



**Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira**

Departamento de Engenharia Civil

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

**Cristiane Maria da Silveira Thiago**

**AVALIAÇÃO DO POTENCIAL POZOLÂNICO DA CINZA DE LODO  
DE ÁGUAS RESIDUÁRIAS POR MEIO DE TÉCNICAS  
INSTRUMENTAIS**

Ilha Solteira

2014

**Cristiane Maria da Silveira Thiago**

**AVALIAÇÃO DO POTENCIAL POZOLÂNICO DA CINZA DE LODO  
DE ÁGUAS RESIDUÁRIAS POR MEIO DE TÉCNICAS  
INSTRUMENTAIS**

Dissertação apresentada à Faculdade de  
Engenharia de Ilha Solteira – UNESP,  
como parte dos requisitos para obtenção do  
título de Mestre em Engenharia Civil.

**Orientador:** Prof.Dr.José Luiz Pinheiro Melges  
**Coorientador:** Prof. Dr. Jorge Luís Akasaki

Ilha Solteira

2014

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

- T422a **Thiago, Cristiane.**  
**Avaliação do potencial pozolânico da cinza de lodo de águas residuárias por meio de técnicas instrumentais: reatividade pozolana das cinzas do lodo de águas residuais / Cristiane Thiago. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2014**  
108 f. : il.
- Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Estruturas, Recursos Hídricos e Tecnologias Ambientais, 2014
- Orientador: José Luiz Pinheiro Melges  
Co-orientador: Jorge Luís Akasaki  
Inclui bibliografia
1. Águas residuárias. 2. Cinzas de águas residuais. 3. Reatividade pozolânica. 4. Técnicas instrumentais. 5. Ensaio químicos. 6. Cal fixada.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA  
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA  
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA

### CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

**TÍTULO:** Avaliação do potencial pozolânico da cinza de lodo de águas residuárias por meio de técnicas instrumentais

**AUTORA:** CRISTIANE MARIA DA SILVEIRA THIAGO

**ORIENTADOR:** Prof. Dr. JOSE LUIZ PINHEIRO MELGES

**CO-ORIENTADOR:** Prof. Dr. JORGE LUIS AKASAKI

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL, Área: ESTRUTURAS, pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. JOSE LUIZ PINHEIRO MELGES

Departamento de Engenharia Civil / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

Prof. Dr. MAURO MITSUUCHI TASHIMA

Departamento de Engenharia Civil / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

Prof. Dr. JORGE JUÁN PAYÁ BERNABEU

Universitat Politècnica de València / ICITECH - Instituto de Ciencia y Tecnología del Hormigón

Data da realização: 14 de fevereiro de 2014.

*Dedico este trabalho aos meus pais  
João e Célia e a meus filhos Bruno e  
Igor, pelo incentivo, compreensão e  
paciência, motivação e tolerância.*

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1- Esquema usual de uma ETE.....	23
Figura 2.2 - Esquema de uma UASB .....	23
Figura 2.3 - Esquema de um tratamento com UASB.....	24
Figura 2.4 - Instalações do SEMAE .....	25
Figura 2.5 - Detalhe do poço de equalização.....	26
Figura 2.6 – Dispositivos usados no procedimento de remoção de sólidos grosseiros .....	27
Figura 2.7- Estação Elevatória de esgoto bruto.....	27
Figura 2.8 - Gradeamento fino.....	28
Figura 2.9 - Medidor de PH .....	29
Figura 2.10 – Desarenadores: cheio e vazio .....	29
Figura 2.11 - Reatores UASB .....	29
Figura 2.12 - Produção de gás metano, que é queimado, e de lodo anaeróbico.....	30
Figura 2.13 - Tanque de Aeração .....	30
Figura 2.13 - Decantador .....	31
Figura 2.15 - Água pronta pra resuso.....	32
Figura 2.16 – Torta em caçambas.....	32
Figura 2.17 - Microscopia de varredura eletrônica de argamassa com substituição de 30% de cimento por CLAR.....	34
Figura 2.17 - Esboço da amostra para medições de corrosão.....	34
Figura 2.18 - Microscopia de varredura eletrônica para argamassas com 30% de substituição de cinzas de lodo de águas residuais .....	35
Figura 2.19- Esboço da amostra para medições de corrosão.....	36
Figura 2.19 - Equipamento usado para a fabricação de blocos de cimento.....	36
Figura 2.20- Microscopia de varredura eletrônica para argamassas com 30% de substituição de cimento por cinzas de lodo de águas residuais.....	37

Figura 2.21- Equipamento usado para a fabricação de blocos de cimento.....	39
Figura 3.1- Coleta do lodo na Estação de Tratamento de Esgoto da cidade de São do Rio Preto .....	40
Figura 3.2 - Identificação da amostra e equipamentos usados no transporte de São José do Rio Preto à Ilha Solteira.....	41
Figura 3.3- Equipamentos usados no processo de secagem da amostra.....	41
Figura 3.4 - Moinho de Bolas.....	42
Figura 3.5 - Aspecto do material triturado.....	42
Figura 3.6 - Equipamentos usados para queima.....	43
Figura 3.7 - Amostra da mistura de Água, Cal Hidratada e CLAR.....	44
Figura 3.8 - Granulômetro a laser.....	45
Figura 3.9 – Procedimento para Perda de Massa .....	46
Figura 3.10- Proveta graduada .....	46
Figura 3.11- Pesagem do material .....	46
Figura 3.12 Aquecimento da solução .....	46
Figura 3.13- Dispositivo de filtragem .....	47
Figura 3.14- Balão volumétrico (100ml) .....	47
Figura 3.15- Agitação da solução.....	47
Figura 3.16- Pipetagem de 5 ml da solução .....	47
Figura 3.17- Pipetagem de 3 gotas de cromato de potássio.....	47
Figura 3.18 - Dispositivo de titulação de nitrato de prata .....	48
Figura 3.19- Colorações relacionadas à titulação.....	48
Figura 3.20- Pesagem do material .....	49
Figura 3.21- Aquecimento da solução com HCl na caixa de areia .....	49
Figura 3.22– Filtragem após ataque com HCl .....	50
Figura 3.23 - Verificação da presença de cloro.....	50
Figura 3.24 – Balão com filtro e com solução de KOH .....	51

