



UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIA
DE PROCESSOS QUÍMICOS E BIOQUÍMICOS



ELISANDRO ALEXANDRE

**SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO CIMENTO CPV-ARI POR DO LODO DE
ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA (ETA)**

DISSERTAÇÃO

Pato Branco, 2018.

ELISANDRO ALEXANDRE

**SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO CIMENTO CPV-ARI POR DO LODO DE
ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA (ETA)**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos da Universidade Tecnológica Federal do Paraná como requisito parcial para obtenção do título de “Mestre em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos”. Área de conhecimento: Química de Materiais.

Professora Orientadora: Dra. Caroline Angulskida Luz

Pato Branco, 2018.

A381s Alexandre, Elisandro.
Substituição parcial do cimento CPV-ARI por lodo de estação de
tratamento de água (ETA) / Elisandro Alexandre. -- 2018.
74 f. : il. ; 30 cm.

Orientadora: Profa. Dra. Caroline Angulskida da Luz
Dissertação (Mestrado) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná.
Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de Processos Químicos e
Bioquímicos. Pato Branco, PR, 2018.
Bibliografia: f. 67 - 73.

1. Cimento. 2. Lodo. 3. Propriedades mecânicas. 4. Resíduos. 5. Meio
ambiente. I. Luz, Caroline Angulskida da, orient. II. Universidade
Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em
Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos. III. Título.

CDD (22. ed.) 660.281

Ficha Catalográfica elaborada por
Suélem Belmudes Cardoso CRB9/1630
Biblioteca da UTFPR Campus Pato Branco



TERMO DE APROVAÇÃO Nº 81

Título da Dissertação

"Substituição parcial do cimento CPV-ARI por lodo de estação de tratamento de água (ETA)"

Autor

Elisandro Alexandre

Esta dissertação foi apresentada às 14 horas do dia 20 de dezembro de 2018, como requisito parcial para a obtenção do título de MESTRE EM TECNOLOGIA DE PROCESSOS QUÍMICOS E BIOQUÍMICOS – Linha de pesquisa em Alimentos – no Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos. A autora foi arguida pela Banca Examinadora abaixo assinada, a qual, após deliberação, considerou o trabalho aprovado.

Profa. Dra. Caroline Angulski Da Luz
UTFPR/PB
Orientadora

Prof. Dr. Márcio Barreto Rodrigues
UTFPR/PB
Examinador

Profa. Dra. Aline Ferrão Custódio Passini
(UFMS-Frederico Westphalen)
Examinadora

Visto da Coordenação

Prof. Dr. Edimir Andrade Pereira
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em
Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos - PPGTP

O Termo de Aprovação assinado encontra-se na Coordenação do PPGTP

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus pela vida e proteção durante os inúmeros deslocamentos de Frederico Westphalen/RS a Pato Branco/PR.

À minha noiva Paula Miriã Santa Catarina, pelo amor, compreensão, companheirismo, paciência e inspiração para a conclusão deste trabalho.

Aos meus pais Waldelírio Alexandre e Ivone Alexandre pelos conselhos e apoio nesta caminhada, aos quais eu sou eternamente grato. Ao meu tio Ivo Skorek (*in memoriam*) aonde estiver sei que está torcendo por mim.

Agradeço imensamente a minha orientadora professora Caroline Angulski da Luz, por ter acreditado e confiado em mim para o desenvolvimento deste trabalho, além da dedicação, preocupação, paciência e tempo empregado durante todo o período da pesquisa.

À técnica do laboratório de materiais da UTFPR, Cláudia Baldin, pela disposição em sempre ajudar e auxiliar no desenvolvimento das atividades.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos (PPGTP) da UTFPR *campus* Pato Branco/PR, pelo conhecimento compartilhado durante as disciplinas.

Aos meus sogros Luiz Eugênio Santa Catarina e Marisa de F. H. Santa Catarina e minha cunhada Elisa Santa Catarina que foram fundamentais pelo apoio durante o período de estudo.

Aos meus amigos queridos pela torcida, apoio e incentivo concedido.

À colega de laboratório e amiga Andreza Frare aluna do PPGEC, importante no desenvolvimento deste trabalho, auxiliando em diversos ensaios da pesquisa e incentivando para a conclusão do trabalho.

Aos alunos de iniciação científica que frequentaram o laboratório ao longo deste período, em especial à Keila Stédile e Mariana Perardt, pela amizade e diversos auxílios em inúmeras etapas da pesquisa.

Aos colegas Guilherme do PPGTP, Jeferson T. O. Homrich e Priscila Ongaratto Trentin do PPGEC pelo apoio, incentivo e troca de conhecimentos.

Aos estagiários do laboratório de materiais Karolyne Amaral, Igor Lazzaretti e Juneor Sachet, pelo indispensável apoio e dedicação.

DEDICATÓRIA

À minha noiva Paula Miriã Santa
Catarina e aos meus pais Waldelírio
Alexandre e Ivone Alexandre pelo
amor incondicional.

EPÍGRAFE

*“Eu sou parte de uma equipe.
Então, quando venço, não sou
eu apenas quem vence. De certa
forma termino o trabalho de um
grupo enorme de pessoas”.*

(Ayrton Senna)

RESUMO

O lodo gerado nas estações de tratamento de água (ETA) é descartado na maioria das vezes sem tratamento adequado nos corpos hídricos, causando negativos impactos ambientais ao meio. Neste contexto, o estudo realizou a avaliação do lodo de ETA para a substituição parcial do cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CPV-ARI). Inicialmente o CPV-ARI foi parcialmente substituído por lodo de ETA na proporção de 10 e 20% em pasta, a qual foi curada por até 28 dias. A resistência mecânica e os compostos hidratados foram avaliados através de testes de DRX, TG/DTG e MEV, além de calorimetria por condução. A substituição do cimento CPV-ARI por lodo de ETA reduziu a capacidade de resistência mecânica se comparado com a pasta referência para a idade de 7 dias. Com o aumento da idade, todas as amostras apresentaram um aumento na resistência mecânica. Pode-se observar a incorporação dos compostos presentes no lodo de ETA pelos compostos do cimento. Os resultados obtidos nos mostram que o emprego do lodo de ETA no cimento é uma alternativa viável do ponto de vista ambiental, sem que haja perda significativa das propriedades do cimento CPV-ARI.

Palavras Chaves: Cimento, lodo de ETA, resistência mecânica, resíduo sólido, meio ambiente.

ABSTRACT

The sludge generated during the water treatment process to supply the population is discarded in most of the time, without adequate treatment in the water bodies, causing negative environmental impacts to the environment. In this context, the study carried out the evaluation of ETA sludge for the partial replacement of Portland cement of high initial resistance (CPV-ARI). Initially the CPV-ARI was partially replaced with 10% and 20% of sludge ETA in slurry, and the slurry was cured at environment temperature of 23°C for up to 28 days. The mechanical resistance and the hydrated compounds were evaluated, tests of XRD, TG/DTG and MEV, as well as conduction calorimetry. The replacement of CPV-ARI cement with ETA sludge reduced the mechanical strength capacity when compared to the reference paste for the age of 7 days. With increasing age, all samples suffered an increase in mechanical resistance. It can be observed the incorporation of the compounds present in the ETA sludge by the cement compounds. The results obtained show that the use of ETA sludge in the cement composition is a viable alternative to the environmentally correct fate of the sludge without significantly losing the properties of the CPV-ARI cement.

Keywords: Cement, ETA sludge, mechanical resistance, solid waste, environment.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Produção de lodo de ETA em função da qualidade da água bruta.	25
Tabela 2 - Classificação dos resíduos sólidos de acordo com a NBR 10.004.	26
Tabela 3 - Tecnologias de remoção da umidade do lodo de ETA.....	29
Tabela 4 - Principais fases anidras do cimento Portland.....	33
Tabela 5 - Principais trabalhos utilizando lodo de ETA em cimento.....	41
Tabela 6 - Composição química, finura e massa específica dos materiais.	49
Tabela 7 - Proporção dos materiais em massa utilizados em cada pasta.....	53
Tabela 8 - Etapas do preparo das pastas.	53
Tabela 9 - Resultados dos testes de resistência à compressão das amostras.	75

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema representativo de um sistema de tratamento convencional.	19
Figura 2 - Coagulação utilizando uma calha parshall para a mistura rápida.	20
Figura 3 - Unidade de floculação logo após a saída da água da mistura rápida.	21
Figura 4 - Decantadores de alta taxa.	22
Figura 5 - Partículas lamelares conglomeradas.	24
Figura 6 - Micrografias obtidas por MEV.	28
Figura 7 - Curva de liberação de calor de duas pastas de cimento.	35
Figura 8 - Região densa, mostrando hidróxido de cálcio compacto.	36
Figura 9 - Cristais de etringita e monosulfoaluminato na pasta de CP.	38
Figura 10 - Evolução da hidratação, por análise de DRX da pasta de CP V – ARI.	38
Figura 11 - Curvas TG e DTG de pastas de cimento Portland (PC).	39
Figura 12 - Curva do fluxo de calor de hidratação das pastas.	42
Figura 13 - Variação da resistência mecânica das amostras.	43
Figura 14 - Micrografia da pasta com teor de 20% de lodo de ETA.	44
Figura 15 - Resistência mecânica do concreto com lodo de ETA úmido.	45
Figura 16 - Resistência mecânica do concreto com lodo de ETA calcinado.	45
Figura 17 - Ação do aditivo redutor de água.	47
Figura 18 - Difratograma do lodo de ETA.	50
Figura 19 - Homogeneização do lodo in natura.	51
Figura 20 - Lodo de ETA após o processo de secagem.	51
Figura 21 - Moinho de Bolas utilizado no processo de moagem dos materiais.	52
Figura 22 - Almofariz e pistilo utilizados na complementação da moagem.	52
Figura 23 - Molde utilizado na elaboração das pastas.	54
Figura 24 - Equipamento utilizado no ensaio de resistência mecânica.	54
Figura 25 - Equipamento de calorimetria.	57
Figura 26 - Resultado dos testes de resistência mecânica das pastas.	59
Figura 27- Taxa de calor liberado das pastas para o tempo de 168 horas.	61
Figura 28 - Taxa de calor liberado das pastas para o tempo de 42 horas.	61
Figura 29 - Calor total liberado durante a hidratação.	62
Figura 30 - Difratograma das pastas.	63
Figura 31 - Curvas de TG e DTG das amostras para a idade de 28 dias.	64
Figura 32 - Micrografias das amostras com adição de lodo.	65

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 – Relação de óxidos para classificação da escória de alto forno	31
Equação 2 – Reação de hidratação do C ₃ S	34
Equação 3 – Reação de hidratação do C ₂ S	34
Equação 4 – Reação de hidratação do C ₃ A	34

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT	Agência Brasileira de Normas técnicas
CH	Hidróxido de cálcio
C-S-H	Hidróxido de Cálcio hidratado
CPV	Cimento Portland tipo V
DRX	Difração de raios X
DTG	Análise Termogravimétrica Derivada
ETA	Estação de tratamento de água
FRX	Fluorescência de raios X
MEV	Microscopia Eletrônica de varredura
NBR	Norma Brasileira
MPa	Mega pascal
TG	Análise Termogravimétrica

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 OBJETIVO GERAL	17
1.1.1 Objetivos específicos	17
2 REFERENCIAL TEÓRICO.....	19
2.1 TRATAMENTO DE ÁGUA.....	19
2.1.1 Geração de Lodo no tratamento de água.....	19
2.1.1.1 <i>Coagulação/Mistura Rápida</i>	20
2.1.1.2 <i>Floculação</i>	21
2.1.1.3 <i>Decantação</i>	22
2.1.1.4 <i>Filtração</i>	23
2.2 CARACTERIZAÇÃO DO LODO DE ETA.....	23
2.2.1 Lodo de ETA: Resíduo Sólido	25
2.3 TRATAMENTO DO LODO DE ETA	27
2.3.1 Disposição Final	29
2.4 CIMENTO PORTLAND	30
2.4.1 Matéria-prima	30
2.4.1.1 <i>Clínquer</i>	30
2.4.1.2 <i>Adições minerais</i>	31
2.4.2 Mecanismo de Hidratação do cimento Portland.....	32
2.4.2.1 <i>Características dos principais compostos hidratados do cimento Portland</i> ...33	
2.4.3 Vantagens e Desvantagens	40
2.4.4 Substituição parcial do cimento Portland por lodo de ETA.....	40
2.4.5 Aditivos químicos nos cimentos	46
2.4.5.1 <i>Aditivos Redutores de Água</i>	46
2.4.5.2 <i>Modo de Ação</i>	46
3 MATERIAIS E MÉTODOS	48
3.1 MATERIAIS.....	48
3.1.1 Lodo de ETA e cimento CP V - ARI	48
3.1.2 Aditivo redutor de água	50
3.2 MÉTODOS	50
3.2.1 Preparo do lodo de ETA.....	50

3.2.2	Elaboração das Pastas.....	52
3.2.2.1	<i>Preparo das Pastas</i>	53
3.2.3	Avaliação da resistência mecânica	54
3.2.4	Estudo das micro-estruturas da pasta.....	55
3.2.4.1	<i>Difração de Raios X(DRX)</i>	55
3.2.4.2	<i>Análise Termogravimétrica (TG/DTG)</i>	56
3.2.4.3	<i>Calorimetria de condução isotérmica</i>	56
3.2.4.4	<i>Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)</i>	57
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	59
4.1	AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA MECÂNICA	59
4.2	ESTUDO MICROESTRUTURAL DA PASTA DE CIMENTO.....	60
4.2.1	Avaliação do Calor de Hidratação	60
4.2.2	Análise por difração de Raios X (DRX)	62
4.2.3	Análise termogravimétrica (TG) e termogravimétrica derivada (DTG).....	64
4.2.4	Microscopia Eletrônica de varredura (MEV)	65
5	CONCLUSÕES	67
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	68
	APÊNDICES	75

1 INTRODUÇÃO

Os impactos ambientais causados pela geração de resíduos na produção de bens e serviços é um problema que vem tendo um notório crescimento nas últimas décadas. Com isso, inúmeras pesquisas são desenvolvidas com o intuito de transformar esses resíduos em novos produtos, econômicos e tecnicamente viáveis.

A construção civil, é um dos setores que vem sofrendo um impacto positivo do modo em que muitas pesquisas de reaproveitamento de resíduos são desenvolvidas, resultando em novos produtos os quais são aplicados no setor.

Neste contexto, um resíduo que vem sendo estudado com o propósito de apresentar um destino ambientalmente correto é o lodo gerado nas estações de tratamento de água (ETA), o qual é conhecido como lodo de ETA.

O lodo gerado nas ETAs é um resíduo não biodegradável, rico em minerais de silicatos e matéria orgânica, incorporado pelos produtos resultantes das substâncias químicas adicionadas na água bruta durante o processo de tratamento (RODRIGUES e HOLANDA, 2013).

No Brasil, segundo Andrade *et al.* (2018), existem aproximadamente 7.500 ETAs, sendo que a maioria destas operam no sistema convencional, o qual contempla as unidades de: coagulação, floculação, decantação, filtração, desinfecção e muitas vezes fluoretação.

A maioria destas ETAs dispõem os seus resíduos nos mananciais impactando o meio ambiente, sendo que é de fundamental importância que as companhias responsáveis pelo tratamento de água estejam cientes de sua responsabilidade ambiental, já que tal ação pode estar comprometendo cada vez mais a qualidade da matéria-prima que é a água (ACHON, 2013).

Segundo Carneiro e Andreoli (2013) muitas das restrições do lançamento do lodo de ETA nos corpos hídricos, estão associadas com a transformação do coagulante utilizado e como suas reações químicas subsequentes podem vir a influenciar a biota aquática, sendo necessária a avaliação das alterações nos parâmetros de qualidade da água, como: turbidez, DQO, série de sólidos e metais.

A ABNT NBR 10.004 de 2004 classifica o lodo de ETA como sendo resíduo sólido, sendo que o mesmo apresenta particularidades que inviabilizam o seu lançamento na rede pública de esgoto ou corpos de água, exigindo assim

tecnologias específicas para o seu tratamento. O lodo de ETA, é normalmente classificado como sendo da classe II A - Não inerte.

O aproveitamento de resíduos é considerado como uma atividade tecnicamente promissora no emprego de novos materiais no setor da construção civil. A reciclagem na construção civil, pode também resultar na oferta de produtos alternativos, além de apresentar soluções técnicas mais viáveis para situações pontuais com ganho de eficiência no processo e economia de recursos, transporte e disposição dos resíduos. (INGUNZA *et al.*, 2006).

Como a composição mineralógica deste lodo se assemelha com a do cimento Portland, dando destaque a sílica, alumina e óxido de ferro, a sua incorporação ao cimento pode ser uma alternativa tecnicamente viável.

Diferentes estudos já foram realizados afim de apresentar um destino ambientalmente correto para o lodo de ETA. Geraldo, Fernandes e Camarini (2017), produziram um cimento alkáli-ativado com silicato de sódio das cinzas de casca de arroz, sendo substituído parcialmente o *metacaulim* por lodo de ETA. Rodrigues e Holanda (2013), avaliaram a influência da incorporação do lodo de ETA sobre as propriedades tecnológicas de tijolos solo e cimento.

Com o propósito de contribuir com o destino correto dos lodos gerados nas ETAs, o presente estudo visa a substituição parcial do cimento Portland de alta resistência inicial (CPV-ARI) por lodo de ETA gerado em uma estação de tratamento de água do estado do Paraná. Para tal, a substituição foi realizada em pasta, comparando amostras com diferentes teores de lodo de ETA com a pasta Referência, sendo avaliadas propriedades como resistência mecânica, calor de hidratação e compostos formados através da hidratação das pastas.

