porosidade nessa zona para o concreto com resíduo, atribuído principalmente a grande quantidade do composto etringita visualizada em detrimento a formação de compostos cimentantes como o C-S-H.

Esse pode ser um dos principais motivos pela queda de resistência para as misturas com resíduo em comparação ao concreto padrão, devendo ter sido provocada pelo aumento das reservas de aluminato e sulfato, potencialmente presentes na composição do resíduo industrial e essencial para a formação do composto hidratado etringita.

Foi também possível observar aglomerados de partículas rugosas introduzidas na zona de transição dos concretos com resíduo e que acredita-se ser referente ao resíduo adicionado. Estas partículas agem preenchendo espaços através do efeito fíler porém favorecem a formação do composto etringita além de, possivelmente, não possuírem forças de coesão capazes de manter a resistência da região.

De um modo geral, tomando por base os resultados técnicos nos concretos produzidos e a avaliação econômica e ambiental, os concretos com 20% de resíduo incorporado são considerados a melhor opção para reaproveitamento em matrizes cimentícias.

Estes, apresentaram trabalhabilidade e porosidade bem semelhantes ao concreto padrão, além disso, embora tenham reduzido a resistência à compressão do traço para 14 MPa podem ser utilizados eficientemente para a produção de artigos pré-fabricados de caráter não estrutural, constituindo uma excelente opção para a disposição de todo o resíduo gerado pela indústria.

CAPÍTULO 6

Sugestões para trabalhos futuros

De acordo com a realização desta pesquisa, de forma pioneira para este resíduo, têm-se a expectativa de que se possam ser motivados novos estudos relacionados, principalmente no que tange a utilização de novos teores e estudo de outras variáveis. Em face disto, e frente ao grande campo de pesquisa que esta temática pode trazer, são sugeridos os seguintes tópicos para trabalhos futuros:

- Análise da influência do resíduo nas mesmas propriedades estudadas, utilizando-se para tal de teores superiores a 20%;
- Introdução do resíduo na dosagem dos concretos em substituição parcial ao aglomerante e análise de seu comportamento no estado fresco e endurecido;
- Análise da influência da adição do lodo industrial na durabilidade dos concretos;
- Dada a sua capacidade de aumento da trabalhabilidade, pode-se estudar a incorporação do resíduo para obtenção de concretos auto adensáveis.
- Realização de análises ambientais de lixiviação e solubilização nos produtos finais fabricados a fim de se reiterar a viabilidade ambiental desse novo material.

Referências

ABCP. (2002): Guia básico de utilização do cimento Portland. ABCP, São Paulo, 28p.

ABNT (1984a) NBR 6459 – Solo – Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 6 p.

ABNT (1984b) NBR 7180 – Solo – Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 3 p.

ABNT (1991) NBR 5733 – Cimento Portland de alta resistência inicial. Rio de Janeiro, 5 p.

ABNT (1997) NBR 7215 – Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 8 p.

ABNT (1998) NBR NM 67 – Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 8 p.

ABNT (2001) NBR NM 23 – Cimento portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 5 p.

ABNT (2003a) NBR NM 248 – Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 6 p.

ABNT (2003b) NBR NM 43 – Cimento portland – Determinação da pasta de consistência normal. Rio de Janeiro, 8 p.

ABNT (2003c) NBR NM 65 – Cimento Portland – Determinação do tempo de pega. Rio de Janeiro, 4 p.

ABNT (2004a) NBR 10004 – Resíduos Sólidos – Classificação. Rio de Janeiro, 71p

ABNT (2004b) NBR 10005 – Procedimentos para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 16p.

ABNT (2004c) NBR 10006 – Procedimentos para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 3p.

ABNT (2004d) NBR 10007 – Amostragem de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 21p.

ABNT (2004e) NBR 15116 – Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural – Requisitos. Rio de Janeiro, 12 p.

ABNT (2006) NBR NM 45 – Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 8 p.