Figura 3.25 – Sistema de aquecimento e condensador.....	51
Figura 3.26 - Calcinação dos filtros .....	52
Figura 3.27- Utilização da mufla .....	52
Figura 3.5 – Equipamento de Difração de Raios X. ....	53
Figura 3.6 – Exemplo de curva DTG de pasta de cimento com 40% de substituição por cinza volante, aos 56 dias de idade.....	55
Figura 3.7 – Exemplo de duas curvas do tipo DTG, sendo uma de pasta de cimento com 40% de substituição por cinza volante (40%CV) e, aos 56 dias de idade, e a outra somente de cimento (Control).....	56
Figura 3.51- Equipamento usado no ensaio de Termogravimetria.....	57
Figura 3.52 -Recipientes de alumina (1000°C) e de alumínio (600°C).....	57
Figura 3.53 – Microscópio Eletrônico de Varredura .....	57
Figura 3.5.4 - Equipamento de Espectroscopia Infravermelho .....	57
Figura 4.1 – Aspecto do material.....	59
Figura 4.2 – Teste de reatividade Pozolânica a 25°C e 65°C .....	60
Figura 4.3 – Granulometria da CLAR .....	61
Fig. 4.4- Resultado do ensaio de Difração de Raios X para as amostras calcinadas às temperaturas de 650°C e 850°C. ....	64
4.5 Percentuais de óxidos .....	67
Figura 4.6 - Porcentagem de cal fixada para pastas de Cal/CLAR curadas em câmara úmida.....	67
Figura 4.7 - Porcentagem de cal fixada para pastas de Cal/CLAR curadas em banho térmico.....	67
Figura 4.7 – Porcentagens dos Óxidos .....	65
1 Figura 4.9 - Porcentagem de cal fixada para pastas de Cal/CLAR.....	66
4.6-Figura - Porcentagem de cal fixada para pastas de Cal/CLAR curadas em câmara úmida.....	66
Figura 4.7 - Porcentagem de cal fixada para pastas de Cal/CLAR curadas em banho térmico. ....	67
Figura 4.8 - Porcentagem de cal fixada para pastas de Pastas de cimento.....	68



Figura 4.9 – Microscopia da CLAR ampliação 300x. ....	69
Figura 4.10 – Ampliação da CLAR: 1000x.....	70
Figura 4.11 – Ampliação da CLAR: 2000x .....	70
Figura 4.12 – Pasta Cal/CLAR de 3/7, aos 7 dias, ampliação de 5000x, curada a 20°C.....	71
Figura 4.13 – Ensaio de EDX para um ponto da pasta Cal/CLAR de 3/7 aos 7 dias, curada a 20°C, ampliação de 10 000x.....	72
Figura 4.14- Pasta Cal/CLAR de 3/7, aos 7 dias, ampliação de 5000x, curada a 40°C .....	72
Figura 4.15 EDX da Pasta Cal/CLAR de 3/7, aos 28 dias, ampliação de 5000x, curada a 20°C.....	74
Figura 4.15 Pasta de Cal/CLAR.....	73
Figura 4.16 Pasta Cal/CLAR de 3/7, aos 28 dias, ampliação de 5000x, curada a 20°C .....	74
Figura 4 – Ensaio de EDX para um ponto da pasta Cal/CLAR de 3/7 aos 7 dias, curada a 40°C, ampliação de 5000x.....	75
Figura 4.18: Pasta Cal/CLAR 5:5, 20°C, 90 dias, ampliação de 5000x.....	75
Figura 4.19: EDX para a pasta Cal/Clar 5:5, 20°C, 90 dias, ampliação de 5000x...76	
Figura 4.20: EDX para a pasta Cal/Clar 5:5, 20°C, 90 dias, ampliação de 5000x....76	

## LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 - Perda de massa após secagem na estufa (100°C 24h).....	59
Tabela 4.2 – Perdas de massa decorrentes da calcinação na mufla.....	60
Tabela 4.3 – Valores dos diâmetros obtidos por meio do ensaio de granulometria a laser.....	61
Tabela 4.4- Perda de Massa em relação ao Fogo CLAR 650°C.....	62
Tabela 4.5 teor de cloretos.....	63
Tabela 4.6 - Teor de resíduos insolúveis.....	63
Tabela 4.7 – Porcentagens dos Óxidos.....	65

Tabela 4.7 – Porcentagens dos Óxidos.....	65
Tabela 4.9 - Porcentagem de cal fixada para pastas de Cal/CLAR.....	66
Tabela 4.10 - Porcentagem de cal fixada para pastas de CIMENTO/CLAR.....	68

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por mais esta conquista na minha vida, e por Ele estar sempre à minha frente, conduzindo e iluminando os meus passos. A cada dia reconheço que Tu és o meu maior mestre!

Após esta longa jornada, a imensa satisfação que sinto ao terminar esta pesquisa é indescritível. Por isso, não posso deixar de agradecer às pessoas, que de algum modo, contribuíram para a realização deste trabalho.

À minha família, por me mostrar que o saber é algo mais que precioso, e por estar sempre ao meu lado para suprir as ausências e ansiedades. Em especial aos meus pais, filhos e irmãs, ao qual dedico este trabalho, e também a Renan Nunes Pinheiro (*in memoriam*) pelo incentivo. Aos amigos que adquiri durante essa pesquisa, João Vitor Fazzan, Adriana Pereira, Vanessa Soncin, Suzi Berté, Leandro Cirqueira Sousa, que também acreditaram na realização deste projeto.