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Materiais do Departamento de Engenharia Civil da UTFPR *campus* Pato Branco/PR.

1.1 OBJETIVO GERAL

Caracterizar o lodo de ETA e avaliar a substituição parcial do cimento Portland em pasta por este lodo.

1.1.1 Objetivos específicos

- Identificar a formação dos principais compostos hidratados formados durante a hidratação das pastas estudadas;

- Avaliar se a adição de lodo de ETA ao cimento interfere na resistência a compressão do cimento;
- Contribuir para os estudos de disposição de lodo de ETA.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 TRATAMENTO DE ÁGUA

A água destinada ao consumo humano, necessita passar por tratamento afim de atender alguns padrões de potabilidade pré-estabelecidos pela legislação vigente. No Brasil a Portaria de consolidação nº 5, do Ministério da Saúde de 28 de setembro de 2017, é a norma vigente que estabelece esses padrões.

A água bruta é destinada para uma estação de tratamento de água (ETA), onde é realizado um conjunto de operações físicas, químicas e algumas vezes biológicas, objetivando atender os padrões requeridos.

Wagner e Pedroso (2014) afirmam que o sistema de tratamento denominado convencional (Figura 1) é o mais utilizado no Brasil. Esse sistema contempla as etapas de coagulação, floculação, decantação, filtração, desinfecção e fluoretação.



Figura 1 - Esquema representativo de um sistema de tratamento convencional.

Fonte: Autoria própria

A qualidade da água bruta, os produtos químicos empregados no tratamento, a concepção e o projeto da ETA bem como as condições de operação são de extrema importância para que o funcionamento da mesma seja ambientalmente correto (CORDEIRO, 2001).

2.1.1 Geração de Lodo no tratamento de água

Múltiplas etapas do tratamento auxiliam para a formação do lodo gerado durante a potabilização da água, desde a adição de produtos para desestabilizar e aglomerar as partículas suspensas durante as etapas de coagulação/mistura rápida e floculação, até as etapas de decantação e filtração, as quais contemplam o processo de clarificação da água.

2.1.1.1 Coagulação/Mistura Rápida

A água bruta que chega até a ETA apresenta partículas de diversos tamanhos, as quais necessitam serem removidas.

O processo de coagulação corresponde à aplicação de coagulantes químicos ou orgânicos (Figura 2), a fim de remover partículas orgânicas e inorgânicas associadas a partículas suspensas ou dissolvidas. Heller e Pádua (2006) destacam que os coagulantes mais empregados no tratamento de água são o sulfato de alumínio, o cloreto férrico, sulfato ferroso clorado, sulfato férrico e o policloreto de alumínio (PAC).



Figura 2 - Coagulação utilizando uma calha parshall para a mistura rápida.

Fonte: Disponível em: <<http://slideplayer.com.br/slide/10187900/>>. Acesso em: 15 jul. 2017.

Libânio (2010) afirma que a coagulação ocorre na unidade de mistura rápida, sendo que nas estações convencionais a eficiência da coagulação influencia no desempenho das demais unidades de tratamento, pois aumenta a duração das careiras dos filtros (tempo de filtração), e reduz o custo do m³ de água tratada.

Conforme a NBR 12.216 de 1992: “mistura rápida é a operação destinada a dispersar produtos químicos na água a ser tratada, em particular no processo de coagulação, para o qual são destinadas as disposições seguintes” (ABNT, 1992). De modo geral, é o resultado da ação de dispositivos hidráulicos ou mecânicos que

desestabilizam as partículas presentes na água, fazendo com que ocorra a formação de flocos, os quais serão removidos nas etapas subsequentes ao tratamento.

As características químicas e físicas dos resíduos gerados na ETA serão influenciadas pela composição do coagulante, sendo que, problemas com manuseio e a disposição do lodo podem ser minimizados ajustando-se o processo de coagulação, por isso em alguns casos se faz necessária a substituição do agente coagulante (LIBÂNIO, 2010).

2.1.1.2 Floculação

Floculação é a unidade de tratamento subsequente a coagulação e tem por finalidade o aumento do tamanho dos flocos originados a partir de reações na mistura rápida (Figura 3).

Nesta unidade não ocorre a remoção de impurezas, sendo a única finalidade acondicionar a água que será direcionada ao processo de decantação, aumentando o tamanho das partículas (HELLER e PÁDUA, 2006).

Richter e Netto (2007) conceituam floculação como sendo: “Aglomeração das partículas por efeito de transporte de fluido, de modo a formar partículas de maior tamanho que possam sedimentar por gravidade”.



Figura 3 - Unidade de floculação logo após a saída da água da mistura rápida.

Fonte: Disponível em: <http://www.pha.poli.usp.br/default.aspx?id=27&link_uc=disciplina>.

Acesso em: 15 jul. 2017.

2.1.1.3 Decantação

Decantadores são unidades destinadas à remoção de partículas presentes na água pela ação da gravidade. Podem ser convencionais, ou de baixa taxa, e de elementos tubulares ou de alta taxa (ABNT, 1992).

A decantação é uma das técnicas mais antigas e simples de clarificação da água, a qual resulta da ação da gravidade sobre as partículas, facilitando assim, a sedimentação destas ao fundo da unidade (HELLER e PÁDUA, 2006).

A sedimentação de partículas floculentas também é conhecida por decantação, sendo as unidades onde ocorre tal processo chamado de tanques de decantação, mais conhecido por decantadores (RICHTER e NETTO, 2007).

As operações de coagulação/floculação e sedimentação das partículas presentes na água bruta, resultam na formação de lodos nos decantadores (Figura 4). Isso segundo Cordeiro (2001) é resultado da ação de reações químicas e operações físicas de formação de flocos, facilitando a sedimentação ou flotação.

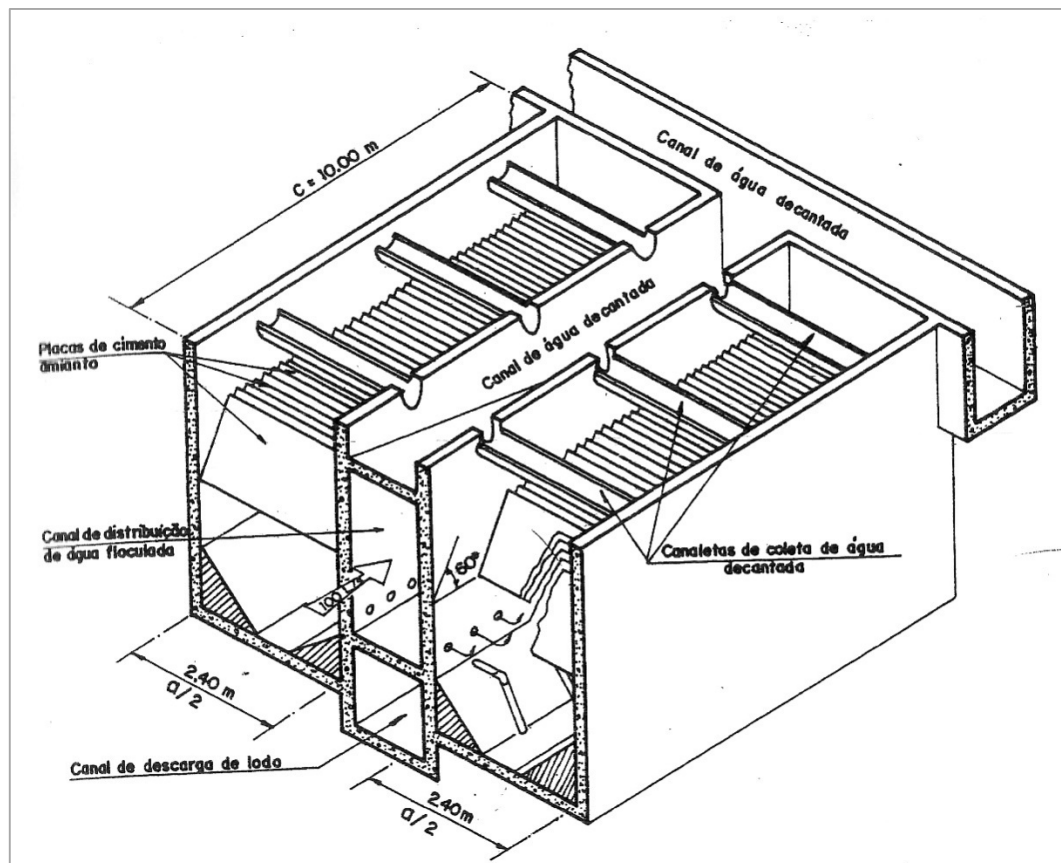


Figura 4 - Decantadores de alta taxa.

Fonte: (RICHTER; NETTO, 2007, p. 162).

Cordeiro (2001), ainda ressalta, que em função de questões operacionais e de projeto, os resíduos gerados nos decantadores são os que apresentam maior concentração de sólidos. Tal afirmação leva a concluir que a unidade na qual é gerado a maior quantidade de lodo é a decantação.

2.1.1.4 Filtração

Após o processo de sedimentação dos flocos nos decantadores a água é direcionada para os filtros. A filtração é um fenômeno de separação sólido-líquido, envolvendo processos físicos, químicos e às vezes biológicos, objetivando que as impurezas da água sejam removidas por sua passagem através de um meio poroso (RICHTER e NETTO, 2007).

Para Libânio (2010) a filtração constitui-se no processo que tem como função primordial, remover as partículas responsáveis pela cor e turbidez na água, cuja presença reduziria a eficiência da desinfecção na inativação dos microrganismos patogênicos presentes na água.

2.2 CARACTERIZAÇÃO DO LODO DE ETA

A água superficial pode conter alumínio, ferro e outros metais carregados pelo escoamento superficial aliados aos produtos empregados no tratamento, os quais somados caracterizam o lodo gerado na ETA (CORDEIRO,2001).

Nesse contexto é válido afirmar que a característica do lodo gerado pode estar associada com a formação geológica e com o relevo da região onde se encontra localizada a ETA.

Algumas espécies metálicas especialmente o ferro e o alumínio presentes no lodo de ETA possuem ações tóxicas podendo interferir positiva ou negativamente nas técnicas de tratamento, disposição final e até mesmo na reutilização deste resíduo. (BOTERO *et al.*, 2009). Dessa forma, se faz necessária a caracterização do lodo, bem como verificar a relação entre a matéria orgânica e espécies metálicas.

Tartari (2008), observou através de microscopia eletrônica de varredura (MEV), que sobre as faces das partículas ocorre a presença de um material aparentemente aderido à superfície, com característica de matéria orgânica, o que pode ser observado na figura 5.

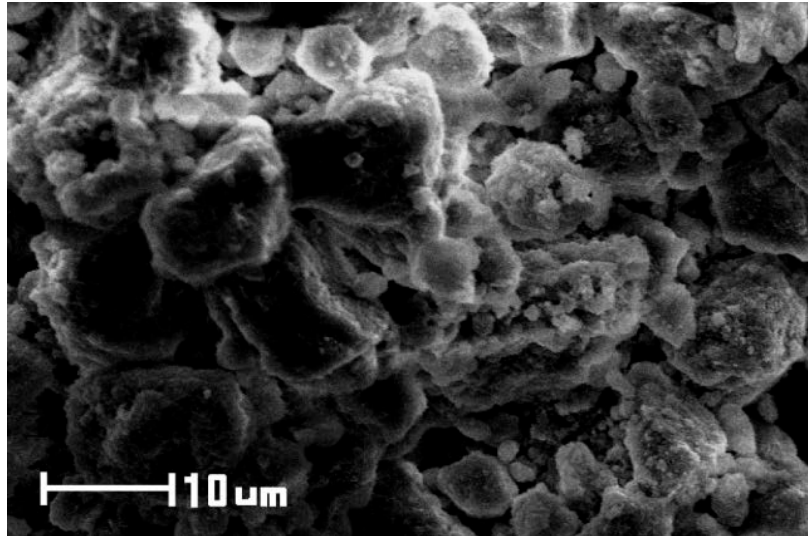


Figura 5 - Partículas lamelares conglomeradas.

Fonte: (TARTARI, 2008).

Os componentes presentes em maiores concentrações nos lodos de ETA, são óxidos e hidróxidos de alumínio e ferro, argilas silicatadas, contaminantes e matéria orgânica, sendo que esta última pode influenciar bioquimicamente a ciclagem de nutrientes (ANDREOLI *et al.*, 2006).

O lodo de ETA pode ser caracterizado como sendo um fluido newtoniano, volumoso e tixotrópico, ou seja, apresenta-se em geral como um gel quando está em repouso, e relativamente fluido quando agitado (ANDREOLI *et al.*, 2006).

Wagner e Pedroso (2014), afirmam que a alternativa de disposição do lodo gerado nas ETAs está diretamente associada com suas características próprias, as quais variam, estando relacionada com alguns fatores como: qualidade da água bruta, tecnologia de tratamento, tipo e dosagem dos produtos empregados no tratamento nas ETAs, dentre outros fatores.

Carneiro e Andreoli (2013), destacam que além da qualidade, ocorre variação na quantidade do lodo retirado do sistema de tratamento, o qual pode variar de 0,2 a 5% do volume tratado pela estação. A Tabela 1 ilustra a produção de lodo de ETA em função da qualidade da água bruta.

Tabela 1 - Produção de lodo de ETA em função da qualidade da água bruta.

Tipo de Manancial	Produção de Lodo (g de sólido seco por m³ de água tratada)
Água de reservatório com boa qualidade	12 – 18
Água de reservatório de média qualidade	18 – 30
Água de rios com média qualidade	24 – 36
Água de reservatório com qualidade ruim	30 – 42
Água de rios com qualidade ruim	42 – 54

Fonte: adaptado de Richter (2001) *apud* Cordeiro e Andreoli (2013, p. 135).

2.2.1 Lodo de ETA: Resíduo Sólido

O lodo gerado no tratamento de água para abastecimento público é classificado como resíduo sólido conforme a ABNT NBR 10.004 (2004), a qual, apresenta a seguinte definição:

Resíduos nos estados sólido e semi-sólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnica e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível. (ABNT, 2004).

Segundo a norma, fica inviável o lançamento deste resíduo em mananciais e na rede pública de esgoto, sendo necessária a realização de técnicas específicas para o tratamento deste tipo de resíduo.

A tabela 2 apresenta a classificação dos resíduos sólidos conforme disposto na ABNT-NBR 10004/2004.

Tabela 2 - Classificação dos resíduos sólidos de acordo com a ABNT-NBR 10.004.

Classificação	Descrição
Resíduos Classe I – Perigosos	Os resíduos caracterizados como perigosos são aqueles que apresentam periculosidade. A periculosidade de um resíduo é associada com a característica apresentada por um resíduo que, em função de suas propriedades físicas, químicas ou infecto-contagiosas, pode apresentar risco à saúde pública, provocando mortalidade, incidência de doenças ou acentuando seus índices, além de riscos ao meio ambiente, quando o resíduo for gerenciado de forma inadequada, necessitando de tratamento e disposição adequada em decorrência de suas características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade.
Resíduos classe II A – Não inertes	São resíduos que podem apresentar propriedades, tais como: biodegradabilidade e combustibilidade ou solubilidade em água.
Resíduos classe II B – Inertes	Quaisquer resíduos que, quando submetidos a um contato dinâmico e estático com água destilada ou desionizada, à temperatura ambiente, não tiverem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, excetuando-se aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor.

Fonte: adaptado da ABNT-NBR 10.004/2004.

De acordo com a classificação disposto na ABNT-NBR 10.004/2004, o lodo gerado nas estações de tratamento de água é classificado como resíduo pertencente a classe II A – não inerte, em virtude da biodegradabilidade e solubilidade em água, necessitando de tratamento especial.

A Política Nacional de Resíduos Sólidos amparada pela Lei Federal nº 12.305 de 2010 define resíduos sólidos como sendo:

“Material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, a cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólido ou semissólido, bem como gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d’água, ou exijam para isso soluções técnicas ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível” (BRASIL, 2010).

2.3 TRATAMENTO DO LODO DE ETA

No estado do Paraná, a Resolução Nº 21 de 2009, da Secretaria Estadual do Meio Ambiente (SEMA), decretou a obrigatoriedade de implantação de sistema de tratamento e disposição final de resíduos nas ETAs, cuja vazão seja superior a 30 L/s. A mesma resolução estabeleceu prazos para tal implantação, que variam de 5 a 10 anos (dependendo a vazão da ETA), após a resolução ter entrado em vigor (PARANÁ, 2009).

Os lodos gerados nas ETAs se caracterizam por apresentarem umidade superior a 95%, estando quase sempre sob forma de fluido. A redução do volume, é uma das finalidades de se trabalhar com este material, objetivando dispor de forma adequada, reduzindo os custos de transporte e disposição final, bem como os impactos ambientais causados pela disposição irregular (CORDEIRO, 2001).

Na micrografia (Figura 6), observa-se que as elevadas distâncias entre os grãos, favorece a retenção de água para dentro dos poros por difusão. Essa propriedade pode estar diretamente ligada com o aumento do tempo de secagem e redução do volume em termos de partículas sólidas. A Figura 6a, ampliada em 500 vezes, mostrou que as partículas não possuem forma estrutura definida, enquanto a figura 6b mostra a superfície do grânulo ampliada em 3.000 vezes (TARTARI, 2008).