ABNT (2007) NBR 5739 – Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos, Rio de Janeiro, 9 p.

ABNT (2009b) NBR 7211 – Agregados para concreto – Especificações. Rio de Janeiro, 9p.

ABNT (2009c) NBR 9778 – Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 4 p.

ABNT (2009d) NBR NM 52 – Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 6 p.

ABNT (2009e) NBR NM 53 – Agregado graúdo – Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 8 p.

ABNT (2012a) NBR 11579 – Cimento Portland – Determinação do índice de finura por meio da peneira 75 μm (nº 200). Rio de Janeiro. 4 p.

ABNT (2012b) NBR 11582 – Cimento Portland – Determinação da expansibilidade Le Chatelier. Rio de Janeiro, 4 p.

ABNT (2012c) NBR 5751 – Materiais pozolânicos – Determinação da atividade pozolânica com cal aos sete dias. Rio de Janeiro, 4 p.

ABNT (2014a) NBR 12653 – Materiais pozolânicos – Requisitos. Rio de Janeiro, 6 p.

ABNT (2014b) NBR 5752 – Materiais pozolânicos – Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias. Rio de Janeiro, 4 p.

ABNT (2014c) NBR 6118 – Projeto de estruturas de concreto – procedimento. Rio de Janeiro.

ABNT (2015) NBR 5738 – Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 9 p.

ALLEN, T. (1997) Particle Size Measurement, 5 ed., v. 1, Chapman and Hall, London.

ALVES, J. D. (1993): Manual de tecnologia do concreto. 3 ed., Editora da UFG, Goiânia.

ANDREOLI, C. V.; PINTO, M. A. T. (2001): Introdução. ANDREOLI, C. V. (Coord.). Resíduos sólidos do saneamento: processamento, reciclagem e disposição final. ABES, RIMA, Rio de Janeiro.

ANDREOLI, C. V.; VON SPERLING, M.; FERNANDES, F. (2001): Lodo de esgotos: Tratamento e disposição final. Princípios do tratamento biológico de águas residuárias. 1 ed., Editora UFMG, Belo Horizonte, p. 482.

ANDRIOLO, F. R. (1984): Construções de concreto. Pini, São Paulo, p. 738.

ARAÚJO, R. C. L.; RODRIGUES, E. H. V.; FREITAS, E. G. A. (2000): Materiais de construção. Editora Universidade Rural, Rio de Janeiro.

AVELINO, V. K. G. R. (2011) Estudo do comportamento no estado fresco e endurecido do concreto com incorporação de resíduo de corte de botão. Dissertação (Mestrado), Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 94 p.

BAUER, L. A. F. (2000): Materiais de Construção. v 1. 5 ed., LTC, Rio de Janeiro, p. 447.

BHATTY, J.I.; REID, K. (1989) Compressive Strength of Municipal Sludge Ash Mortars. ACI Materials journal, vol. 86, n. 4, p. 394-400.

BREHM, F. A.; KULAKOWSKI, M. P.; EVALDT, D. C.; MORAES, C. A. M.; PAMPANELLI, A. B. (2013) Análise da estabilização por solidificação de lodo de fosfatização em matrizes de cimento Portland e de cerâmica vermelha para a utilização na construção civil. *Ambiente Construído*, Porto Alegre, vol. 13, n. 2, p. 15-27.

CALLISTER, W. D. (2008): *Ciência e engenharia de materiais: uma introdução*. 8 ed., LTC, Rio de Janeiro.

CASSINI, S. T.; VAZOLLER, R. F.; PINTO, M. T. (2003): *Introdução*. CASSINI, S. T. (Coord.). *Digestão de resíduos sólidos orgânicos e aproveitamento do biogás*. ABES, RIMA, Rio de Janeiro, cap. 1.

COSTA, F. M. S. (2014) *Estudo da viabilidade da utilização de cinza de lodo de esgoto como adição em argamassa de cimento Portland*. Dissertação (Mestrado), Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 104 p.