Também sou eternamente grata ao meu Orientador Prof.Dr. José Luiz Pinheiro Melges e ao meu co-orientador Prof.Dr. Jorge Luís Akasaki, que me levaram a entender o quanto importante é trabalhar com seriedade e competência, além da amizade e profissionalismo compartilhados. Agradeço pelas valiosas contribuições que permitiram ampliar meus conhecimentos na área de materiais de construção civil.

Ao Laboratório CESP de Engenharia Civil (LCEC), em especial ao engenheiro Flávio Moreira Salles, que colocou à disposição a utilização de equipamentos e apoio técnico necessário para a realização de parte dos ensaios experimentais.

Aos Professores Doutores Jorge Juan Payá Bernabeu, María Victoria Borrachero Rosado e Mauro Mitsuuchi Tashima, pelo auxílio na interpretação dos resultados realizados em Valência, Espanha.

Agradeço às Professoras Doutoradas Mercedes Bonilla Salvador e Lourdes Soriano Martínez, e também à Pesquisadora Noelia Bouzón Orgeira, pelo auxílio técnico prestado durante a realização dos ensaios em Valência.

A Gilson, Cavassano, Mário e Ronaldo, técnicos do Laboratório Central de Engenharia Civil, da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, pela colaboração.

Em especial também ao Prof.Dr. Jean Richard Dasnoy Marinho, do Departamento de Física e Química, da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – UNESP, pelo auxílio na interpretação dos resultados dos ensaios de EDX.

Agradeço em especial aos Professores Doutores Haroldo de Mayo Bernardes, Rogério de Oliveira Rodrigues, Tsunao Matsumoto, Marco Antônio Alcântara e Jorge Luís Akasaki pelos ensinamentos proporcionados nas disciplinas de Pós-Graduação.

Ao professor Dr. Fernando Fertoni do Departamento de Química do IBILCE-UNESP, de São José do Rio Preto, pela motivação e incentivo.

Agradeço ao meu amigo Rafael Nava Micelli, químico responsável pela Estação de Tratamento de Esgoto (ETE), e também ao SEMAE, por permitir a realização de visitas técnicas, pela atenção dada, pela colaboração na obtenção das amostras de lodo e pelas explicações dadas sobre o funcionamento da ETE.

Os meus agradecimentos ao colega Arnaldo de Oliveira pela ajuda no transporte de material, e aos colegas Darcy Dolce, Ademir Marton e José Carlos de Deus pelo convívio durante as viagens e perseverança nos objetivos.

À Engenheira e Profa.MSc. Ana Paula Fugii, pelo incentivo e motivação, por muitas vezes ter estendido as mãos para que eu continuasse a minha jornada, contribuindo valiosamente na concepção inicial deste projeto e para que o mesmo fosse realizado e concluído.

A todos que, de alguma forma, direta ou indiretamente, colaboraram para a realização deste trabalho, o meu reconhecimento.

*“O verbo de Deus nos céus é  
fonte de sabedoria, seus caminhos  
são os mandamentos eternos.”*

*Eclesiástico 1,5*

## RESUMO

Atualmente, observa-se uma grande preocupação com a produção de resíduos oriundos de estações de tratamento de esgoto. O sistema de tratamento de águas residuárias baseado na técnica de lodo ativado é amplamente usado em todo o mundo, e, basicamente, consiste na separação da parte sólida do esgoto por meio de um processo de desidratação por centrifugação. Neste processo, o esgoto, em uma segunda fase, que é enviado para os reatores de UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket), onde esta sujeita à digestão anaeróbica, gerando gás metano e lodo anaeróbico. Este lodo é enviado para centrífugas e, mais tarde, lançado em caçambas e enviado para aterros sanitários. O resíduo final deste processo tem preocupação ambiental, uma vez que este material tem sido lançado diretamente em aterros, sem um estudo sobre a possibilidade de outras aplicações. Algumas aplicações deste material já foram investigadas por diversos pesquisadores, como, por exemplo, para a produção de biogás e fertilizantes, e para a geração de energia. Hoje em dia, a indústria da construção civil está procurando a reutilização de vários produtos para serem aplicados na fabricação de argamassas e concretos. Alguns destes materiais podem apresentar propriedade pozolânica enquanto outros podem ser utilizados como uma adição com característica de filler. O objetivo deste trabalho é avaliar o potencial pozolânico da cinza de lodo de águas residuárias, por meio de técnicas instrumentais, visando uma futura aplicação na produção de argamassa e concreto. Após a realização de procedimentos de transporte, secagem, moagem e calcinação do lodo de águas residuárias, e de ensaios de granulometria, perda de massa em relação ao fogo, de determinação do teor de cloretos, de determinação do teor de resíduos insolúveis, de difração de raios-X e de fluorescência de Raios-X, de Termogravimetria e de Microscopia Eletrônica de Varredura realizada nas cinzas e em pastas elaboradas com elas, pode-se verificar que as mesmas apresentam potencial pozolânico.