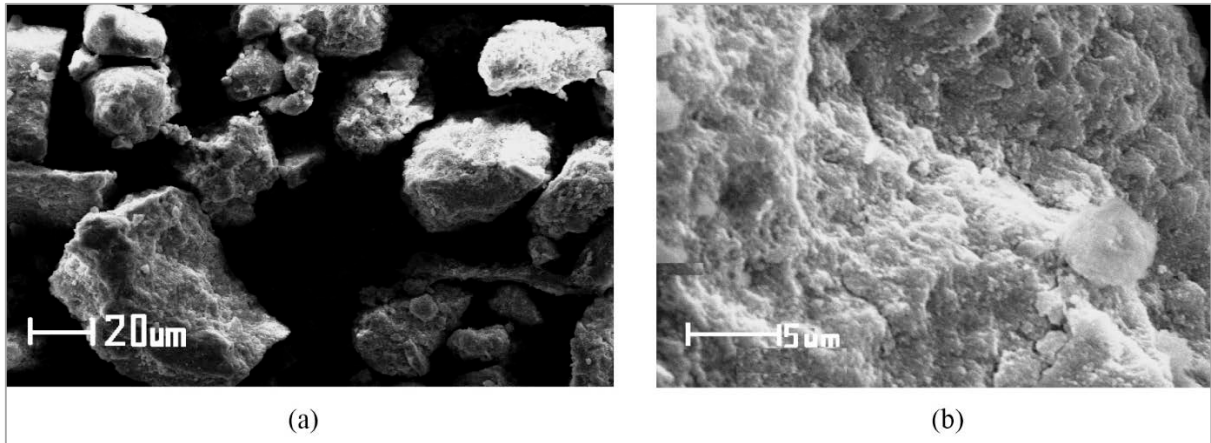


Figura 6 - Micrografias obtidas por MEV.

Fonte: (TARTARI, 2008).

Para Andreoli *et al.* (2006), em geral, devido ao baixo conteúdo orgânico e a contaminação sanitária baixa, não há necessidade de submeter esses lodos as tradicionais etapas de estabilização e eventualmente de higienização comum no tratamento do lodo de esgoto. Sendo assim, somente necessária a remoção de água para redução do volume, facilitando o manejo.

No âmbito social atual, existem diferentes técnicas que são empregadas no intuito de reduzir o volume do lodo através do processo de desidratação deste, o qual consiste na separação sólido-líquido através de fenômenos naturais, ou com o empregado de mecanização.

A Tabela 3 apresenta algumas tecnologias empregadas na remoção da umidade do lodo de ETA.

Tabela 3 - Tecnologias de remoção da umidade do lodo de ETA.

TECNOLOGIA	DESCRIÇÃO
Centrifugação	Processo de separação das fases sólidas e líquidas do lodo, por meio da ação da força centrífuga obtida através do rotacionamento de um compartimento cilíndrico contendo o lodo de ETA em seu interior.
Filtração prensada	O lodo é prensado sobre o meio filtrante através do emprego de pressão por diferentes meios, resultando na separação do líquido do resíduo.
Secagem em Leitos	São leitos rasos, compostos por duas ou três camadas de areia, de diferentes granulometrias com espessura aproximada de 30 cm.

Fonte: Adaptado de Carneiro e Andreoli (2013).

2.3.1 Disposição Final

Com o impacto ambiental da disposição irregular do lodo de ETA cientificamente comprovado, inúmeras alternativas de disposição deste resíduo já foram apresentadas. O emprego na construção civil é uma das alternativas econômicas e tecnicamente viáveis, além de ser ambientalmente vantajosa para a disposição final deste resíduo (BOTERO *et al.*, 2009).

Uma das alternativas que se apresenta como mais viável, compreende a aplicação do lodo gerado nas ETAs em compostos visando à produção de materiais à base de cimento. Visto que o setor da construção civil é o maior consumidor individual de recursos naturais, demandando de 20% a 50% do total de matéria-prima extraída, o emprego do lodo em concreto é uma alternativa para redução dos impactos ambientais (HOPPEN *et al.*, 2005).

Richter (2001), afirma que Ca, Si, Al, e Fe comumente são encontrados no cimento Portland e também no lodo de ETA, sendo assim, podem ser empregados na produção de argamassas, artefatos e blocos de concreto para a construção civil, substituindo, em até determinadas proporções, as matérias primas que são normalmente utilizadas.

2.4 CIMENTO PORTLAND

O cimento Portland foi criado e patenteado pelo construtor inglês Joseph Aspdin em 1824. Naquela época, era comum na Inglaterra construir com pedra da ilha de Portland, localizada ao sul desse país. A invenção de Aspdin era semelhante na cor e na dureza com a pedra de Portland, por isso o construtor resolveu dar o nome da ilha a sua patente (ABCP, 2002).

Segundo Neville e Brooks (2013), cimento Portland é o nome do produto obtido pela mistura de calcário, argila ou outros materiais silicosos, alumina e materiais que contenham óxido de ferro. Essa mistura é queimada à temperatura de clínquerização, resultando dessa queima um material denominado *clínquer* moído.

O cimento Portland é caracterizado como sendo um pó fino com propriedades aglomerantes, aglutinantes ou ligantes, que endurece sob ação da água. Depois de sofrer o processo de endurecimento, mesmo que seja submetido novamente a ação da água, o cimento Portland não se decompõe mais, por isso é considerado um aglomerante hidráulico (ABCP, 2002).

2.4.1 Matéria-prima

O cimento Portland comum é um produto composto de *clínquer* e de sulfato de cálcio. Os cimentos Portland compostos, são produzidos através da adição ou substituição do *clínquer* por filer calcário, materiais pozolânicos (cinza volante, sílica ativa, argila calcinada) e escória de alto forno, sendo que já são utilizadas outras escórias como adição (ISAIA, 2011).

2.4.1.1 *Clínquer*

Isaia (2011) afirma que para a fabricação do *clínquer* Portland, o material de partida deve apresentar em sua composição química: CaO , SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 . Raramente ambos componentes são encontrados em uma única rocha em proporções adequadas, sendo necessário preparar misturas de dois ou mais tipos de rochas.

As matérias-primas comuns do *clínquer* são o calcário (75% a 80%) e a argila (20% a 25%).

O processo de produção do *clínquer*, consiste na mistura em proporções adequadas da rocha calcária com argila, ambas moídas. A mistura formada passa por um forno giratório, cuja temperatura interna chega a alcançar aproximadamente 1.400°C. A elevada temperatura transforma a mistura em um novo material, denominado *clínquer*, que se apresenta sob a forma de pelotas. Na saída do forno o *clínquer*, ainda sob alta temperatura, é bruscamente resfriado, por fim é moído e transformado em pó (ABCP, 2002).

2.4.1.2 Adições minerais

As adições minerais normalmente utilizadas são resíduos provenientes de outras indústrias, que seriam irregularmente descartados em grandes quantidades em áreas impróprias, resultando em contaminação do solo e meios hídricos. As adições mais utilizadas são: escória de alto-forno, materiais pozolânicos e fíler calcário.

Escória de alto-forno:

Segundo a NBR 5.735 de 1991 a escória é o subproduto do tratamento de minério de ferro em alto-forno, obtido sob forma granulada por resfriamento brusco, constituído em sua maior parte de silicatos e aluminossilicatos de cálcio. Para ser enquadrada como adição mineral, a composição química da escória de alto forno deve obedecer à relação disposto na equação 1 (ABNT, 1991).

$$\frac{\text{CaO} + \text{MgO} + \text{Al}_2\text{O}_3}{\text{SiO}_2} > 1 \quad (1)$$

Materiais pozolânicos:

A NBR 5.736 de 1991 explica que os materiais silicosos ou silicoaluminosos, apresentam pouca ou nenhuma atividade aglomerante, porém, quando finamente divididos e no contato com a água, reagem com o hidróxido de cálcio, à temperatura ambiente, para formar compostos com propriedades cimentícias.

Os materiais pozolânicos são divididos em naturais e artificiais. Os primeiros são de origem vulcânica, geralmente ácidos, ou de origem sedimentar. Já os

segundos são materiais provenientes de tratamento térmico ou subprodutos industriais com atividade pozolânica (ABNT, 1991).

Fíler Calcário:

Material proveniente da rocha calcária finamente moída, o qual adicionado ao cimento Portland produz concretos mais trabalháveis, porque os grãos ou partículas desses materiais, ao se alojarem entre os grãos dos demais componentes do concreto desempenham o papel de lubrificante (ISAIA, 2011)

2.4.2 Mecanismo de Hidratação do cimento Portland

A hidratação do cimento Portland é conhecida por ser um fenômeno complexo, embora o amplo padrão de reações e o desenvolvimento microestrutural sejam conhecidos, várias questões importantes permanecem sem resposta, como às interações entre os diferentes minerais de *clínquer* presentes no cimento Portland (GALLUCCI, MATHUR e SCRIVENER, 2009)

A hidratação ocorre durante o período de reação lento e contínuo, responsável por grande parte da redução da porosidade e aumento da resistência, em argamassas e concretos (MOSTAFA e BROWN, 2008).

Metha e Monteiro (1994) destacam dois mecanismos de hidratação do cimento Portland que foram propostos:

- I) Hidratação por dissolução/precipitação: ocorre a dissolução de compostos anidros em seus constituintes iônicos, formação de hidratos na solução e devido à sua baixa solubilidade, uma eventual precipitação de hidratos provenientes da solução supersaturada.
- II) Hidratação Topoquímica ou hidratação no estado sólido do cimento: as reações ocorrem diretamente na superfície dos componentes do cimento anidro, sem que os compostos entrem em solução.

Metha e Monteiro (1994), em estudos sobre pastas de cimento em Microscópio Eletrônico, afirmam que o mecanismo de dissolução-precipitação parece ser dominante nos estágios iniciais de hidratação, sendo que em estágios

posteriores, quando a mobilidade iônica na solução se torna restrita, a hidratação da partícula residual de cimento pode ocorrer por reações no estado sólido.

2.4.2.1 Características dos principais compostos hidratados do cimento Portland

O cimento Portland é constituído por uma mistura heterogênea de vários compostos, com isso, o processo de hidratação consiste em reações simultâneas dos compostos anidros com água. Entretanto essa hidratação não ocorre na mesma proporção para todos os compostos, sendo que os aluminatos hidratam a uma taxa muito mais rápida do que os silicatos (METHA e MONTEIRO, 1994).

Os autores supramencionados, destacam ainda que as características de enrijecimento (perda de consistência) e de endurecimento (solidificação) de uma pasta de cimento Portland, são determinadas pelas reações de hidratação envolvendo os aluminatos. Já os silicatos que compõem cerca de 75% do cimento Portland comum, desempenham um papel importante na determinação das características atribuídas à resistência mecânica.

A tabela 4 apresenta os principais compostos do cimento Portland.

Tabela 4 - Principais fases anidras do cimento Portland

Nome do Composto	Composição em Óxidos	Abreviatura
Silicato tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_3S
Silicato dicálcico	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_2S
Aluminato Tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A
Ferroaluminatotetracálcio	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF

Fonte: Neville e Brooks (2010).

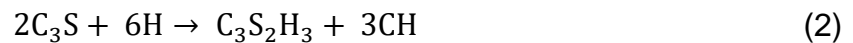
Hidratação dos silicatos:

Os silicatos C_3S e C_2S são os compostos mais importantes, pois são responsáveis pela resistência da pasta de cimento hidratada, sendo que o primeiro hidrata muito mais rápido que o segundo (NEVILLE e BROOKS, 2013).

Nos cimentos comerciais, os silicatos de cálcio contêm pequenas impurezas de óxidos presentes no *clínquer* que exercem um forte efeito nas propriedades dos silicatos hidratados, o C_3S “impuro” é conhecido como alita, e o C_2S “impuro”, como belita (NEVILLE e BROOKS, 2013).

Neville e Brooks (2013) destacam que o produto da hidratação do C_3S é o composto hidratado microcristalino $C_3S_2H_3$, ocorrendo a liberação de cal na forma cristalina $Ca(OH)_2$. O C_2S se comporta de maneira similar, contendo menor teor de cal. Ambos silicatos de cálcio hidratados são conhecidos como C-S-H.

As reações de hidratação do C_3S e C_2S são expressas nas equações 2 e 3 respectivamente.



Se a área específica e, conseqüentemente, a propriedade adesiva da pasta de cimento for resultado da formação de silicato de cálcio hidratado, espera-se que a resistência final de um cimento Portland de alto teor de C_3S seja menor do que um cimento de alto C_2S (METHA e MONTEIRO, 1994).

Hidratação dos Aluminatos:

Neville e Brooks (2013), destacam que a quantidade de aluminato tricálcico (C_3A) na maioria dos cimentos é pequena. Sua estrutura hidratada é uma forma cristalina cúbica circundada pelos silicatos de cálcio hidratado. A equação 4 expressa a reação de hidratação do C_3A .



A reação do C_3A com a água é instantânea. Hidratos cristalinos, como C_3AH_6 , C_4AH_{19} e C_2AH_8 são formados rapidamente, liberando uma grande quantidade de calor de hidratação. O cimento Portland só pode ser empregado na maioria dos propósitos de construção quando a reação rápida de hidratação do C_3A for retardada, o que é geralmente realizada pela adição de gipsita (METHA e MONTEIRO, 1994).

A figura 7 associa a taxa de liberação de calor de hidratação da variação de íons de cálcio em solução, com o tempo de hidratação, em 5 etapas de duas pastas de cimento (WANG *et al.*, 2018).

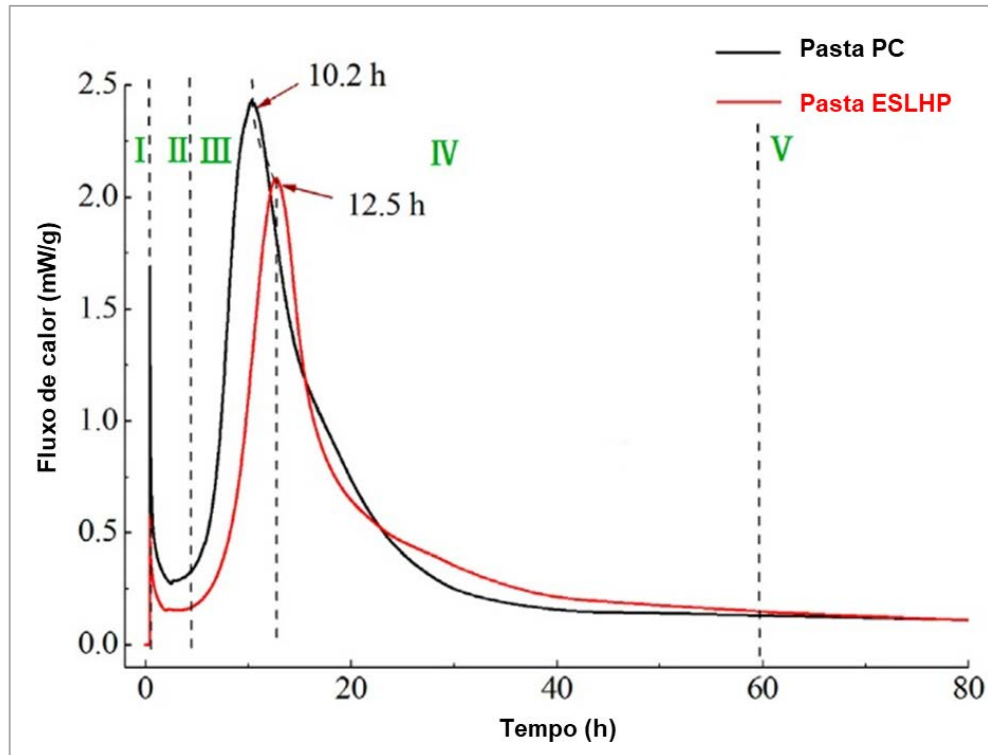


Figura 7 - Curva de liberação de calor de duas pastas de cimento, divididas em 5 períodos.

Fonte: (WANG *et al.*, 2018).

Período inicial ou de pré-indução (I):

O pico inicial é atribuído a uma combinação exotérmica de molhagem das partículas e de reações iniciais de dissolução de sulfatos alcalinos e liberação de íons K^+ , Na^+ e SO_4^{2-} , dissolução do sulfato de cálcio até a saturação, à liberação de íons Ca^{2+} e SO_4^{2-} . A hidratação do sulfato de cálcio hemidratado ($CaSO_4 \cdot 1/2 \cdot H_2O$) para dihidratado ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) também contribui para a ocorrência do primeiro pico de liberação de calor (QUARCIONI, 2008).

Isaia (2011) alerta que a temperatura ambiente afeta a dissolução das fases anidras e conseqüentemente as reações iniciais: o aumento da temperatura favorece a dissolução das fases anidras e diminui a solubilidade da portlandita.

Período de indução (II):

Betioli (2007) descreve que a formação de gel ao redor da partícula parece retardar as reações devido à formação de uma barreira entre as fases anidras e a solução aquosa. O autor destaca, que este período tem duração de aproximadamente 30 minutos a 3 horas, finalizando quando a camada de gel

depositada sobre os grãos de cimento é destruída ou se torna mais permeável à difusão iônica.

Hoppe (2008) destaca também que a formação do gel reduz a solubilização das fases anidras, com conseqüente redução da taxa de calor liberado, entrando o sistema no regime de indução. Após esse intervalo de tempo há a aceleração das reações devido a solubilização da alita (C_3S) com conseqüente precipitação do C-S-H e também da etringita.

Período de aceleração (III):

Predomina o mecanismo de dissolução-precipitação, com conseqüente supersaturação iônica da fase aquosa e rápida formação de C-S-H. Os principais produtos formados são C-S-H e CH [$Ca(OH)_2$], como mostra a figura 8. Este período encerra-se com o surgimento do segundo pico na curva e evidencia o início da desaceleração na geração de calor do sistema (QUARCIONI, 2008).