COUTAND, M.; CYR, M.; CLASTRES, P. (2006) Use of sewage sludge ash as mineral admixture in mortars. *Construction materials*, n. 159, p. 153 – 156.

COUTINHO, M. J. A. R. S. (1998) *Melhoria da durabilidade dos betões por tratamento da confragem*. Tese (Doutorado), Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 392 p.

CYR, M.; COUTLAND, M.; CLASTRES, P. (2007) Technological and environmental behavior of sewage sludge ash (ssa) in cement-based materials. *Cement and Concrete Research*, vol. 37, n. 8, p. 1278 – 1289.

DOS SANTOS, A. B. (2007): *Avaliação técnica de sistemas de tratamento de esgotos*. 1. ed. Fortaleza: Banco do Nordeste do Brasil. 206p.

FARIAS, M. M.; PALMEIRA, E. M. (2007): *Agregados para Construção Civil*. G. C. Isaia *Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia dos Materiais*. 1 ed., IBRACON, São Paulo, p. 1712, cap.16.

FONTES, C. M. A.; BARBOSA, M. C.; TOLEDO FILHO, R. D.; GONÇALVES, J. P. (2004) Potentiality of sewage sludge ash as mineral additive in cement mortar and high performance concrete. *Conference on the Use of Recycled Materials in Building and Structures*.

GABRICH, F. M. (2008) Estudo da Influência das adições Minerais no Comportamento do Concreto sob Ação do Fogo. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Minas Gerais.

GEYER, A. L. B. (2001) Contribuição ao estudo da disposição final e aproveitamento da cinza de lodo de estações de tratamento de esgotos sanitários como adição ao concreto. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 216p.

GIAMUSSO, S. (1992): Manual do concreto. Pini, São Paulo, p. 162.

GOMES, P. C. C.; BARROS, A. R. (2009): Métodos de dosagem de concreto auto-adensável. 1 ed., PINI, São Paulo.

GONÇALVES, J. P. (2000) – Utilização do resíduo de corte de granito (RCG) como adição para produção de concretos. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

HAHIN, C. (1984): Corrosion resistant design guidelines for portland cement concrete. Materials Performance, vol. 23, n. 4, p. 42–46.

HEREK, L. C. S.; BERGAMASCO, R.; TAVARES, C. R. G.; UERMURA, V. O.; PANCOTTE, L. P. (2005) Estudo da Solidificação/Estabilização do Lodo da Indústria Têxtil em Material Cerâmico. Revista Cerâmica Industrial, São Paulo, vol. 10, n. 4, p. 41-46.

HILDEBRAND, H. (1999) Refractive index considerations in light scattering particle size measurements in advances in process control measurements for the ceramic industry. JILLAVENKATESA A.; ONODA G., American Ceramic Society, Westerville, p. 379.

HOPPEN, C.; PORTELLA, K. F.; ANDREOLI, C. V.; SALES, A.; JOUKOSKI, A. (2005) Estudo de dosagem para incorporação do lodo de ETA em matriz de concreto, como forma de disposição final. 23 Congresso Brasileiro De Engenharia Sanitária e Ambiental, Campo Grande, 9p.

IMHOFF, K. R. (1996): Manual de tratamento de águas residuárias. 26 ed. São Paulo: Editora Edgard Blucher, 301p.

INGUNZA, M. P. D.; ANDREOLI, C. V.; NASCIMENTO, R. M.; TINOCO, J. D.; HOPPEN, C.; PEGORINI, E. S. (2006) Uso de resíduos do saneamento na fabricação da cerâmica vermelha. ANDREOLI, C. V. Alternativas de uso de resíduos do saneamento. 1 ed., ABES, Rio de Janeiro, p. 417, cap 9.

JORDÁN, M. M.; CANDEL, M. B. A.; ROMERO, M.; RINCÓN, J. M. (2005) Application of sewage sludge in the manufacturing of ceramic tile bodies. *Applied Clay Science*. vol. 30, p. 219-224.