**Palavras-chave:** Cinzas. Lodo. Água residuais. Cimento.

## ABSTRACT

Currently, there is a great concern for waste originating from sewage treatment plants. The system of wastewater treatment technique based on the activated sludge is widely used throughout the world, and basically consists in the separation of the solid part of the sewage through a dehydration process by centrifugation. The sewage, in a second phase of this process, it is sent to the reactors called Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB), and, in that place, it is subjected to an anaerobic digestion, generating methane gas and anaerobic sludge. This sludge is sent to centrifuges and later released in buckets and transported to landfill. The final residue of this process has environmental concern since this material has been introduced directly in a landfill without a study on the possibility of other applications. Some applications of this material have been investigated by several researchers, for example, for producing biogas, fertilizers, and power generation. Nowadays, the civil construction industry is looking for the reuse of various types of residues in order to apply in the production of mortar and concrete. Some of them may have a pozzolanic property while others can be used as an addition (filler effect). The objective of this work is to evaluate the pozzolanic potential effect of the wastewater sludge ash through instrumental techniques, aiming at a future application in the production of mortar and concrete. Ashes were obtained after the realization of procedures of transporting, drying, grinding and calcining the sludge wastewater. After the tests of particle size measurement, of loss of mass in fire, of the content of chlorides and of insoluble residues, of diffraction and fluorescence of X-rays, of thermogravimetry, and of scanning electron microscopy, applied to the ashes and to the pastes that was made with them, it was possible to verify that this material has a pozzolanic potential effect.

**Keywords:** Ash. Sludge. Waste water. Cement.

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>18</b>
1.1	TEMA E MOTIVAÇÃO.....	18
1.2	OBJETIVOS.....	20
1.3	APRESENTAÇÃO DO TRABALHO.....	20
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>21</b>
2.1	LODO DE ESGOTO.....	21
2.2	REATOR ANAERÓBICO DE FLUXO ASCENDENTE (RAFA).....	22
2.3	SISTEMA DE TRATAMENTO DE ESGOTO DE SÃO JOSÉ DO RIO PRETO (SEMAE).....	24
2.4	CARACTERIZAÇÃO DA CINZA DO LODO DE ÁGUAS RESIDUÁRIAS (CLAR).....	24
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>41</b>
3.1	TRANSPORTE E PROCEDIMENTOS PARA SECAGEM DO LODO DE ÁGUAS RESIDUÁRIAS.....	42
3.2	MOAGEM DO MATERIAL SECO.....	43
3.3	PROCEDIMENTOS DE CALCINAÇÃO .....	44
3.4	TESTE PRELIMINAR DE REATIVIDADE POZOLÂNICA.....	44
3.5	ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO .....	45
3.5.1	Granulometria por Difração a Laser .....	45
3.5.2	Perda de Massa em Relação ao Fogo .....	46
3.5.3	Teor de Cloretos .....	47
3.5.4	Resíduos Insolúveis .....	50
3.5.5	Ensaio de Difração de Raios-X .....	53
3.5.6	Fluorescência de Raios-X .....	54
3.5.7	Ensaio de Termogravimetria .....	54
3.5.8	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).....	59
<b>4</b>	<b>APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....</b>	<b>60</b>
4.1	PERDA DE ÁGUA DO LODO DE ÁGUAS RESIDUÁRIAS NA ESTUFA.....	60



4.2	PERDA DE MASSA DECORRENTE DA CALCINAÇÃO DO LODO SECO NA MUFLA.....	61
4.3	TESTE DE REATIVIDADE POZOLÂNICA.....	61
4.4	ENSAIO DE GRANULOMETRIA.....	62
4.5	PERDA DE MASSA EM RELAÇÃO AO FOGO.....	63
4.6	TEOR DE CLORETOS.....	63
4.7	RESÍDUOS INSOLÚVEIS.....	64
4.8	ENSAIO DE DIFRAÇÃO DE RAIOS-X.....	64
4.9	ENSAIO DE FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X.....	65
4.10	ENSAIO DE TERMOGRAVIMETRIA.....	67
4.11	ENSAIO DE MICROSCÓPIA DE VARREDURA ELETRÔNICA (MEV).....	70
5	CONCLUSÕES.....	78
6	REFERÊNCIAS.....	80
	ANEXO A – CURVAS TERMOGRAVIMÉTRICAS.....	84

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 TEMA E MOTIVAÇÃO

Associação Brasileira de Normas Técnicas, a NBR 10.004 (2007) define que resíduos sólidos ou semissólidos são aqueles que resultam da atividade da comunidade de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Considera-se também resíduo sólido 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 tornam inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos d'água ou exijam, para isso, soluções técnicas e economicamente inviáveis, em face à melhor tecnologia disponível.

Atualmente, existe uma grande preocupação com a destinação e com o tratamento dos dejetos coletados nas estações de tratamento de esgoto. Segundo Ângulo et.al (2012), a elevada taxa de industrialização, o surgimento de novas tecnologias, o crescimento populacional e conseqüente aumento de pessoas em centros urbanos, bem como a grande diversificação no consumo de bens e serviços, transformaram os resíduos em graves problemas urbanos, com um gerenciamento oneroso e complexo, considerando-se o volume e massa acumulados.

De acordo com o IBGE (2000) cada cidadão brasileiro produz entre 0,5 a 1 kg de lixo domiciliar. Estudos e dados estatísticos mostram que existe uma relação direta entre porte da cidade e produção, ou seja: quanto mais habitantes, maior será a produção; e que a concentração da população em áreas urbanas é crescente – 8 em cada 10 habitantes vivem em cidades. Portanto, existe a necessidade de se controlar o destino final desses dejetos e de aprimorar os tratamentos, por meio do desenvolvimento de tecnologias que priorizem o meio ambiente, melhorando a qualidade de vida, e, ainda tornado o reuso como fonte alternativa de recurso renovável.

O sistema de tratamento de esgoto baseado na técnica de lodos ativados é amplamente utilizado, em nível mundial. Com base no site [www.o2engenharia.com.br](http://www.o2engenharia.com.br), as fases sólida, líquida e gasosa são separadas por meio de um fluxo ascendente de esgoto que passa por um leito de esgoto denso e de grande atividade. Nesse leito ocorre a estabilização anaeróbia da matéria orgânica. Acima do leito, dispositivos são utilizados para que ocorram a separação dos gases e a sedimentação dos sólidos. É no Reator Anaeróbico de Fluxo Ascendente

(RAFA), também referenciado como “*Upflow Anaerobic Sludge Blanket*” (UASB), que acontece uma digestão anaeróbica, gerando gás metano e lodo anaeróbico. Por fim, o resíduo final é enviado às centrifugas e posteriormente lançado em caçambas enviadas ao aterro sanitário.