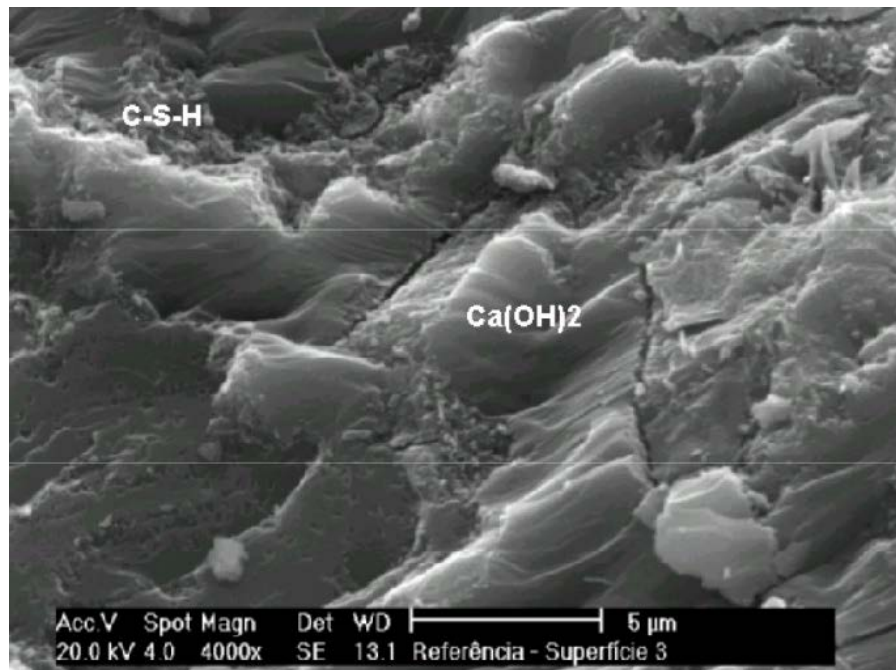


Figura 8 - Região densa, mostrando hidróxido de cálcio compacto com incrustações de CS-H.

Fonte: (SILVA, 2001).

Período de desaceleração (IV):

Neste estágio uma desaceleração na taxa de reação é observada. O C-S-H e o CH continuam a se formar, porém com uma velocidade menor. O mecanismo de reação passa a ser controlado por difusão iônica (BETIOLI, 2007).

O período de desaceleração se inicia quando a contração de íons em solução diminui gradativamente, em decorrência da precipitação dos compostos hidratados que dificultam a solubilização das fases anidras (HOPPE, 2008).

Após alguns dias, de acordo com a relação alumina-sulfato do cimento Portland, a entringita pode se tornar instável e se decompor para formar o monossulfoaluminato hidratado, que tem a forma de placa hexagonal. A morfologia de placa hexagonal também é uma característica dos aluminatos de cálcio hidratados que são formados em pastas de cimentos Portland hidratadas contendo baixo teor de sulfato ou alto teor de C_3A (METHA e MONTEIRO, 1994).

Período final (V):

Os espaços antes ocupados pelo excesso de água de mistura são preenchidos pelos produtos de hidratação e em seguida, as reações de hidratação prosseguem por mecanismo topoquímico (TAYLOR, 1990).

Metha e Monteiro (1994), afirmam que a entringita é geralmente o primeiro hidrato a cristalizar-se, resultado da elevada relação sulfato/aluminato na fase aquosa durante a primeira hora de hidratação. Mais tarde, após o sulfato da solução ter sido consumido, a concentração de aluminatos se eleva novamente devido à renovação do C_3A e C_4AF e a entringita torna-se instável, sendo gradativamente convertida em monossulfato (Figura 9), produto final de hidratação dos cimentos Portland contendo mais de 5% de C_3A .

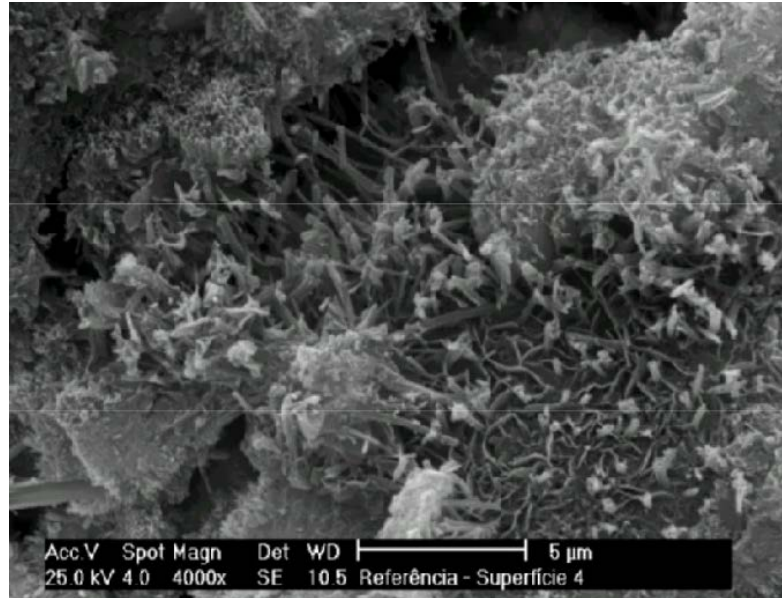


Figura 9 - Cristais de etringita e monosulfoaluminato na pasta de CP.

Fonte: (SILVA, 2001).

Em seu estudo, Hoppe (2008) notou que os compostos anidros do cimento diminuiriam gradativamente durante as reações com a água, destacando-se o ângulo $29,25^\circ 2\theta$ e a faixa entre $32,00^\circ$ e $33,00^\circ 2\theta$, atribuídas à alita (C_3S) e à belita (C_2S), o que é observado no difratograma exposto na figura 10.

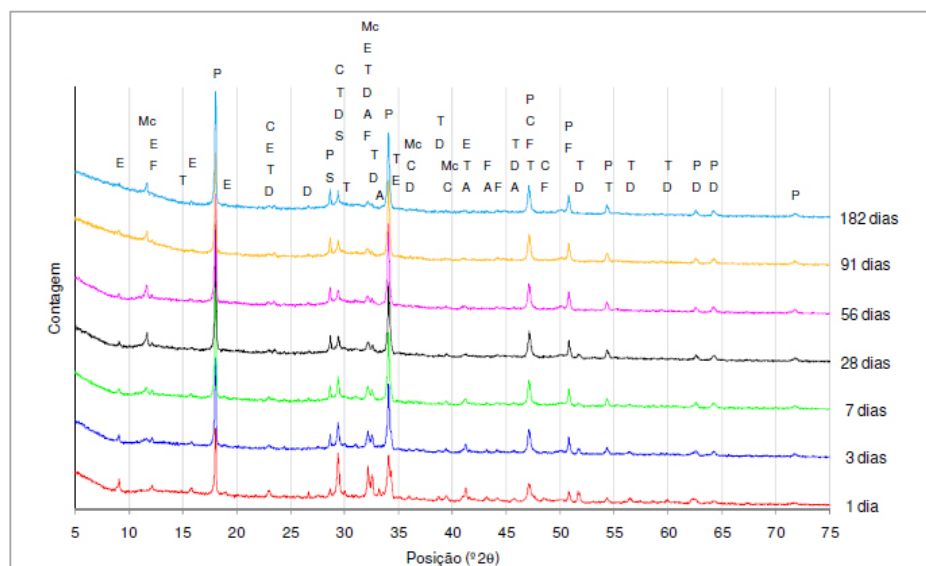


Figura 10 - Evolução da hidratação, por análise de DRX da pasta de CP V – ARI, onde: T – Alita (C_3S); D – Belita (C_2S); A – Aluminato tricálcico (C_3A); F- Ferro aluminato tetra-cálcico (C_4AF); E – Etringita; P – Portlandita; S- Silicato de cálcio hidratado; C – Carbonato de cálcio; Mc – Monocarboaluminato de cálcio hidratado.

Fonte: (HOPPE, 2008).

Hoppe (2008) destaca que no ângulo $32,28^\circ 2\theta$ ocorre um pico referente à etringita, o qual se sobrepõe ao pico da alita, sendo assim, o decréscimo gradual na intensidade do pico nesta região é resultado da hidratação gradual da alita.

No difratograma correspondente a 3 dias, o aluminato tricálcico (C_3A) foi ainda observado, apesar da hidratação ter sido quase que total neste intervalo de tempo. A ausência do pico acima mencionado foi constatada em 7 dias (HOPPE, 2008).

Complementar à análise de difração de raios X, a análise termogravimétrica fornece informações importantes sobre as reações que ocorrem durante o processo de hidratação e formação de fase amorfa (QOKU, BIER e WESTPHAL, 2017).

A figura 11 apresenta as curvas de decomposição dos principais compostos obtidos através de Análise termogravimétrica e termogravimétrica derivada, onde são identificados três períodos de perda de massa.

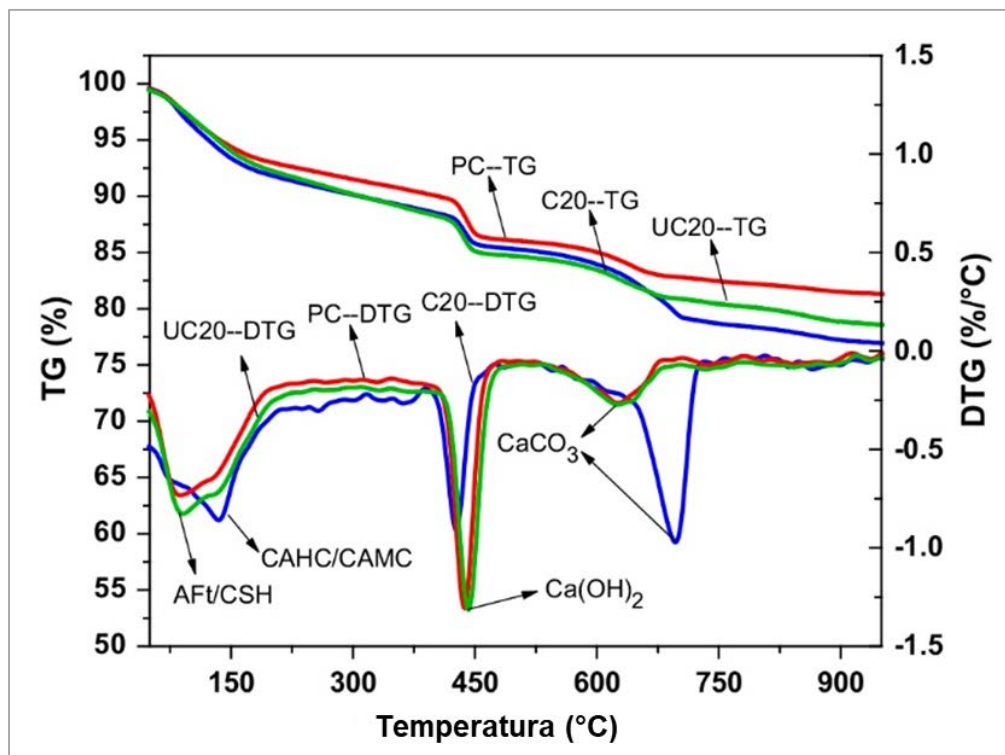


Figura 11 - Curvas TG e DTG de pastas de cimento Portland (PC) e pasta de cimento carbonatada (C20) e não carbonatada (UC20) para a idade de 28 dias.

Fonte: (LU *et al.*, 2018).

Ao analisar as curvas TG é possível visualizar três perdas de massa, sendo a primeira entre 100°C e 200°C associada a desidratação do C-S-H. A segunda perda de massa ocorrida entre 400°C e 450°C corresponde a decomposição do CH. E por

fim a última perda massa ocorrida entre 600°C e 750°C está associada a descarbonatação do CaCO_3 (LU *et al.*, 2018).

As curvas DTG observadas na figura 11 apresentam a derivada da variação da massa em relação a temperatura. Observa-se, que as curvas e os picos são mais definidos em relação as curvas TG, embora, correspondem aos mesmos compostos desidratados apresentados nas curvas TG.

2.4.3 Vantagens e Desvantagens

A produção do cimento Portland a partir de matérias primas naturais e a boa performance na resistência mecânica, são fatores pelos quais esse tipo de cimento é o mais utilizado na construção civil.

Entretanto, para a sua produção, é necessária a queima de grandes quantidades de combustível e decomposição de calcário, sendo que ambas atividades resultam em emissões significativas de dióxido de carbono (CO_2) na atmosfera, causando impacto negativo ao meio ambiente e contribuindo para o aumento do efeito estufa (KONG e SANJAYAN, 2008).

2.4.4 Substituição parcial do cimento Portland por lodo de ETA

Inúmeras pesquisas foram desenvolvidas afim de avaliar o comportamento do lodo na substituição parcial do cimento Portland. Os principais trabalhos utilizando lodo de ETA em substituição ao cimento Portland estão dispostos na tabela 5.

Tabela 5 - Principais trabalhos utilizando lodo de ETA em cimento.

AUTOR/ANO	ESTUDO	TEORES DE SUBSTITUIÇÃO	DE PRINCIPAIS CONCLUSÕES
Alexandre <i>et al.</i> (2018)	Substituição do cimento CPV-ARI por lodo de ETA	➤ 20 %	<ul style="list-style-type: none"> ➤ A substituição do cimento Portland por lodo de ETA reduziu a capacidade de resistência mecânica da amostra; ➤ Fissuras e poros na superfície da amostra contendo 20% de lodo de ETA foram observadas.
Ramirez (2015)	Emprego do Lodo de ETA na elaboração de concreto, com lodo úmido e calcinado à 900°C	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 5, 7 e 10% para lodo úmido; ➤ 5, 10 e 20% para lodo calcinado. 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ O lodo úmido possui influência negativa na resistência à compressão do concreto; ➤ A adição de até 20% de lodo de ETA calcinado, possibilitou um aumento nas propriedades mecânicas do concreto.
Stein (2016)	Substituição parcial do CPV-ARI por lodo de ETA calcinado à 600°C	➤ 5, 10, 15, 20, 25 e 30%	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Hidratação sofre um atraso causado pelo lodo de ETA, maior teor de lodo = maior atraso na hidratação; ➤ Picos de Portlandita menores em quase todas as amostras contendo lodo de ETA em relação ao traço referência, resultado das reações pozolânicas com a sílica presente em maior quantidade no lodo de ETA.
Gastaldini <i>et al.</i> (2015)	Lodo de ETA calcinado em faixas de 400, 500, 600 e 700°C, utilizado como adição mineral ao CPV-ARI	➤ 5, 10, 15, 20, 25 e 30%	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Resistência a compressão: 28 dias <ul style="list-style-type: none"> ▪ Amostra Referência = 45 MPa ▪ Pasta com 25% de lodo de ETA: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Lodo calcinado a 400°C durante 1 hora = 44 MPa; ▪ Lodo calcinado a 600°C durante 1 hora = 54,5 MPa; ▪ Lodo calcinado a 700°C durante 30 min = 50,2 MPa; ▪ Lodo calcinado a 700°C durante 2 horas = 50,7 MPa.
Andrade <i>et al.</i> (2018)	Lodo de ETA como gregado reciclado fino na produção de argamassas	➤ 5 e 10%	<ul style="list-style-type: none"> ➤ A absorção de água pelas argamassas eleva-se com o aumento da adição de lodo de ETA; ➤ As argamassas com teores de lodo de ETA apresentaram resistência mecânica menor em relação as argamassas de referências.

Fonte: Autoria própria.

Através da tabela 5 é possível observar que os trabalhos que utilizaram lodo de ETA calcinado obtiveram melhores resultados de resistência mecânica, ou seja a calcinação do lodo de ETA aumenta o desempenho de resistência das amostras. A utilização do resíduo sem ser calcinado nitidamente reduz a capacidade de resistência mecânica das amostras.

Andrade *et al.* (2018) utilizaram o lodo de ETA como agregado reciclado fino na produção de argamassas, avaliando o desempenho do produto obtido. Primeiramente o lodo passou por secagem a 110°C pelo período de 24 horas e após foi triturado e calcinado a 600°C pelo período de 1 hora. Os autores observaram que a absorção de água pelas argamassas aumentou com o aumento da adição de lodo de ETA. Em relação à resistência mecânica, as argamassas com teores de lodo de ETA apresentaram resistência mecânica menor em relação as argamassas de referências.

Stein (2016) em seu estudo substituiu parcialmente o cimento Portland tipo V – ARI por lodo de ETA. Inicialmente o lodo foi calcinado por 1 hora até alcançar a temperatura de 600°C e após moído por 2 horas. O processo de hidratação sofre um atraso causado pelo lodo de ETA (Figura 12). Quanto maior o teor de substituição do cimento por lodo, mais acentuado é este evento, o qual pode ser explicado devido ao efeito de diluição (STEIN, 2016).

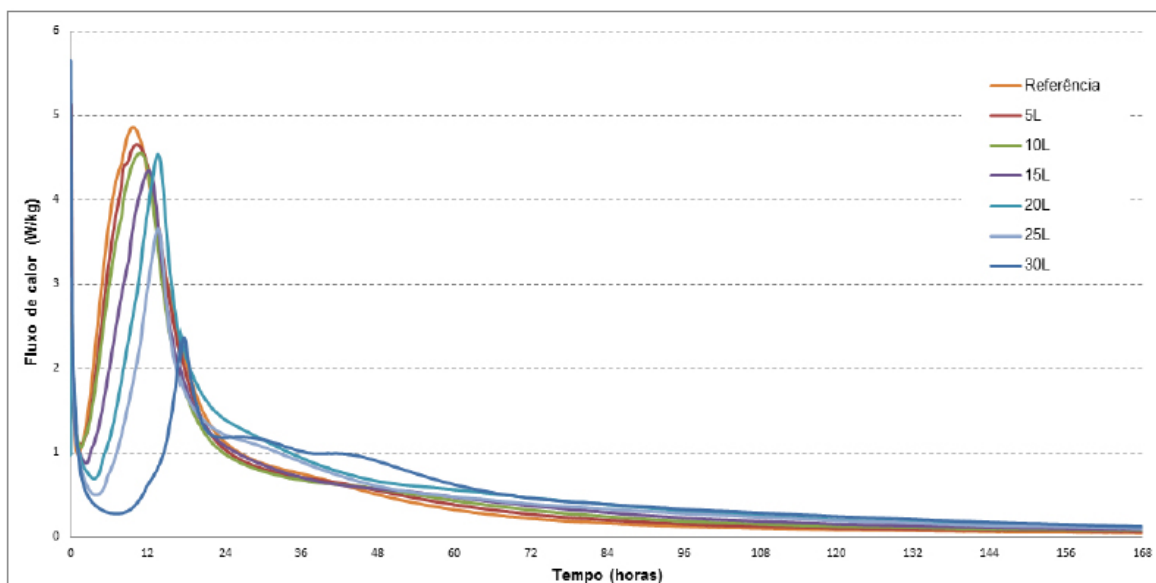


Figura 12 - Curva do fluxo de calor de hidratação das pastas após o período de 168 horas.