JORDÃO, E. P.; PESSÔA, C. A. (2011): Tratamento de esgotos domésticos. 6. ed. ABES, Rio de Janeiro, 1050p.

KAEFER, L. F. (1998): A evolução do concreto armado. São Paulo, p. 43.

KAZMIERCZAK, C. S. (2010) Produtos de cerâmica vermelha. ISAIA, G. C. (Ed.). Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais. 2 ed. IBRACON, São Paulo, vol. 1, cap. 18, p. 565-588.

KLEIN, C.; DUTROW, B. (2012): Manual de ciência dos minerais. 23. ed. Bookman, Porto Alegre.

LARA, A. I.; ANDREOLI, C. V. PEGORINI, E. S. (2001) Avaliação dos impactos ambientais e monitoramento da disposição final do lodo. ANDREOLI, C. V.; VON SPERLING, M.; FERNANDES, F. Lodo de esgotos: tratamento e disposição final. Editora UFMG, Belo Horizonte, 484p.

LESSA, G. T. (2005) Contribuição ao estudo da viabilidade da utilização do lodo de estação de tratamento biológico de esgoto misto na construção civil. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

LIMA, J. F. (2013) Avaliação da incorporação de cinzas de lodo de esgoto como adição mineral em concretos de Cimento Portland. Dissertação (Mestrado), Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 77 p.

LOHTIA, R. P.; JOSHI, R. C. (1996) Mineral Admixtures. Ramachandran, V. S. Concrete Admixtures. 2 ed., William Andrew Publishing, Park Ridge, p. 657-739.

MCBRIDE, M. B. (1994) Environmental Chemistry of Soil. Oxford University Press, New York, 406 p.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. (1994) Concreto: Estrutura Propriedades e Materiais. PINI, São Paulo, p. 573.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. (2008): Concreto: Microestrutura, propriedades e materiais. 1 ed., Editora Pini, São Paulo, p. 616.

MENEZES, R. R.; NEVES, G. A.; FERREIRA, H. C. (2002) O estado da arte sobre o uso de resíduos como matérias-primas cerâmicas alternativas. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. Campina Grande, vol. 6, n. 2, p. 303-313.

METCALF & EDDY. (2003): Wastewater engineering: treatment and reuse. 4 ed. McGraw-Hill Companies, New York. 1819 p.

MONZÓ, J.; PAYÁ, J.; BORRACHERO, M.V.; GIRBÉS, I. (2003) Reuse of sewage sludge ashes (ssa) in cement mixtures: the effect of (SSA) on the workability of cement mortars.

NEVILLE, A. (1997): Propriedades do concreto. PINI, São Paulo, p. 828.

NEVILLE, A. M. (2015): Propriedades do concreto. 5 ed., Bookman, Porto Alegre, 912 p.

NUVOLARI, A.; COSTA, R. H. P. G. (2010): Tratamento de efluentes. TELLES, D. D. A.; COSTA, R. H. P. G. (Coord.). Reuso da água: conceitos, teorias e práticas. 2 ed. Blucher, São Paulo, cap. 6. p. 51-151.

PAIVA, S. N. (2007) Compósito cimento-lodo de ETE de indústria de papel para aplicação na construção civil. Dissertação (Mestrado), Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 110 p.

PEDROZA, M. M.; VIEIRA, G. E. G.; SOUSA, J. F. (2011) Características químicas de lodos de esgotos produzidos no Brasil. Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales: Investigación, desarrollo y práctica, São Paulo, vol. 4, n. 2, p. 35-47.

PEGORINI, E. S.; ANDREOLI, C. V. (2006) Introdução. ANDREOLI, C. V. Alternativas de uso de resíduos do saneamento. 1 ed. ABES, Rio de Janeiro, 417p. cap 1.

PETRUCCI, E. G. R. (1998): Materiais de Construção. 11 ed. Globo, São Paulo, p. 435.