O destino final do resíduo sólido oriundo deste processo tem preocupado ambientalistas. Com base nessas preocupações, algumas aplicações para esse material têm sido pesquisadas, como, por exemplo, a produção de biogás, de fertilizantes, de vapor para produção energética, e mesmo como material para a construção civil.

Segundo Fonseca (2010), a indústria da construção civil vem utilizando vários tipos de resíduos que podem ser incorporados à argamassa e ao concreto, na forma de cimento Portland composto, aditivo mineral, ou como material de enchimento (“filler”). Os resíduos que possuem atividade pozzolânica ou cimentante podem ser utilizados como substituto parcial do cimento, como, por exemplo, a cinza de casca de arroz, garantindo as suas propriedades físicas e químicas.

O Sindicato Nacional da indústria do cimento (SNIC) informa que as indústrias do cimento são responsáveis por 5% das emissões de CO<sub>2</sub> decorrentes da descarbonatação do calcário (CaCO<sub>3</sub>), quando incinerado juntamente com as argilas, para a formação do clínquer. Destaca ainda que a produção mundial de cimento Portland no ano de 2004 foi da ordem de 2188,6 milhões de toneladas. No Brasil, foram produzidos 36,7 milhões de toneladas de cimento Portland no ano de 2005 (SNIC, 2005).

Deste modo, o concreto com resíduo de lodo ativado poderia estar relacionado à uma solução ambiental, se associado à crescente demanda na construção civil, podendo ser usado no manufaturamento de blocos, como filler, ou como um substituto parcial do cimento no concreto e na argamassa (MONZÓ *et al.* 1996).

Sendo assim, há muitos argumentos a favor do tema deste trabalho, quando se trata de concreto sustentável, atenuando o impacto ambiental, diminuindo custos e praticando a sustentabilidade.

## 1.2 OBJETIVOS

O objetivo desta pesquisa está direcionado para a caracterização da Cinza de Lodo de Águas Residuárias (CLAR) por meio das seguintes etapas: coleta de amostras, secagem, moagem, calcinação por diferentes temperaturas e ensaios laboratoriais. Os ensaios que foram realizados são: teste preliminar de reatividade pozolânica, granulometria por difração a laser, perda de massa em relação ao fogo, teor de cloretos, teor de resíduos Insolúveis, Difração de raios-X, Fluorescência de raios X, Termogravimetria e Microscopia eletrônica de Varredura.

A proposta é a de se buscar alternativas no que se refere à redução de uso de recursos naturais e reutilização desses resíduos, que são gerados em abundância.

Deste modo, com base nos resultados obtidos, foi possível verificar o potencial pozolânico da CLAR.

## 1.3 APRESENTAÇÃO DO TRABALHO

A presente pesquisa é apresentada em seis capítulos descritos a seguir.

No primeiro capítulo, apresentam-se uma visão geral do trabalho desenvolvido, a introdução e os objetivos.

O segundo capítulo trata da revisão bibliográfica relacionada ao funcionamento de uma UASB e à caracterização e aplicação do lodo de águas residuais.

O terceiro capítulo trata da descrição dos materiais e da metodologia que foram utilizados na realização deste trabalho.

No quarto capítulo, são apresentados os resultados obtidos.

No quinto capítulo, apresentam-se as conclusões obtidas e sugestões para o prosseguimento da pesquisa.

O sexto capítulo trata das referências bibliográficas.

No anexo, apresentam-se os relatórios de alguns dos ensaios realizados.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 LODO DE ESGOTO

O material que chega a uma Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) pode ter sido gerado por meio de três fontes distintas: esgoto doméstico, água de infiltração e despejos industriais. O esgoto doméstico é proveniente das residências, do comércio e das repartições públicas; as águas de infiltração são as que penetram na rede coletora de esgoto através de juntas defeituosas das tubulações e paredes de poços de visita; e, por fim, os despejos industriais são os efluentes das indústrias (VON SPERLING, 1996).

Os esgotos domésticos contêm aproximadamente 99,9% de água; a outra fração restante (0,1%) inclui sólidos orgânicos e inorgânicos, em suspensão e dissolvidos, bem como micro-organismos, e constitui a causa da necessidade de tratamento do esgoto (VON SPERLING, 1996).

O lodo de esgoto é um termo usado para designar os resíduos sólidos provenientes do tratamento convencional de esgoto, sendo que o mesmo se caracteriza por apresentar minerais, colóides e partículas oriundas de matéria orgânica decomposta em suspensão e dissolvida no meio aquoso, além de metais pesados, agentes patogênicos e contaminantes orgânicos altamente prejudiciais ao homem e ao meio ambiente em geral (PAULA JUNIOR et al., 2005; SPERLING; GONÇALVES, 2001). Embora de o lodo seja constituído por praticamente 95% de água, ele é considerado como sendo uma fase sólida (ANDREOLI et al., 2001)

A disposição adequada do esgoto sanitário pode evitar a transmissão de variadas doenças, sendo essencial à proteção da saúde pública e do meio ambiente (NUVOLARI, 2003).

A necessidade de uma disposição tanto econômica como ecologicamente correta para o lodo de esgoto tem provocado a realização de vários estudos sobre o tema (PILLAR et al., 2009).

Algumas maneiras de disposição final do lodo de esgoto são: aterro sanitário, uso agrícola, recuperação de áreas degradadas, incineração e disposição oceânica (FONTES, 2008).