Fonte: STEIN (2016).

Gastaldini *et al.* (2015) empregaram cinza de lodo de tratamento de água como adição mineral ao cimento Portland de alta resistência inicial. Primeiramente o lodo foi secado a temperatura de 105°C e após calcinado em faixas de 400, 500, 600 e 700°C.

Os resultados obtidos, mostraram que na pasta que foi substituído 25% de cimento Portland por lodo calcinado a 400°C pelo período de 1 hora, apresenta resistência de 44 MPa para idade de 28 dias, enquanto a amostra referência apresenta 45 MPa. A amostra contendo o mesmo teor de substituição, mas com lodo calcinado a 600°C durante 1 hora, apresentou resistência de 54,5 MPa, valor maior aos valores encontrados obtidos para a amostra com lodo calcinado a 700°C durante 30 minutos e durante 2 horas, 50,2 e 50,7 MPa, respectivamente (GASTALDINI *et al.*, 2015).

Alexandre *et al.* (2018), avaliaram o lodo de ETA para substituição parcial do cimento Portland. Inicialmente o lodo foi secado pelo período de 24 horas a 105°C e após triturado até passar em peneira com abertura de 150 mm. No teste de resistência mecânica (Figura 13) é possível observar que a substituição do cimento Portland por lodo de ETA reduziu a capacidade de resistência mecânica para a idade de 7 dias. Com o aumento da idade, ambas amostras apresentaram aumento na sua resistência.

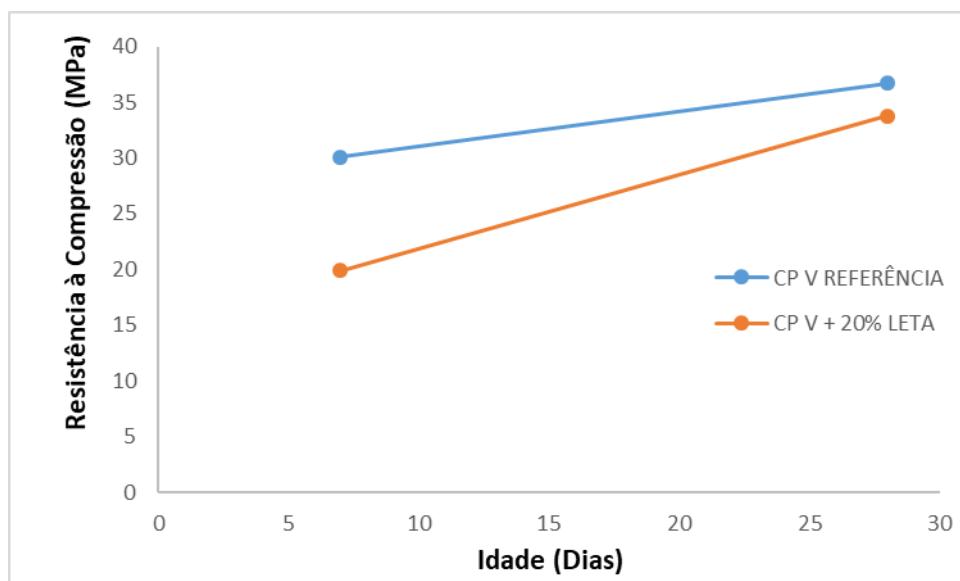


Figura 13 - Variação da resistência mecânica das amostras.

Fonte: (ALEXANDRE *et al.*, 2018)

Alexandre *et al.* (2018), ao analisarem a micrografia da amostra contendo 20% de lodo de ETA (Figura 14), notaram algumas fissuras e poros na superfície da amostra, de acordo com os autores, isso pode ocorrer pela dificuldade de homogeneização dos compostos lodo com os do cimento.

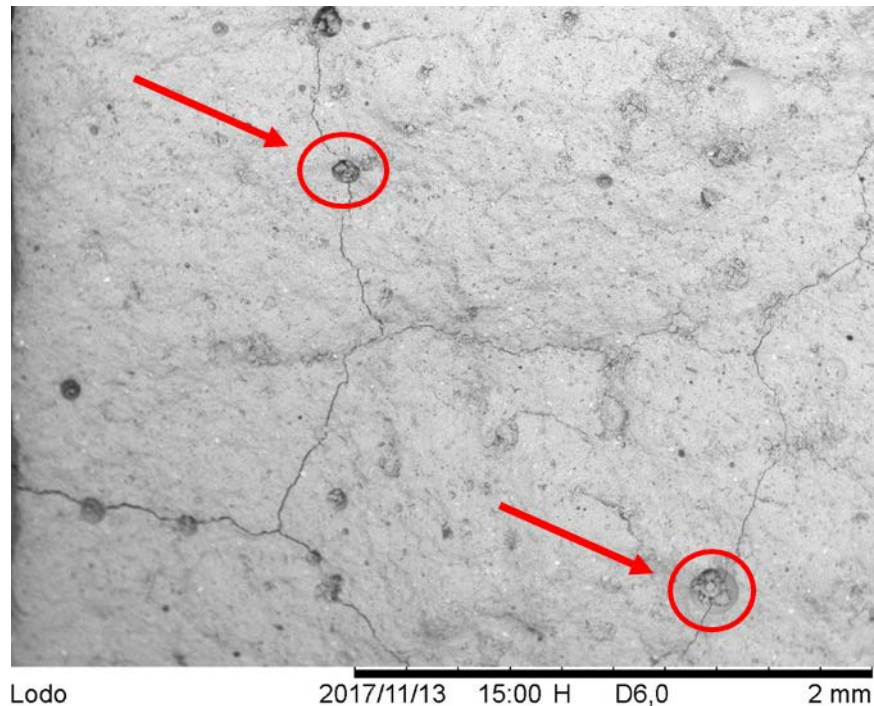


Figura 14 - Micrografia da pasta com teor de 20% de lodo de ETA.

Fonte: (ALEXANDRE *et al.*, 2018)

Ramirez (2015), em seu estudo avaliou o emprego do lodo de ETA no concreto. Foram produzidos concretos a partir de lodo úmido (coletado na unidade de filtração do lodo) e concretos a partir de lodo calcinado a 900°C. O autor observou que o lodo úmido possui influência negativa na resistência à compressão do concreto (Figura 15), sendo que quanto maior o teor de substituição menor a resistência atingida.

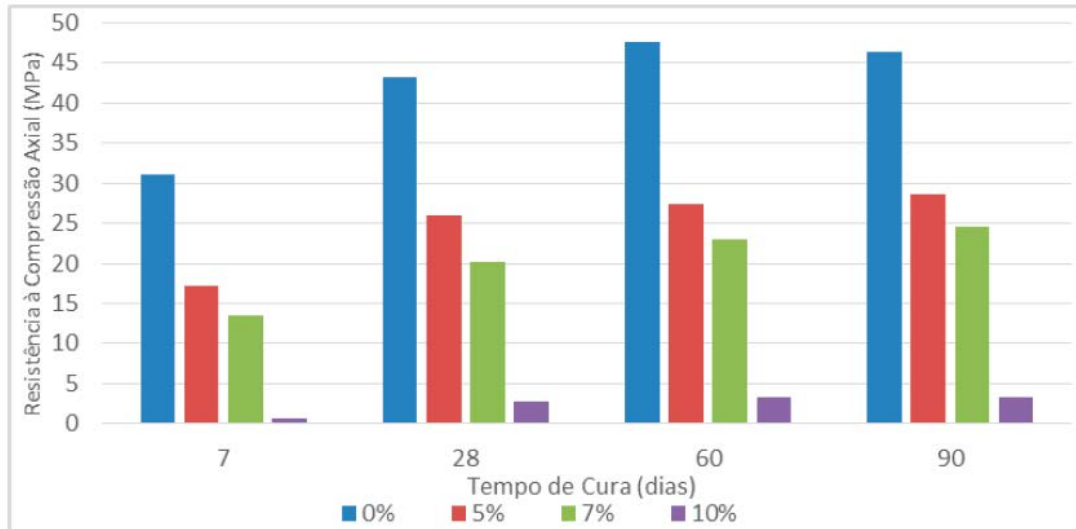


Figura 15 - Resistência mecânica do concreto com lodo de ETA úmido.

Fonte: (RAMIREZ, 2015).

Ao contrário do lodo úmido, Ramirez (2015) percebeu que a adição de até 20% de lodo de ETA calcinado, possibilita um aumento nas propriedades mecânicas do concreto (Figura 16), sendo assim, o autor afirma que o concreto produzido com lodo de ETA pode ser empregado em concretos estruturais, ressaltando a necessidade da realização de estudos de durabilidade.

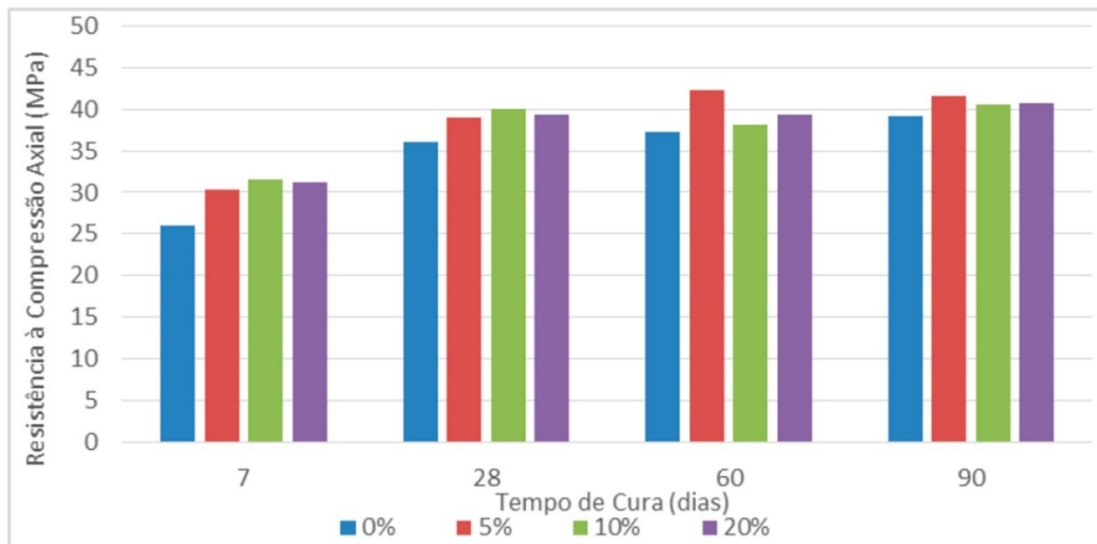


Figura 16 - Resistência mecânica do concreto com lodo de ETA calcinado.

Fonte: (RAMIREZ, 2015).

2.4.5 Aditivos químicos nos cimentos

Existem diferentes tipos de aditivos químicos que são adicionados ao cimento, à argamassa ou ao concreto, para modificar uma ou mais propriedades das misturas cimentícias. Estes produtos são classificados de acordo com a finalidade que são empregados (ISAIA, 2011). Entre os diferentes tipos de aditivos encontram-se os redutores de água.

2.4.5.1 Aditivos Redutores de Água

Os aditivos redutores de água são um material usualmente empregado no concreto, de acordo com Isaia (2011), aditivos redutores de água são conhecidos também como plastificantes ou superplastificante, este último subdividido em tipo I e tipo II. Essa classificação está diretamente ligada à capacidade da redução da quantidade de água de amassamento para uma determinada consistência, enquanto o primeiro permite uma redução de pelo menos 5% de água, o segundo pode reduzir a água da mistura em até 40%.

Os aditivos superplastificantes, também são chamados de aditivos redutores de água de alta eficiência, uma vez que são capazes de reduzir o teor de água de três a quatro vezes, em um dado traço de concreto, quando comparados a aditivos redutores de água normais (METHA e MONTEIRO, 1994).

Além de possibilitar a redução da relação água/cimento para uma dada consistência da mistura, a adição de aditivo redutor de água pode conferir aumento de fluidez se a quantidade original de água da mistura for mantida (ISAIA, 2011).

A NBR 11.768 de 2011, define que o aditivo redutor de água classificado como plastificante, é aquele que sem modificar a consistência do concreto no estado fresco, permite a redução do volume de água de um concreto ou que sem alterar o volume de água, modifica a consistência do concreto, aumentando o abatimento e a fluidez, ou que, produz esses dois efeitos simultaneamente.

Os aditivos superplastificantes são similares aos plastificantes, diferenciando-se dos mesmos somente pela capacidade de redução de água. Ambos aditivos não devem interferir no tempo de pega das misturas (ABNT, 2011).

2.4.5.2 Modo de Ação

Isaia (2011), afirma que imediatamente após o cimento entrar em contato com a água, ocorre as reações de hidratação. A função dos aditivos redutores de água é dispersar as partículas de cimento em hidratação, liberando a água presa entre os grãos de cimento, aumentando desta forma a fluidez da mistura.

Neville e Brooks (2013) destacam a presença de agentes tensoativos nos aditivos redutores de água, sendo que estes agentes, além de apresentarem afinidade com as partículas de cimento, concedem cargas negativas, repelindo as partículas e estabilizando a dispersão. Outro resultado desta ação, é o impedimento da aderência de bolhas de ar ao cimento, resultando na agitação das partículas, e como a água não sofre restrições, passa a lubrificar a mistura, aumentando a sua trabalhabilidade.

O cimento ao entrar em contato com um pequeno volume de água, na ausência de tensoativos, forma um sistema não bem disperso, resultado da elevada tensão superficial da água e há tendência de aglomeração e formação de flocos pelas partículas do cimento (NEVILLE; BROOKS, 2013). A figura 17 demonstra os flocos formados antes e depois da adição de aditivo redutor de água.

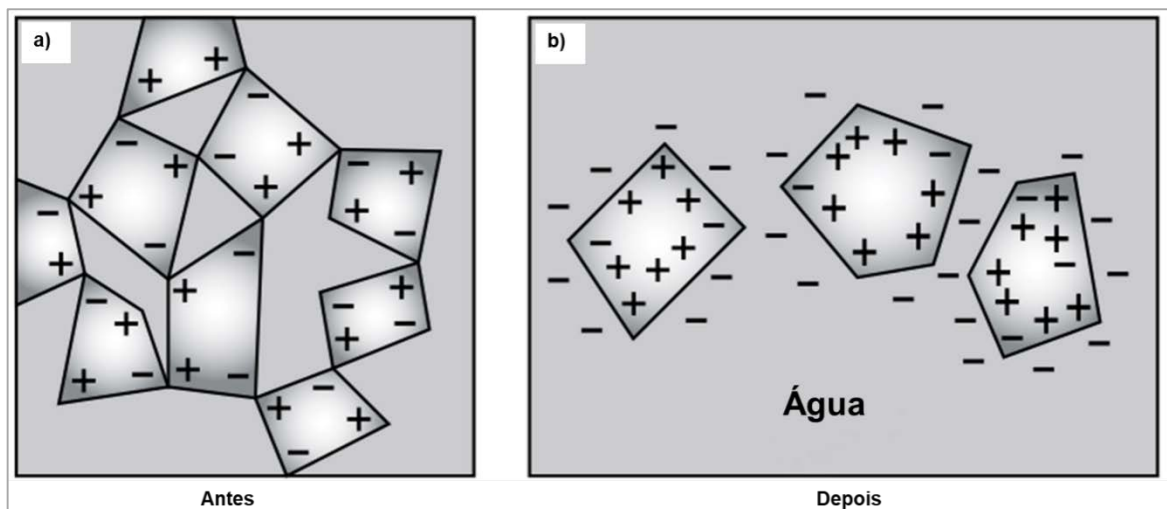


Figura 17 - Ação do aditivo redutor de água.

Fonte: (METHA e MONTEIRO, 1994).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 MATERIAIS

Os materiais empregados no presente estudo foram o lodo de ETA, o qual foi coletado na unidade de decantação de uma ETA localizada no Estado do Paraná, cimento CPV-ARI e aditivo redutor de água.

3.1.1 Lodo de ETA e cimento CP V - ARI

A composição química do lodo de ETA foi caracterizada através de análise de fluorescência de raios X (FRX), já os dados da caracterização do cimento Portland CPV-ARI foram obtidos junto ao fabricante (Tabela 6).