PINHEIRO, R. M. (2008) Reciclagem de lodo primário da estação de tratamento de efluentes da indústria de papel em cerâmica argilosa. Dissertação (Mestrado), Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campo dos Goytacazes, Rio de Janeiro, 102p.

PINTO, C. A. (2005) Estudo da estabilização por solidificação de resíduos contendo metais pesados. Tese (Doutorado), Departamento de Engenharia Química, Universidade de São Paulo, 229p.

PRUDÊNCIO, W. J. (1986) Carbonatação da superfície das estruturas de concreto armado. Anais do 2º Seminário Nacional de Corrosão na Construção Civil, Rio de Janeiro. ABRACO, Rio de Janeiro, p. 147-156.

RESENDE, D. S.; BEZERRA, A. C. S; GOUVEIA, A. M. C. (2012). Propriedades mecânicas de compósitos cimentícios produzidos com lodo de estação de tratamento de efluentes da indústria de batata pré-fritas. Revista Escola de Minas, vol. 65, n. 2, p. 169-174.

RODRIGUES, R; BRITO, J; SARDINHA, M. (2015). Mechanical properties of structural concrete containing very fine aggregates from marble cutting sludge. Construction and Building Material, vol. 77, p. 349-356.

SAMPAIO, Z. L. M. (2013) Análise do comportamento mecânico de concretos produzidos com incorporação de cinza do bagaço da cana-de-açúcar de variedades sp911049, rb92579 e sp816949. Dissertação (Mestrado), Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 134 p.

SEBBEN, A. A.; MULLER JUNIOR, N.; SAVARIS, G. (2013) Uso do resíduo de estação de tratamento de esgoto como agregado miúdo para produção de concretos. IBRACON, São Paulo.

SILVA, F. G. (2006) Estudo de concretos de alto desempenho frente à ação de cloretos. Tese (Doutorado), Universidade de São Paulo, p. 220.

SOUZA, P. A. B. F. (2007) Estudo do comportamento plástico. mecânico, microestrutural e térmico do concreto produzido com resíduo de porcelanato. Tese (Doutorado), Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 230 p.

SOUZA, V. C. M.; RIPPER, T. (1998): Patologia, Recuperação E Esforço De Estruturas de Concreto. PINI, São Paulo.

TARTUCE, R. (1990): Dosagem experimental de concreto. PINI, São Paulo, p. 115.

TARTUCE, R.; GIOVANNETTI, E. (1990): Princípios Básicos sobre Concreto de Cimento Portland. PINI, São Paulo, p. 107.

TAYLOR, H. F. W. (1997): Cement chemistry. 2 ed., Thomas Telford, London, p. 459.

TEIXEIRA, S.R.; SOUZA, S.A.; SOUZA, N.R.; JOB, A.E.; GOMES, H.M.; HEITZMANN NETO, J.F.; (2002) Caracterização de resíduos de estação de tratamento de água (ETA) e de esgoto (ETE) e o estudo da viabilidade de seu uso pela indústria cerâmica XXVII Congresso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Cancun, 7 p.

TUTIKIAN, B. F.; DAL MOLIN, D. C. C. (2008): Concreto auto-adensável. 1 ed., PINI, São Paulo.

VALLS, S.; YAGUE, A.; VÁZQUEZ, E.; MARISCAL, C. (2004) Physical and mechanical properties of concrete with added dry sludge from a sewage treatment plant. Cement and Concrete Research, vol. 34, p. 2203 – 2208.

VAN HAANDEL, A.; SOBRINHO, P. A. (2006): Produção, composição e constituição de lodo de esgoto. In: ANDREOLI, C. V. Alternativas de uso de resíduos do saneamento. 1 ed. ABES, Rio de Janeiro, 417p. cap 2.

VERÇOZA, E. J. (1984): Materiais de Construção. 2 ed., Sagra, Porto Alegre, p. 153.

VON SPERLING, M. (2014): Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos. 4 ed. Editora UFMG, Belo Horizonte, 472p.