Outra solução para os problemas gerados poderia ser a reciclagem desses resíduos, utilizando-os na construção civil, que, por sua vez, chega a consumir até 75% de recursos naturais (JOHN, 2000; LEVY, 1997; PINTO, 1999).

O lodo tem uma importância maior por ser um resíduo de difícil tratamento e disposição final, face às grandes quantidades que são geradas, à dificuldade em se encontrar locais adequados para a sua disposição final, à distância de transporte, aos impactos ambientais, dentre outros (JORDÃO; PESSÔA, 1995).

A produção de materiais cerâmicos menos nobres, como, por exemplo, os tijolos, tem sido uma das alternativas para o uso de diversos resíduos industriais, e, mais recentemente também para resíduos do tratamento dos esgotos sanitários (SAITO et al., 1996).

Cheeseman e Viridi (2005) mencionam que a produção de agregado leve na Dinamarca é potencialmente viável, os custos de disposição da cinza proveniente da incineração do lodo de esgoto em aterros sanitários estão aumentando a cada dia devido ao rigor das leis ambientais. Outro fator que acentua essa potencialidade é a escassez de agregados naturais em algumas regiões, bem como os impostos cobrados por cada tonelada de agregado natural extraído.

## 2.2 REATOR ANAERÓBICO DE FLUXO ASCENDENTE (RAFA)

Von Sperling (1996) classifica o tratamento de esgoto através dos seguintes níveis:

- a) tratamento preliminar: objetiva apenas a remoção de sólidos grosseiros;
- b) tratamento primário: visa à remoção de sólidos sedimentáveis e parte da matéria orgânica, utilizando-se basicamente de mecanismos físicos;
- c) tratamento secundário: predominam mecanismos biológicos, com objetivo principal de remoção de matéria orgânica e de nutrientes (nitrogênio e fósforo);
- d) tratamento terciário: objetiva a remoção de poluentes específicos (usualmente tóxicos ou compostos não biodegradáveis), ou, ainda, a remoção complementar de poluentes não suficientemente removidos no tratamento secundário.

Os sistemas de tratamento de esgotos sanitários por Lodos Ativados têm sido cada vez mais utilizados, principalmente em grandes centros urbanos, pois permitem que se tratem grandes quantidades de esgoto em uma pequena área (ANDREOLI; PEGORINI, 1999).

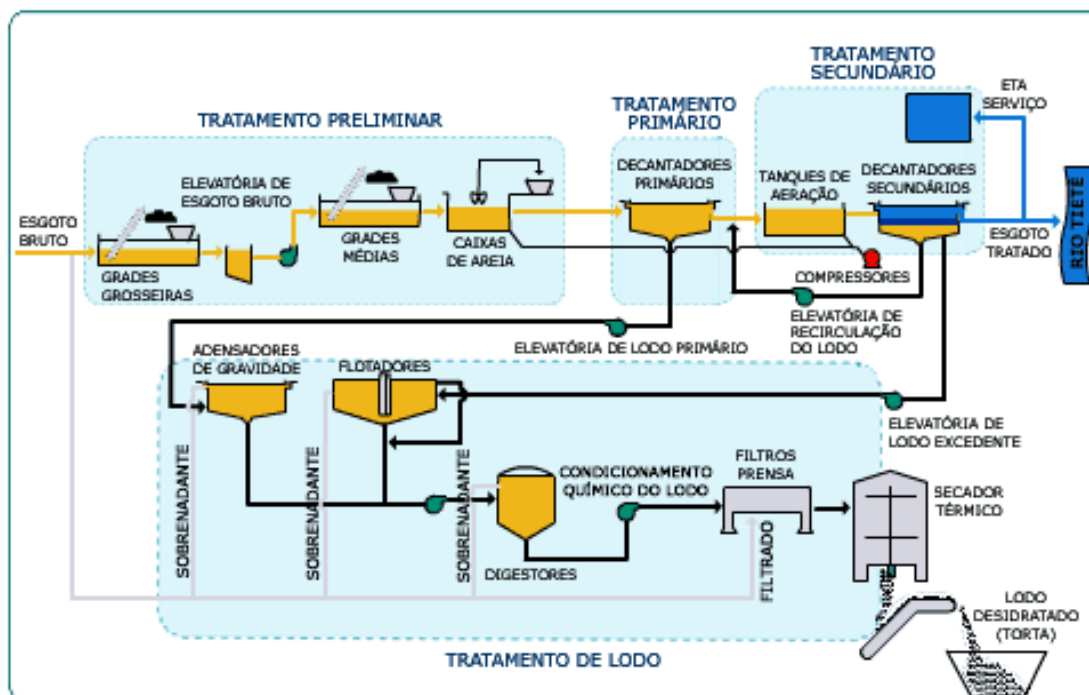
A Figura 2.1, extraída de Von Sperling (1997), mostra o esquema de uma Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) por lodo ativado. Conforme o autor, o processo de fermentação anaeróbia é uma das melhores alternativas para o tratamento de produtos altamente poluidores, como, por exemplo, resíduos industriais, esgoto doméstico, lixo urbano, vinhoto e resíduos animais, convertendo-os em produtos úteis como o metano e biofertilizantes. O processo de digestão anaeróbia beneficiou-se, nas últimas décadas, de importantes avanços no conhecimento de seus fundamentos, notadamente na microbiologia do processo e na concepção dos reatores.

Conforme Guillen (2012), considerando-se os sistemas mais utilizados para o tratamento de esgotos domésticos e efluentes industriais, observa-se um aumento considerável no uso de Reatores Anaeróbios de Fluxo Ascendentes (RAFA), também conhecidos por outras denominações, como por exemplo, pelo termo UASB (em inglês Upflow Anaerobic Sludge Blanket).