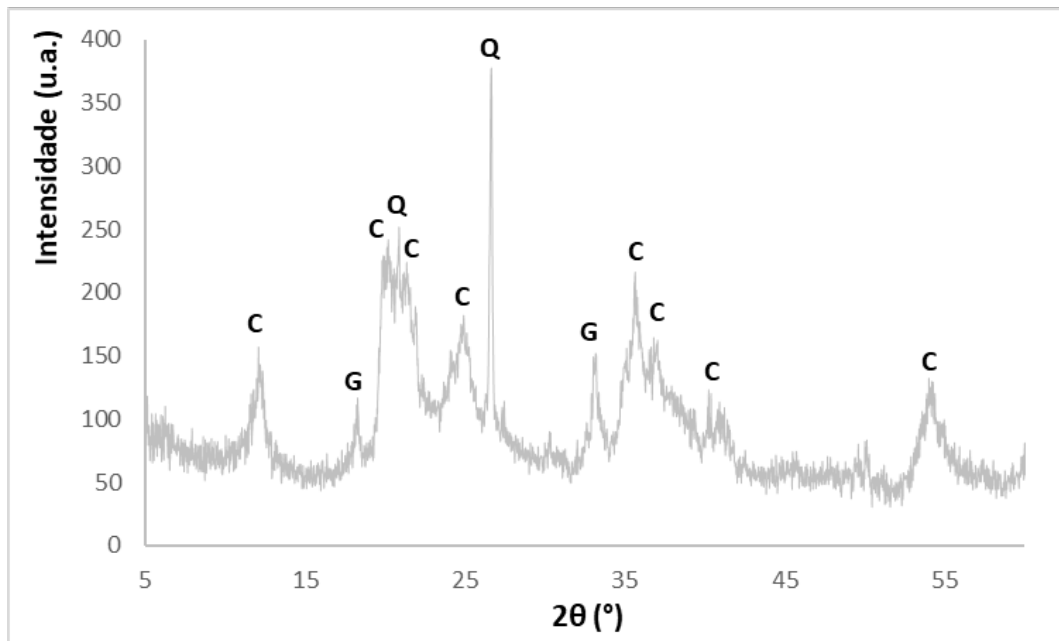
Nota-se que os principais compostos químicos do cimento Portland também são encontrados no lodo de ETA. O teor de SiO_2 é semelhante em ambos materiais, já o Al_2O_3 e o Fe_2O_3 aparecem em maior concentração no lodo. Por outro lado, o CaO é o composto químico de maior concentração no cimento, com mais de 50%, enquanto no lodo o mesmo composto apresenta 0,60% da composição.

Tabela 6 - Composição química, finura e massa específica dos materiais.

Elemento	LETA (%)	CPV-ARI (%)
Al₂O₃	25,80	6,45
SiO₂	24,20	22,38
Fe₂O₃	19,30	3,41
TiO₂	2,90	-
CaO	0,60	54,75
P₂O₅	0,40	-
MgO	0,40	4,66
SO₃	0,30	2,68
MnO	0,30	-
K₂O	0,20	-
V₂O₅	0,10	-
ZrO₂	0,10	-
Na₂O	< 0,1	-
CuO	< 0,1	-
Cl	< 0,1	-
ZnO	< 0,1	-
Perda ao Fogo	25,22	-
ρ(g/cm³)	2,1	3,12
(cm²/g)	12.820,40	4.743,00

Fonte: Autoria própria e Itambé.

Através da técnica de difração de raios X (DRX), obteve-se o difratograma (figura 18) do lodo de ETA empregado no trabalho. Nota-se que os picos de difração característicos das fases cristalinas referentes a caulinita ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), Quartzo (SiO_2) e gibsita ($\text{Al}(\text{OH})_3$) são evidenciados no difratograma.



**Figura 18 - Difratograma do lodo de ETA, onde: Q – Quartzo, G – Gipsita e C – Caulinita.
Fonte: Autoria própria.**

3.1.2 Aditivo redutor de água

Na elaboração das pastas, foi empregado aditivo redutor de água (superplastificante *Tec Flow 7030*), o qual é livre da presença de cloretos, produzido pela empresa Grace e de acordo com a ficha técnica fornecida pelo fabricante, atende à ABNT NBR 11.768 – Aditivos químicos para concreto de cimento Portland – Requisitos (2011).

O produto é caracterizado como sendo um líquido de cor alaranjada com massa específica de 1,061 g/cm³, resultado obtido com ensaio de acordo com a ABNT NBR 10.908 – Aditivos para argamassa e concreto – Ensaio de caracterização (2008).

3.2 MÉTODOS

3.2.1 Preparo do lodo de ETA

O lodo de ETA *in natura* (Figura 19) foi coletado na unidade de decantação de uma ETA localizada no Estado do Paraná. Primeiramente o material foi homogeneizado e submetido ao processo de secagem em estufa por 48 horas a uma temperatura controlada de 105°C (Figura 20). Após, utilizou-se o moinho de

bolas (Figura 21) por aproximadamente 12 horas para moer homogeneamente ambos os materiais. Após este período no moinho ainda necessitou utilizar o almofariz e pistilo (Figura 22) para finalizar a moagem do material.



Figura 19 - Homogeneização do lodo in natura.

Fonte: Autoria própria.



Figura 20 - Lodo de ETA após o processo de secagem.

Fonte: Autoria Própria.



Figura 21 - Moinho de Bolas utilizado no processo de moagem dos materiais.

Fonte: Autoria própria.



Figura 22 - Almofariz e pistilo utilizados na complementação da moagem do material.

Fonte: Autoria própria.

3.2.2 Elaboração das Pastas

O cimento Portland tipo CP V-ARI, foi substituído parcialmente por lodo de ETA, foram empregadas cinco composições, variando o teor de lodo de ETA, de 0, 10 e 20%. Neste cimento foi empregado 0,3% de aditivo superplastificante mantendo o mesmo volume de água, objetivando dispersar partículas aglomeradas quando no contato de água. As proporções dos materiais estão dispostas na tabela 7.

Tabela 7 - Proporção dos materiais em massa utilizados em cada pasta.

Amostra	CPV	LETA	Aditivo	Água
REF.	100	0	0,0	40
+ 10% LETA	90	10	0,3	40
+ 10% LETA	90	10	0,0	40
+ 20% LETA	80	20	0,3	40
+ 20% LETA	80	20	0,0	40

Fonte: Autoria própria

3.2.2.1 Preparo das Pastas

A metodologia de preparo das pastas foi adaptada da normativa NBR 7.215/96, sendo apresentado na tabela 8 as etapas realizadas.

Tabela 8 - Etapas do preparo das pastas.

ETAPA	PROCEDIMENTO
1	Pesagem dos materiais, cimento CP e lodo de ETA, nas proporções estabelecidas pela tabela 7.
2	Os materiais foram adicionados gradualmente em béquer de vidro contendo água, pelo período de 30 s, sob homogeneização manual com auxílio de bastão de vidro de forma lenta. Após a adição de todos os materiais, a homogeneização dos materiais ocorre sob velocidade alta por 30 s.
3	A homogeneização foi interrompida por 90 s, deixando a pasta em repouso, e o béquer coberto com pano úmido. Após a homogeneização ocorre sob velocidade alta pelo período de 60 s.
4	As amostras foram acondicionadas em moldes cúbicos com dimensões de 3x3x3cm (Figura 23), adensadas, cobertas com plástico e mantidas em câmara úmida, sob temperatura controlada de 23 °C, sendo desmoldadas após a idade de 24 horas. Após o desmolde os corpos de prova foram acondicionados em potes, mantidos em cura com umidade de 95% durante 7 e 28 dias, sob temperatura controlada de 23°C.

Fonte: Autoria própria



Figura 23 - Molde utilizado na elaboração das pastas.

Fonte: Autoria própria.

3.2.3 Avaliação da resistência mecânica

Ao atingirem as idades de 7 e 28 dias, as amostras foram submetidas à avaliação de resistência mecânica. Para a realização deste teste, se utilizou a prensa da marca EMIC (DL-30000, EMIC, Brasil), disponível no laboratório de materiais do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná *campus* Pato Branco – PR.

Os testes foram realizados em triplicata para se obter uma média de valor, sendo utilizado o método de compressão cúbico 3x3x3cm, como mostra a figura 24.



Figura 24 - Equipamento utilizado no ensaio de resistência mecânica.

Fonte: Autoria própria.

Finalizado o teste de resistência mecânica, as amostras foram fragmentadas e submersas em solução de acetona P.A., pelo período de duas horas. Após este período as mesmas foram filtradas, através de bomba a vácuo e secas em estufa com temperatura de 50°C por 30 min, para total evaporação do solvente volátil.

O material foi dividido em duas porções, a primeira em fragmentos foi acondicionada em recipiente lacrado e destinada a análise de MEV, a segunda porção do material foi triturada manualmente com o auxílio de almofariz e pistilo, e, peneirada em peneira com abertura de 0,150 mm. As amostras em pó foram utilizadas para as análises de DRX, TG e DTG.

3.2.4 Estudo das micro-estruturas da pasta

O estudo microestrutural das pastas objetivou avaliar a influência da adição do lodo de ETA na formação de compostos hidratados dos cimentos estudados. Para a avaliação, foram utilizadas as técnicas de Difração de Raios-X (DRX), Análise Termogravimétrica (TG/DTG) e a Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) para as idades de 7 e 28 dias.

3.2.4.1 Difração de Raios X(DRX)

A Difração de Raios-X (DRX) é utilizada objetivando caracterizar materiais cristalinos, os quais apresentam regularidade em sua estrutura, um padrão de difração que é único para cada substância. Materiais Cristalinos dispõem uma ordem de arranjo de átomos ou moléculas que se repetem em três dimensões e são denominadas de células unitárias. (MARTINS, 2009).

A DRX transcorre quando um material cristalino é focalizado por um feixe de raios X em um ângulo θ , parcela dessa radiação é espalhada na superfície atômica, sendo que parte penetra na segunda camada de átomos e o fenômeno volta acontecer, penetrando na terceira camada de radiação não-espalhada. Se faz necessário que a distância interplanar seja aproximadamente igual ao comprimento de onda da radiação e que os centros espalhadores estejam em um arranjo espacial com alta regularidade. (SKOOG; HOLLER; NIEMAN, 2002; JENKINS, 1999 *apud* MARTINS, 2009).

Procedimento Experimental:

A difração de raios X (DRX) foi realizada na Central de Análises, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná *campus* Pato Branco – PR (figura 12), com os seguintes parâmetros de análises: radiação Cu K α 1,54 Å; faixa de 5 a 60°; passo de 0,05°/s

3.2.4.2 *Análise Termogravimétrica (TG/DTG)*

A análise termogravimétrica (TG) consiste no estudo da variação de massa de uma amostra que está sendo analisada, resultado de uma transformação física (sublimação, evaporação, condensação) ou química (degradação, decomposição, oxidação) em função do tempo ou da temperatura. (MOTHÉ e AZEVEDO, 2009).

Mothé e Azevedo (2009), afirmam que a exposição à altas temperaturas podem, algumas vezes, variar a estrutura química e por consequência as propriedades físicas dos materiais.

Já na análise termogravimétrica derivada (DTG), a derivada da variação da massa em relação ao tempo (dm/dt) é registrada em função da temperatura ou tempo. Assim sendo, neste método obtêm-se curvas que equivalem à derivada primeira da curva TG e nos quais os degraus são transfigurados por picos, sendo que estes, balizam áreas proporcionais às alterações de massa sofridas pela amostra (IONASHIRO; GIOLITO, 2004).

Procedimento experimental:

As análises térmicas foram realizadas na Central de Análises da Universidade Tecnológica Federal do Paraná *campus* Pato Branco. O equipamento utilizado para as análises de DTG e TG é da marca *TA Instruments*, modelo SDT Q600, sob as seguintes condições de análise: rampa de aquecimento de 10°C/min; na faixa de 30°C a 1000°C; atmosfera de gás inerte de N₂ com vazão de 100mL/min.

3.2.4.3 *Calorimetria de condução isotérmica*

As reações de hidratação do cimento são exotérmicas. A medida do calor de hidratação pode fornecer informações sobre as reações químicas que ocorrem na matriz sólida, durante a hidratação do cimento, incluindo, por exemplo, a influência do efeito de adições. Na calorimetria de condução isotérmica o calor de hidratação

do cimento é medido diretamente através do monitoramento do fluxo de calor da amostra, quando a amostra e o ambiente circundante são mantidos em condições aproximadamente isotérmicas. (RUBERT, 2015; MOSTAFA e BROWN, 2005).

Procedimento Experimental:

Os ensaios de calorimetria de condução foram realizados através do equipamento da marca Calmetrix, modelo I-cal 2000 HPC, disponível no laboratório de materiais do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná *campus* Pato Branco – PR (figura 25).



Figura 25 - Equipamento de calorimetria.

Fonte: Autoria própria.

As pastas foram produzidas com base na metodologia apresentada na tabela 7, até a etapa 3, em massa de 50 g de material seco. As leituras foram realizadas em uma temperatura controlada de 23°C pelo período de 168 horas, correspondendo a sete dias de hidratação.

3.2.4.4 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) é uma técnica empregada para observação e análise das características micro-estruturais de materiais sólidos. Dedavid, Gomes e Machado (2007) explicam que o funcionamento do MEV consiste na incidência de um feixe de elétrons a fim de explorar a superfície da amostra,

ponto a ponto, transmitindo o sinal do detector a uma tela catódica cuja varredura está sincronizada com aquele feixe de elétrons incidente.

O MEV exibe intervalo bem amplo na sua escala de observação, alternando da ordem de grandeza de milímetros (mm) ao nanômetro (nm), possibilitando assim, analisar estruturas de uma planta por exemplo. Associando a Espectrometria de Energia Dispersiva de Raios-X (EDX) com a Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), obtêm-se além da determinação qualitativa, a determinação quantitativa da composição de uma amostra. (KLAUSS, 2003 *apud* YOTSUMOTO NETO, 2013).

Procedimento Experimental:

A análise de microscopia eletrônica de varredura foi realizada na Central de Análises da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) *campus* Pato Branco/PR, sob as seguintes condições: corrente de 15 kV; amostras recobertas com cobre; com aumentos entre 50 a 2.000 vezes.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O estudo em pasta, objetivou analisar e investigar a microestrutura do cimento produzido com a substituição parcial do cimento CPV – ARI por lodo de ETA, através de técnicas de DRX, análise térmica e MEV. Além da microestrutura, também foram avaliados a resistência mecânica, bem como, o calor liberado durante a hidratação do novo cimento.

4.1 AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA MECÂNICA

Na substituição parcial do cimento Portland tipo V de alta resistência inicial (CPV-ARI) por lodo de ETA, foram elaboradas três amostras, contendo 100 e 0%, 90 e 10% e 80 e 20%, de CPV e lodo de ETA respectivamente, sendo que as duas últimas foram replicadas adicionando aditivo redutor de água (superplastificante tipo II), em 0,3% no cimento. A figura 26 apresenta a resistência mecânica das amostras para as idades de 7 e 28 dias.

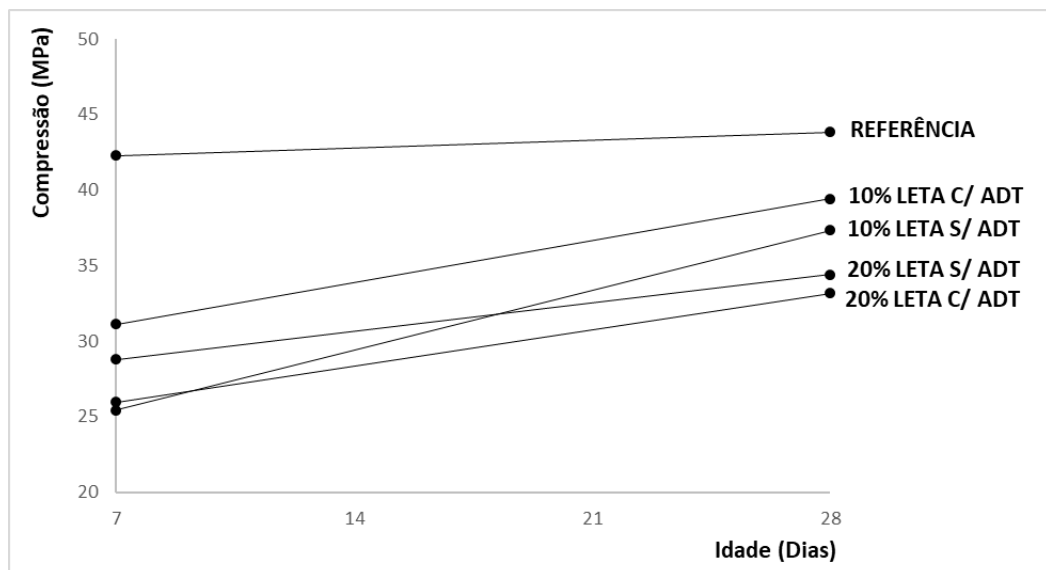


Figura 26 - Resultado dos testes de resistência mecânica das pastas.

Fonte: Autoria Própria.

A amostra referência, apresentou resultados de 42,28 e 43,82 MPa para as idades de 7 e 28 dias respectivamente.

Na substituição do CPV por 10% de lodo de ETA os resultados obtidos foram de 25,4 e 37,33 MPa para as idades de 7 e 28 dias. Com acréscimo de aditivo, o

mesmo traço apresentou valores de 31,12 e 39,4 MPa para as idades de 7 e 28 dias, valores maiores do que na amostra sem aditivo.

Na substituição do CPV por 20% de lodo de ETA os resultados obtidos foram de 28,4 e 34,42 MPa para as idades de 7 e 28 dias. Com acréscimo de aditivo, o mesmo traço apresentou valores de 25,95 e 33,17 MPa para as idades de 7 e 28 dias, valores menores do que na amostra sem aditivo.

O emprego do aditivo melhorou a capacidade da resistência mecânica para a amostra contendo teor de 10% de lodo de ETA, entretanto para a amostra com teor de 20% de lodo de ETA o acréscimo de aditivo não alcançou o resultado esperado, já que a amostra sem aditivo apresentou maior capacidade de resistência à compressão quando comparada com a amostra contendo aditivo.