Segundo Lettinga (1980), as águas residuárias são distribuídas em tanques onde o efluente passa por uma manta anaeróbica. Durante esta passagem, microorganismos entram em contato com essas águas, provocando um processo de degradação anaeróbica que resulta na produção de biogás ( $\text{CH}_4$  e  $\text{CO}_2$ ). As bolhas de gás que são geradas percorrem um trajeto ascendente e são liberadas na parte superior do reator; já a fase aquosa e os sólidos geram o lodo apto para a próxima fase, ou seja, a de centrifugação, conforme a Figura 2.2.

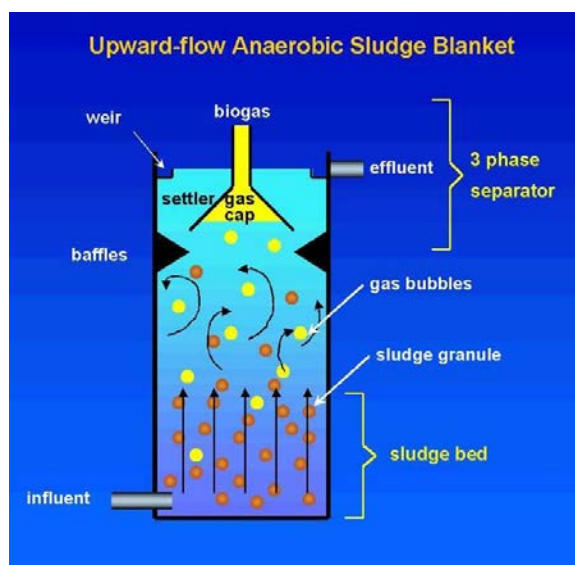
A remoção de matéria orgânica é feita nos reatores. No decantador secundário é onde a biomassa é separada e onde há a sedimentação dos microorganismos; nessa etapa produz-se o lodo e a realiza-se a sua recirculação. Todo esse processo de digestão anaeróbica necessita de um controle rigoroso das condições ambientais, ou seja, da temperatura adequada e do pH, uma vez que o desempenho da degradação depende da demanda das bactérias. O tempo de retenção do lodo também é um fator importante, pois, quanto maior a sua retenção, mais completa é a remoção do material orgânico. Nesse sistema de lodo ativado convencional, o lodo excedente deve sofrer tratamento diferenciado, usualmente passando por adensamento, digestão e desidratação, e, por fim, centrifugação (VON SPERLING 1997).

Figura 2.1- Esquema usual de uma ETE.



Fonte: Von Sperling (1997)

Figura 2.2 - Esquema de uma UASB

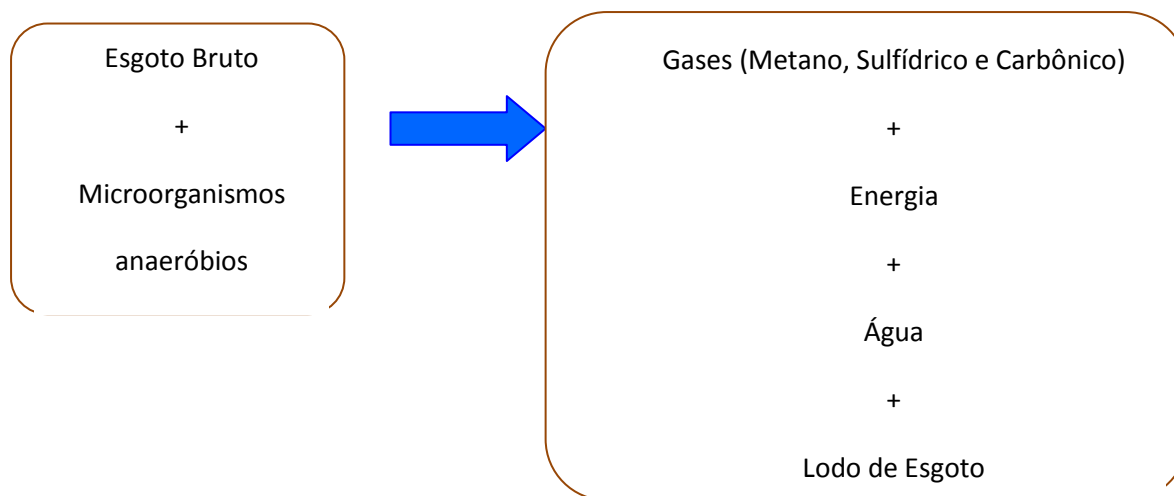


Fonte: Lettinga (1980)

A Figura 2.3 apresenta o esquema simplificado da evolução do Tratamento de esgoto e sua liberação de biogás.



Figura 2.3 - Esquema de um tratamento de esgoto em uma UASB



Fonte: Elaborado pela própria autora.

De acordo com Von Sperling (2001), o sistema de lodos ativados é muito utilizado, em nível mundial, para o tratamento de águas residuais domésticas e industriais, em situações nas quais elevadas qualidades do efluente é necessária e a disponibilidade de área é limitada. Como desvantagens, esse sistema exige cuidados especiais na sua operação, bem como um maior consumo de energia elétrica, utilizada para a aeração e produção de lodo. Outra vantagem dos processos anaeróbios é que eles reduzem o volume dos resíduos, estabilizam os mesmos, e produzem biogás, com baixo ou nenhum consumo de energia, mantendo a qualidade do efluente (RITA, 2002).

## 2.3 SISTEMA DE TRATAMENTO DE ESGOTO DE SÃO JOSÉ DO RIO PRETO (SEMAE)

Por meio de uma visita técnica à Estação de Tratamento de Esgoto da cidade de São José do Rio Preto-SP, em agosto de 2012, acompanhada pelo Químico responsável Rafael Nava Miceli, foram obtidas as informações apresentadas neste item.

As instalações do Sistema de Tratamento de Esgoto da cidade de São José do Rio Preto (SEMAE) estão em operação desde janeiro de 2009, tendo sido obtida a licença de operação junto à CETESB em fevereiro de 2011 (Figura 2.4).