Os resultados obtidos, mostram que com a adição do resíduo, a resistência mecânica diminuiu. O mesmo foi observado por Ramirez (2015) e Andrade *et al.* (2018), sendo que a adição de lodo *in natura* reduziu a capacidade de resistência mecânica das amostras.

4.2 ESTUDO MICROESTRUTURAL DA PASTA DE CIMENTO

4.2.1 Avaliação do Calor de Hidratação

Através do ensaio de calorimetria de condução, o qual apresenta a taxa de calor liberado em relação ao tempo, é possível visualizar os diferentes períodos da hidratação da pasta de cimento (Figura 27).

Nota-se, que a o primeiro pico de hidratação para as pastas ocorre em intensidades diferentes, entretanto em períodos semelhantes, exceto para as pastas com adição de 10% de lodo de ETA com e sem aditivo, onde os picos se assemelham em ambas unidades de medida.

Chama a atenção a rápida hidratação da pasta contendo 20% de lodo de ETA sem aditivo em comparação à pasta contendo a mesma composição, apenas adicionando aditivo a ela. Enquanto a primeira teve seu pico máximo de hidratação em aproximadamente 2 horas, a segunda apresentou hidratação máxima em 8 horas.

As pastas com adição de 10% de lodo de ETA com e sem acréscimo de aditivo, apresentaram hidratação máxima em aproximadamente 10 horas, enquanto

a pasta referência, teve sua hidratação máxima registrada em aproximadamente 16 horas.

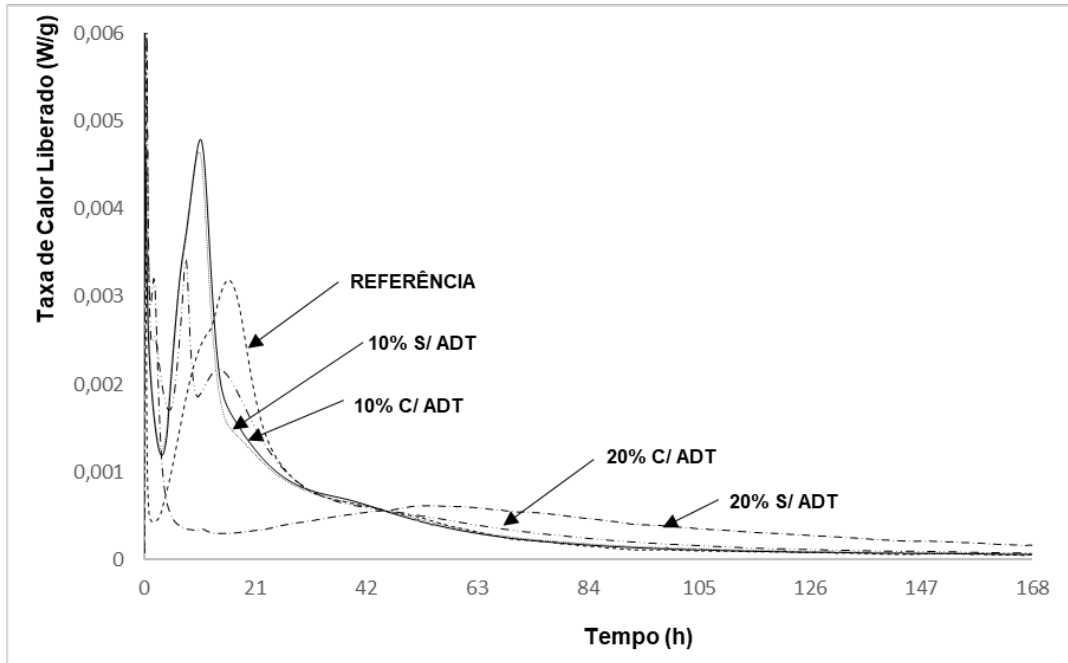


Figura 27- Taxa de calor liberado das pastas para o tempo de 168 horas.

Fonte: Autoria própria.

A figura 28 evidência os picos da taxa de calor liberado durante a hidratação das pastas no período de 42 horas.

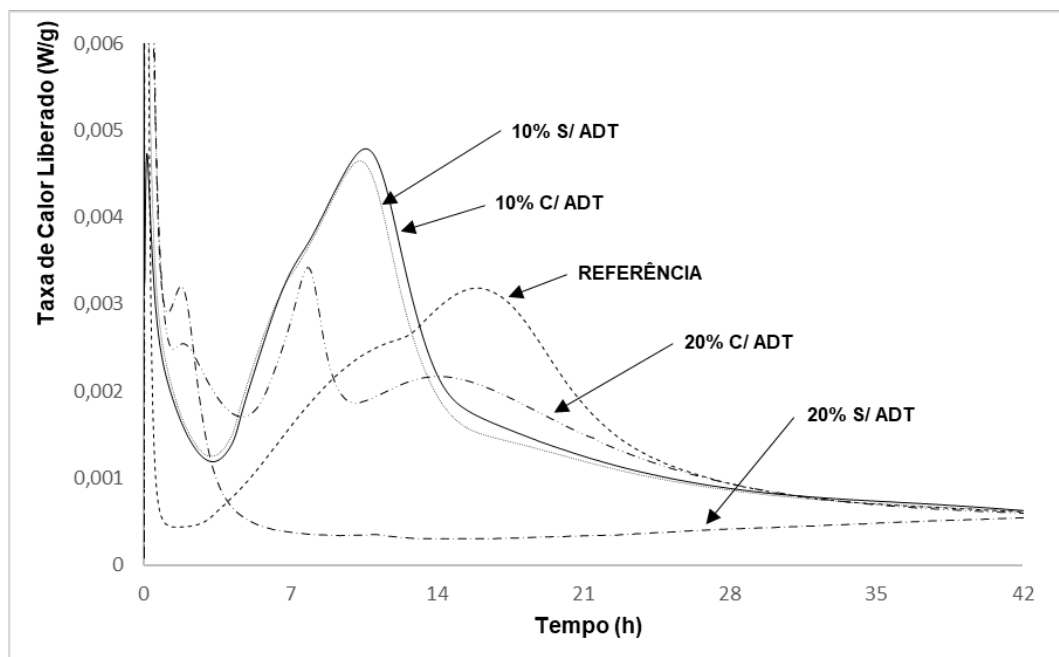


Figura 28 - Taxa de calor liberado das pastas para o tempo de 42 horas.

Fonte: Autoria Própria

A figura 29 apresenta as curvas do calor total liberado durante a hidratação das pastas após o período de 168 horas. É possível analisar que apenas a pasta com adição de 20% de lodo de ETA (20% S/ ADT) apresentou calor de hidratação menor do que a pasta referência.

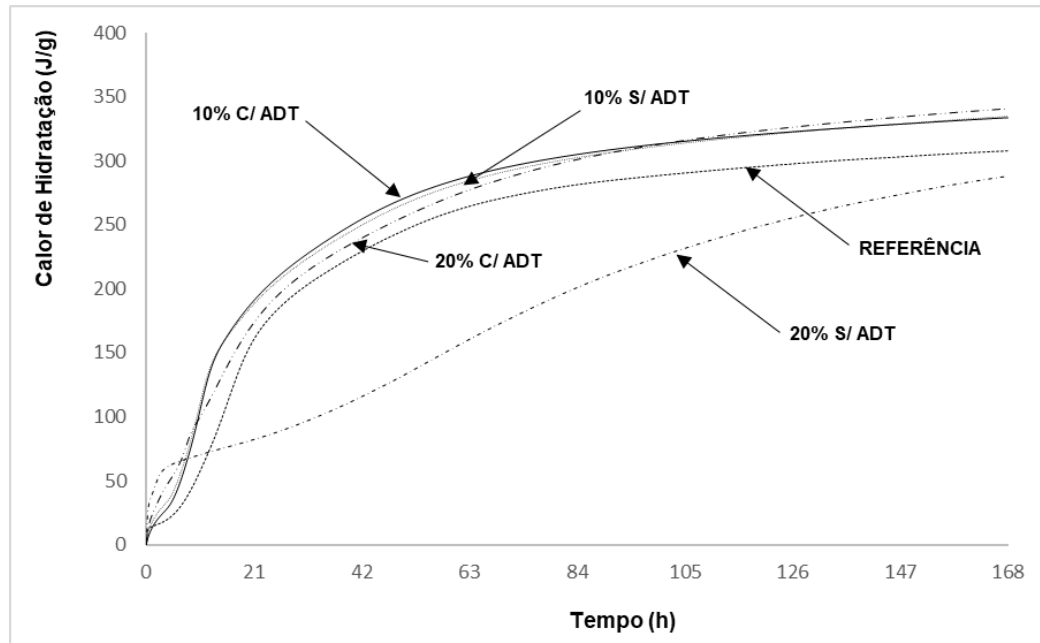


Figura 29 - Calor total liberado durante a hidratação.

Fonte: Autoria própria.

4.2.2 Análise por difração de Raios X (DRX)

A técnica de difração de raios X foi aplicada para avaliar os compostos hidratados das pastas de cimento estudadas. A análise se deu nas amostras com 28 dias de idade e estão apresentadas na figura 30.

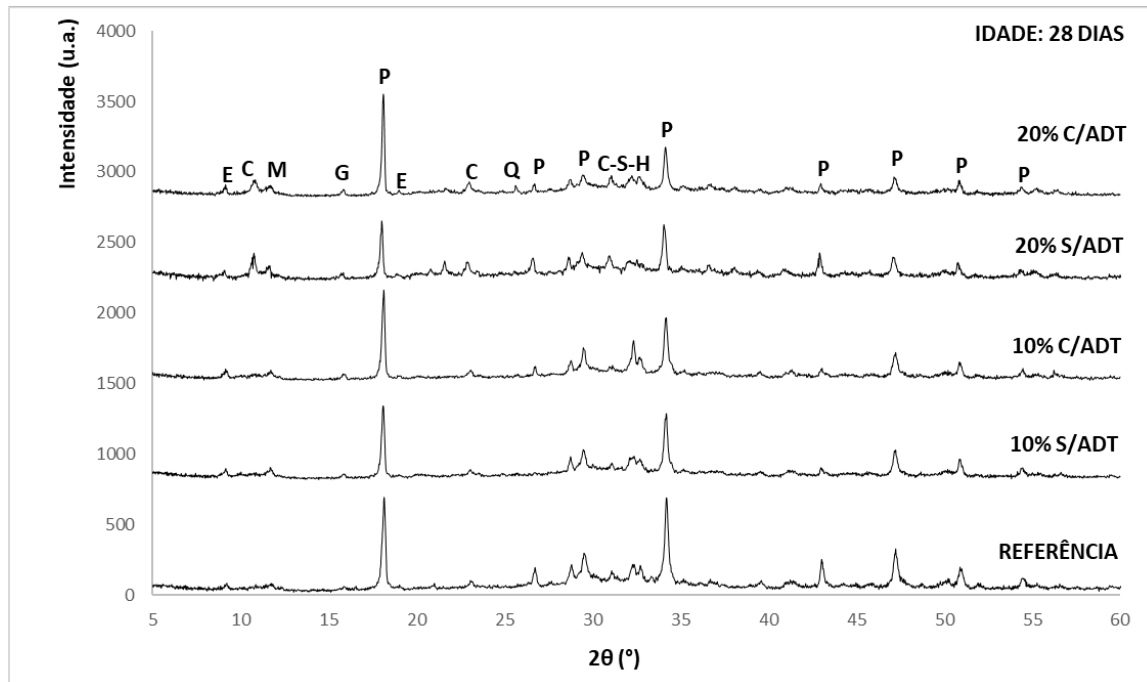


Figura 30 - Difratoograma das pastas, onde: E = Etringita; P = Portlandita; C = Caulinita; C-S-H = Silicato de cálcio hidratado; Q = Quartzo; G = Gipsita; M = Monossulfato de cálcio hidratado.

Fonte: Autoria própria.

Observa-se no difratograma da figura 30 a formação de Portlandita e C-S-H em todas as pastas, além da presença de etringita. É possível visualizar que com o aumento do teor de lodo de ETA ao cimento, o pico correspondente ao C-S-H não sofre expressiva redução na sua intensidade, o que pode ser explicado pelo bom desempenho das amostras no teste de resistência mecânica.

Um pico referente ao monossulfato de cálcio hidratado é percebido em todas as amostras.

Nota-se que os picos de C-S-H e Portlandita tornam-se menores nas pastas contendo lodo de ETA. O mesmo foi observado por Stein (2016), isso, segundo o autor ocorre devido às reações pozolânicas com a sílica presente em maior quantidade no lodo de ETA, as quais formam o C_3S e o C_2S e em seguida, ambos são consumidos para a formação do C-S-H.

É importante destacar, que a intensidade dos picos de etringita, reduzem ao ser adicionado 10% de lodo de ETA na composição e aumentam nas pastas contendo 20% de lodo de ETA.

É possível visualizar um pico com pouca intensidade correspondente à gipsita apenas nas amostras contendo lodo de ETA. O principal pico do lodo de ETA o qual

corresponde ao quartzo é possível notar nas amostras exceto na referência, entretanto quase imperceptível por sua baixa intensidade. Dois pontos referente a caulinita também foram identificados nas amostras contendo lodo.

A não identificação destes picos (gipsita, quartzo e caulinita) na amostra referência, pode ser associada com a incorporação dos compostos do lodo pelo cimento nestes dois pontos, formando caulinita, gipsita e quartzo sendo que esses podem ter influenciado na redução da capacidade de resistência mecânica.

Entretanto, as análises de DRX mostram que o lodo foi bem incorporado pelo cimento Portland, sendo que os picos correspondentes aos principais compostos hidratados do cimento aparecem bem definidos em todas as amostras. Em relação ao processo de hidratação, ocorreu um retardo com o aumento do teor de lodo de ETA nas amostras.

4.2.3 Análise termogravimétrica (TG) e termogravimétrica derivada (DTG)

A figura 31 apresenta as curvas obtidas através de análise termogravimétrica (TG) e termogravimétrica derivada (DTG), onde o pico inicial corresponde ao C-S-H, o segundo a etringita, o terceiro a portlandita e o quarto ao CaCO_3 .

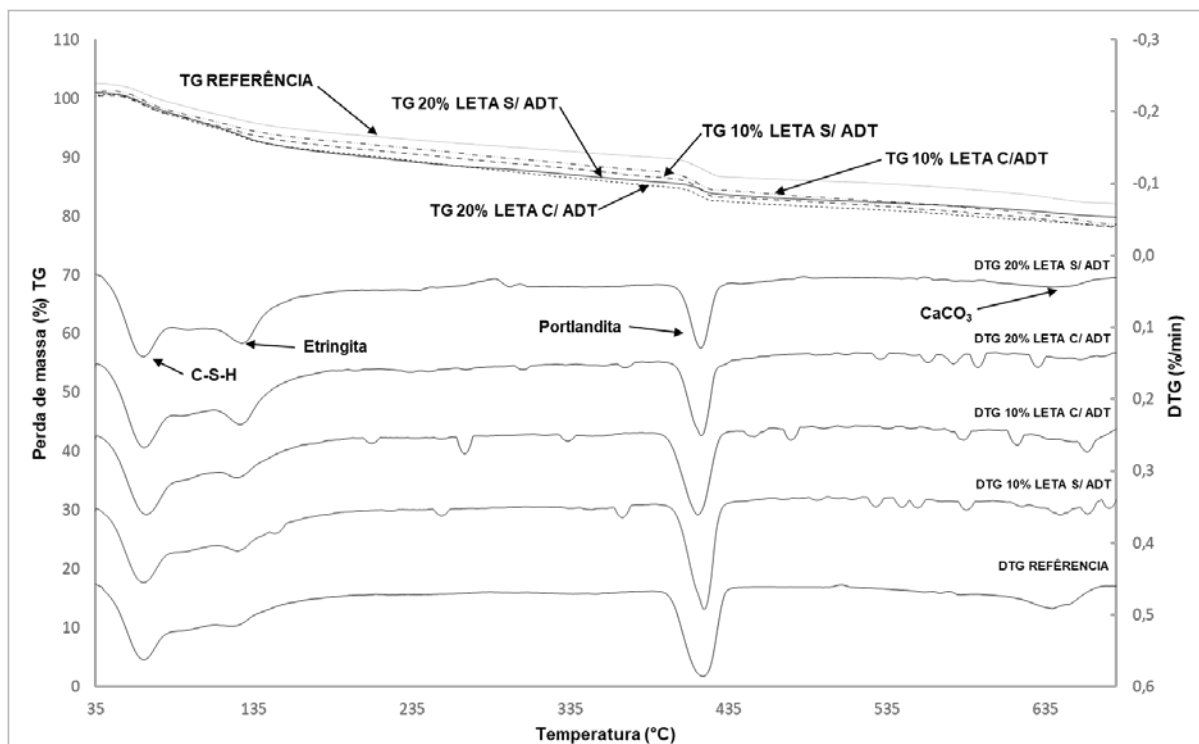


Figura 31 - Curvas de TG e DTG das amostras para a idade de 28 dias.

Fonte: Autoria própria.

Nota-se que o pico referente ao C-S-H aparece bem definido em todas as amostras. O segundo pico referente a etringita apresenta-se em todas as pastas, mas mostra-se bem mais definido nas amostras contendo 20% de lodo de ETA. O pico referente a portlandita também está presente em todas as amostras, entretanto com o aumento do teor de lodo de ETA, a intensidade do pico diminui.

O pico referente ao carbonato de cálcio (CaCO_3) aparece bem definido na pasta referência, sendo que nas outras pastas a sua presença é pouco percebida.

As análises de DRX e TG/DTG, é possível perceber que o lodo foi incorporado ao cimento

A maior quantidade de etringita nas amostras contendo lodo de ETA pode ter afetado na capacidade de resistência mecânica das pastas.

4.2.4 Microscopia Eletrônica de varredura (MEV)

A microestrutura das amostras na idade de 28 dias foram avaliadas através de imagens obtidas por MEV e são expostas na figura 32.

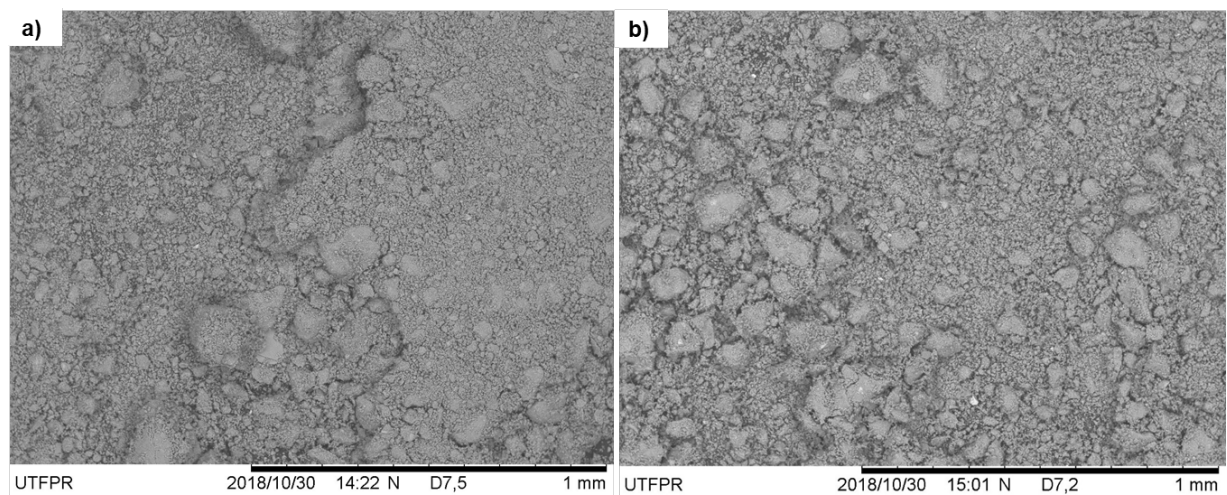


Figura 32 - Micrografias das amostras com adição de lodo. a) +10% de lodo de ETA com aditivo e b) +20% de lodo de ETA com aditivo.

Fonte: Autoria própria.

Ao analisar as micrografias do trabalho de Alexandre *et al.* (2018) foi observado fissuras apresentadas pela amostra com adição de 20% de lodo de ETA, e no centro de ambas fissuras, partículas aglomeradas se fazem presente. Essas

partículas podem ter sido formadas a partir do efeito de resíduo de coagulante presente no lodo e podem interferir na capacidade de resistência mecânica da pasta.

Portanto, foi adicionado 0,3% de aditivo superplastificante para as amostras com teor de 10% e 20% de lodo de ETA, com o intuito de aumentar a viscosidade da amostra, impedindo a formação de novos aglomerados.

A figura 32a, evidencia a amostra com adição de 10% de lodo de ETA, e a figura 32b com 20% de lodo de ETA, percebe-se que com a adição de aditivo não ocorre fissuras nas amostras (aumento de 100 vezes), levando a concluir que o aditivo aplicado se mostrou eficiente para a finalidade que foi proposto.

5 CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo identificar a formação dos principais compostos hidratados formados durante a hidratação das pastas estudadas, avaliar se a adição de lodo de ETA ao cimento interfere na resistência e compressão do cimento, além de contribuir para os estudos de disposição de lodo de ETA. Através dos resultados obtidos, pode-se fazer as seguintes considerações:

Em relação aos principais compostos hidratados formados durante o processo de hidratação das pastas, foram identificados através de análise de microestrutura: silicato de cálcio hidratado, etringita, portlandita, e monossulfato de cálcio hidratado, os quais são característicos do cimento Portland, além da caulinita, quartzo e gipsita os quais são herdados do lodo de ETA.

A substituição do cimento Portland pelo subproduto reduziu a capacidade de resistência mecânica se comparado com a amostra referência (sem lodo).

O presente trabalho contribuiu com os estudos de disposição de lodo de ETA, já que as amostras com lodo de ETA apresentaram bons resultados mecânico e microestruturais, sendo possível observar a boa incorporação do lodo pelo cimento. Além disso, o estudo tem caráter ambiental duplamente importante, já que apresenta uma alternativa de disposição adequada para o resíduo que é destinado incorretamente ao meio ambiente sem prévio tratamento. O seu reaproveitamento na construção civil, substituindo parcialmente o cimento Portland vem corroborar com a redução de CO₂ gerado durante o processo de produção do cimento Portland.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BRASIL. Portaria de Consolidação nº 5, de 28 de setembro de 2017 do Ministério da Saúde. **Consolidação das normas sobre as ações e os serviços de saúde do Sistema Único de Saúde**. Brasília, DF.

_____. Lei Federal nº 12.305, de 02 de agosto de 2010. **Institui A Política Nacional de Resíduos Sólidos; Altera A Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e Dá Outras Providências**. Brasília, DF.

PARANÁ. Resolução nº 21, de 22 de abril de 2009. **Dispõe Sobre Licenciamento Ambiental, Estabelece Condições e Padrões Ambientais e Dá Outras Providências, Para Empreendimentos de Saneamento**. Curitiba, PR.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7.214: **Areia normal para ensaio de cimento** - Especificação. Rio de Janeiro, 1982.

_____. NBR 12.216: **Projeto de estação de tratamento de água para abastecimento público**. Rio de Janeiro, 1992.

_____. NBR 5.735: **Cimento Portland de alto-forno**. Rio de Janeiro, 1991.

_____. NBR 5.736: **Cimento Portland pozolânico**. Rio de Janeiro, 1991.

_____. NBR 7.215: **Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão**. Rio de Janeiro, 1996.

_____. NBR 13.276: **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Preparo da mistura e determinação do índice de consistência**. Rio de Janeiro, 2002.

_____. NBR 10.908: **Aditivos para argamassa e concreto – Ensaio de caracterização**. 2ª ed. Rio de Janeiro, 2008.

_____. NBR 11.768: **Aditivos químicos para concreto de cimento Portland-Requisitos**. 2ª ed. Rio de Janeiro, 2011.

_____. NBR 10.004: **Resíduos sólidos - Classificação**. 2ª ed. Rio de Janeiro, 2004.

ABCP. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Guia básico de utilização do cimento portland**. 7.ed. São Paulo, 2002. 28p. (BT-106)

ACHON, Cali Laguna et. al. Residues of water treatment plants and ISO 24512: challenge of the Brazilian sanitation. **Eng. Sanit Ambient**, São Paulo, p.115-122, 2013.

ALEXANDRE, Elisandro et al. Avaliação do lodo de ETA para substituição parcial do cimento Portland. In: 7º INTERNATIONAL CONGRESS ON CERAMICS & 62º CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA, 2018, Foz do Iguaçu, PR.

ANDRADE, Jairo José de Oliveira et al. Performance of rendering mortars containing sludge from water treatment plants as fine recycled aggregate. **Journal Of Cleaner Production**, Rio Grande do Sul, v. 192, p.159-168, 2018.

ANDREOLI, Cleverson V. et. al. Produção, Composição e Constituição de Lodo de Estação de Tratamento de Água. In: ANDREOLI, Cleverson V. (Coord.) **Alternativas de Usos de Resíduos do Saneamento**. Projeto PROSAB. Rio de Janeiro: ABES, 2006. p. 29-48.

BETIOLI, Andrea Murillo. **Influência dos Polímeros MHEC e EVA na Hidratação e Comportamento Reológico de Pastas de Cimento Portland**. 2007. 211 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis/SC, 2007.

BOTERO, Wander Gustavo et al. Caracterização de Lodo Gerado em Estações de Tratamento de Água: Perspectiva de Aplicação Agrícola. **Química Nova**, Arapiraca/AL, p.2018-2022, 17 de setembro de 2009. Disponível em: <http://quimicanova.s bq.org.br/imagebank/pdf/Vol32No8_2018_06-

AR08376.pdf?agreq=Decantação de água&agrep=jbcs,qn,qnesc,qnint,rvq>. Acesso em: 31 de maio de 2017.

CARNEIRO, Charles; ANDREOLI, Cleverson V. (Editores). **Lodo de Estações de Tratamento de Água: Gestão e perspectivas Tecnológicas**. Curitiba: Sanepar, Thinks Creative, 2013.

CORDEIRO, J. S. **Processamento de lodos de estações de tratamento de água (ETAs)**. In: ANDREOLI, C.V. (Coord.) Resíduos sólidos do saneamento: processamento, reciclagem e disposição final. Projeto PROSAB. Rio de Janeiro: ABES, 2001. 273 p.

CORDEIRO, João Sérgio. Remoção Natural de Água de Lodos de ETAs Utilizando Leitões de Secagem e Lagoas de Lodo. In: REALI, Marco Antonio Penalva (Coord.) **Noções Gerais de Tratamento e Disposição Final de Lodos de Estações de Tratamento de Água**. Projeto PROSAB. Rio de Janeiro: ABES, 1999. p. 125-141.

DEDAVID, Berenice Anina; GOMES, Carmem Isse; MACHADO, Giovana. **Microscopia Eletrônica de Varredura: Aplicações e Preparação de Amostras**: Materiais poliméricos, metálicos e semicondutores. Poto Alegre/RS: Edipucrs, 2007.

GALLUCCI, E.; MATHUR, P.; SCRIVENER, K.. Microstructural development of early age hydration shells around cement grains. **Cement And Concrete Research**, Lausana, Suíça, v. 40, p.4-13. 2010.

GASTALDINI, A.I.g. et al. The use of water treatment plant sludge ash as a mineral addition. **Construction And Building Materials**, Santa Maria, RS, v. 94, p.513-520, 2015.

GERALDO, Rodrigo H.; FERNANDES, Luiz Flávio R.; CAMARINI, Gladis. Water treatment sludge and rice husk ash to sustainable geopolymer production. **Journal Of Cleaner Production**, Campinas, SP, Brasil, v. 149, p.146-145, 2017.

HELLER, Léo; Pádua, Valter Lúcio (organizadores). **Abastecimento de Água para Consumo Humano**. Belo Horizonte, MG: Editora UFMG, 2006.

HOPPE FILHO, Juarez. **Sistemas Cimento, Cinza Volante e Cal Hidratada: Mecanismo de Hidratação, Microestrutura e Carbonatação de Concreto**. 2008. 318 f. Tese (Doutorado) - Engenharia Civil e Urbana, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo/SP, 2008.

HOPPEN, Cinthya et al. Co-disposição de lodo centrifugado de Estação de Tratamento de Água (ETA) em matriz de concreto: método alternativo de preservação ambiental. **Cerâmica**, Curitiba, v. 51, p.85-95, 2005.

INGUNZA, María del Pilar Durante et. al. Uso de Resíduos do Saneamento na Fabricação da Cerâmica Vermelha. In: ANDREOLI, Cleverson V. (Coord.) **Alternativas de Usos de Resíduos do Saneamento**. Projeto PROSAB. Rio de Janeiro: ABES, 2006. p. 283-359.

IONASHIRO, Massao; GIOLITO, Ivo. **Fundamentos da Termogravimetria: Análise Térmica Diferencial, Calorimetria Exploratória Diferencial**. Araraquara: Giz Editorial, 2004.

ISAIA, Geraldo C. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. São Paulo: Ipsis Gráfica e Editora, 2011. 1 v.

KONG, Daniel L.y.; SANJAYAN, Jay G. Damage behavior of geopolymer composites exposed to elevated temperatures. **Cement & Concrete Composites**, Victoria, Austrália, p.986-991, 14 ago. 2008.

LIBÂNIO, Marcelo. **Fundamentos de Qualidade e Tratamento de Água**. 3ª. ed. Campinas, SP: Editora Átomo, 2010.

LIU, Shuhua et al. Influence of fineness on hydration kinetics of supersulfated cement. **Thermochimica Acta**, Wuhan, China, p.37-42, 19 fev. 2015.

LU, Bao et al. Effects of carbonated hardened cement paste powder on hydration and microstructure of Portland cement. **Construction And Building Materials**, Changsha, China, v. 186, p.699-708, 2018.

MARTINS, Talita. **Caracterização mineralógica e da matéria orgânica do solo por técnicas espectroscópicas e DRX**. 2009. 177 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Química Aplicada, Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa/PR, 2009.

MEHTA, P. Kumar; MONTEIRO, Paulo J. M.. **Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais**. 2. ed. São Paulo: Pini, 1994.

MOSTAFA, N.Y.; BROWN, P.W. Heat of hydration of high reactive pozzolans in blended cements: Isothermal conduction calorimetry. **Thermochimica Acta**, Ismaília, Egito, v. 435, p.162-167. 2005.

MOTHÉ, Cheila Gonçalves; AZEVEDO, Aline Damico de. **Análise Térmica de Materiais**. São Paulo/sp: Artliber, 2009.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. - **Tecnologia do concreto**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

QOKU, Elsa; BIER, Thomas A.; WESTPHAL, Torsten. Phase assemblage in ettringite-forming cement pastes: A X-ray diffraction and thermal analysis characterization. **Journal Of Building Engineering**, Alemanha, v. 12, p.37-50, 2017.

QUARCIONI, Valdecir Angelo. **Influência da cal hidratada nas idades iniciais da hidratação do cimento Portland – Estudo em Pasta**. 2008. 188 f. Tese (Doutorado) - Engenharia Civil e Urbana, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo/SP, 2008.

RAMIREZ, Kleber Gomes. **Viabilidade do Aproveitamento de Resíduo de Estação de Tratamento de Água (ETA) na Confeção de Concretos**. 2015. 133 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Tecnologias Ambientais, Universidade Tecnológica Federal doParaná, Medianeira/PR, 2015.

RICHTER, Carlos A. **Tratamento de lodos de Estações de Tratamento de água**. São Paulo/SP: Editora Edgard Blücher LTDA, 2001.

RICHTER, Carlos A.; NETTO, José M. de Azevedo. **Tratamento de Água: Tecnologia Atualizada**. São Paulo: Blucher, 2007. 332 p.

RODRIGUES, Lara Pessin; HOLANDA, Jóse Nilson França de. Influence of the incorporation of water treatment plant (WTP) sludge on the technological properties of soil-cement bricks. **Cerâmica**, São Paulo, p.551-556, 2013. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0366-69132013000400010&lng=en&nrm=iso&tlng=en>. Acesso em: 02 jun. 2017.

RUBERT, Sílvia. **Contribuição ao estudo de cimentos supersulfatados: Formulação e Mecanismos de Hidratação**. 2015. 115 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco/PR, 2015.

SALES, Almir; SOUZA, Francis Rodrigues de; ALMEIDA, Fernando do Couto Rosa. Mechanical properties of concrete produced with a composite of water treatment sludge and sawdust. **Construction And Building Materials**, São Carlos, SP, v. 25, p.2793-2798, 2011.

SILVA, Denise Antunes da. **Efeitos dos Polímeros HEC e EVA na Microestrutura de Pastas de Cimento Portland**. 2001. 263 f. Tese (Doutorado) – Ciência e Engenharia dos Materiais, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis/SC, 2001.

STEIN, Ronei Tiago. **Características de Pastas de cimento Portland com Adição de Cinza de Lodo de ETA**. 2016. 156 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-

graduação em Engenharia Civil, Centro de Tecnologia da Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria/RS, 2016.

TAYLOR, H F W. **Cement Chemistry**. 2. ed. London: Thomas Telford, 1990.

WANG, L. et al. Hydration, mechanical property and C-S-H structure of early-strength low-heat cement-based materials. **Material Letters**, Wuhan, China, v. 217, p.151-154, 2018.

WAGNER, Luiz Fernando; PEDROSO, Keylla. Disposição de Resíduos das Estações de Tratamento de Água. **Technoeng**, Ponta Grossa/PR, dez. 2014. Disponível em: <<http://www.faculdadespontagrossa.com.br/revistas/index.php/technoeng/article/view/110/111>>. Acesso em: 1º de junho de 2017.

YOTSUMOTO NETO, Sakae. **Sensor Eletroquímico à Base de Ni/SBA-15 para determinação de Cobre em Etanol Combustível**. 2013. 89 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Química, Departamento de Tecnologia Química, Universidade Federal do Maranhão, São Luís/ma, 2013.

APÊNDICES

APÊNDICE A

Tabela 9 - Resultados dos testes de resistência à compressão das amostras estudadas.

RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO						
	Aditivo (%)	Idade (dias)	Valores Individuais (MPa)	Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coefficiente de Variação (%)
CPV - REF	0,0	07	42,99	42,28	1,05	2,47
			42,77			
			41,08			
CPV - REF	0,0	28	41,57	43,83	2,66	6,07
			46,76			
			43,15			
CPV + 10% LETA	0,0	07	20,47	25,42	4,38	17,25
			26,96			
			28,82			
CPV + 10% LETA	0,0	28	44,01	37,33	6,11	16,37
			32,02			
			35,96			
CPV + 10% LETA	0,3	07	27,30	31,12	3,62	11,65
			31,56			
			34,51			
CPV + 10% LETA	0,3	28	44,08	39,41	4,05	10,26
			37,15			
			37,00			
CPV + 20% LETA	0,0	07	27,8	28,80	1,14	3,95
			30,04			
			28,57			
CPV + 20% LETA	0,0	28	33,84	34,42	0,53	1,55
			34,89			
			34,54			
CPV + 20% LETA	0,3	07	31,50	25,95	5,15	19,85
			25,04			
			21,32			
CPV + 20% LETA	0,3	28	29,69	33,17	3,90	11,74
			37,38			
			32,45			

Fonte: Autoria própria.