As instalações foram projetadas em duas fases. Sua concepção foi feita pensando-se em módulos que pudessem ser implantados e posteriormente ampliados de modo a suprir a demanda do crescimento vegetativo até 2028, no qual a cidade teria aproximadamente 585.000 habitantes e vazão média de 1.340 litros por segundo. Além da expansão populacional, o projeto prevê mudanças futuras nas legislações ambientais, tornando-as mais rigorosas, especialmente no que se refere à remoção de nitrogênio e fósforo.

Figura 2.4 - Instalações do SEMAE



Fonte: SEMAE (2012)

A Estação de Tratamento de Esgoto da cidade de São José do Rio Preto (ETE) está localizada na Bacia Hidrográfica do Turvo/Grande (UGRHI 15) e despeja seus efluentes tratados no Rio Preto. Um dos condicionantes ambientais do projeto, proposto no Plano Diretor elaborado pela FIPAI (Fundação para o Incremento da Pesquisa e do Aperfeiçoamento Industrial), vinculada à USP de São Carlos, é o reenquadramento do Rio Preto, que passaria de Classe 4 à montante do lançamento da ETE Rio Preto, para Classe 3 à jusante. Para tanto, o projeto deveria contemplar uma estação com alta eficiência de remoção de matéria biodegradável, além da manutenção de níveis mínimos de oxigênio dissolvido quando do lançamento no corpo receptor (96% e 5,0 mg/L, respectivamente).

O processo de tratamento de esgotos utilizados na ETE Rio Preto é exclusivamente biológico sendo realizado em duas etapas: (1) anaeróbia que ocorre nos reatores UASB, e (2)

aeróbia, que ocorrem nos tanques de lodo ativado. Esta associação, ainda segundo o estudo da FIPAI, é até 40% mais econômica do que apenas o tratamento aeróbio em tanques de lodo ativado por aeração prolongada, considerando-se o gasto com energia elétrica junto aos sopradores e a disposição do lodo gerado no processo.

O esgoto chega à estação pelos interceptores que margeiam o Rio Preto, conduzindo 98% do esgoto gerado no município para a primeira unidade do tratamento, chamada Estação Elevatória de Esgoto Bruto (EEEB). Esta unidade conta com um poço para equalização de vazão, tendo em vista as variações horárias na geração dos esgotos domésticos (Figura 2.5).

Na EEEB, o esgoto sofre um processo de gradeamento grosso, para remoção de sólidos grosseiros com diâmetro maior que 40 mm. Os resíduos são então levados à uma caçamba por uma esteira rolante para posterior remoção ao aterro sanitário, conforme Figura 2.6.

Figura 2.5 - Detalhe do poço de equalização



Autor: Melges (2012)

Figura 2.6 – Dispositivos usados no procedimento de remoção de sólidos grosseiros



Fonte: Melges (2012)

A remoção desses sólidos é de extrema importância, uma vez que os mesmos poderiam danificar as bombas elevatórias que impulsionarão o esgoto para a próxima unidade (Figura 2.7). A partir dessa unidade, a de Tratamento Preliminar, todo o processo de transporte do esgoto é feito por gravidade.

Figura 2.7- Estação Elevatória de esgoto bruto



Fonte: Rosa (2012)

Uma vez bombeado até o Tratamento Preliminar, o esgoto passa por um gradeamento fino (Figura 2.8), cujo espaçamento é igual a 3 mm, para retenção de materiais mais finos, como plásticos, embalagens, bitucas de cigarro, entre outras coisas, visando impedir e amenizar o potencial de obstrução que estes materiais apresentam nas canalizações subsequentes .

Figura 2.8 - Gradeamento fino



Fonte: Melges (2012)

Após o gradeamento, há um sensor para medição do pH (Figura 2.9).Esse equipamento é um instrumento de segurança para detectar despejos ácidos que possam provocar danos aos processos biológicos de tratamento posteriores.

Figura 2.9 - Medidor de PH



Fonte: Melges (2012)

A medição de vazão é realizada na calha Parshall, por meio de um sensor de nível ultrassônico. As águas residuárias são então direcionadas para dois desarenadores (Figura 2.10). O tempo de retenção hidráulica (TRH) nas caixas é baixo, cerca de 3 minutos, visando à sedimentação de areia, mas não o suficiente para deposição de matéria orgânica, que poderia ocasionar mau cheiro.

Figura 2.10 – Desarenadores: cheio e vazio



Fonte: Melges (2012)

Após as operações unitárias do setor de Tratamento Preliminar, o esgoto é submetido à digestão biológica. Esta se processa primeiro nos reatores anaeróbios de fluxo ascendente (UASB), nos quais o esgoto é distribuído por tubulações na base do reator, atravessando uma manta de lodo, durante a qual sofre a digestão (Figura 2.11).

Figura 2.11 - Reatores UASB



Fonte: Rosa (2012)

A eficiência deste tratamento é de cerca de 40 a 50%, gerando como principais subprodutos o gás metano, característico da decomposição anaeróbia de efluentes e que é queimado, e o lodo anaeróbio, que, posteriormente, é submetido a um processo de centrifugação (Figura 2.12).

Figura 2.12 - Produção de gás metano, que é queimado, e de lodo anaeróbio.



Fonte: Melges (2012)

O esgoto, após o processo anaeróbio, é conduzido para os tanques de aeração (Figura 2.13), onde sofrerá polimento final via oxidação aeróbia da matéria orgânica remanescente. Neste caso, flocos biológicos de elevada atividade decompositora irão consumir a matéria orgânica residual do tratamento anaeróbio.

Figura 2.13 - Tanque de Aeração



Fonte: Melges (2012)

O efluente do tanque de aeração (licor misto) já conta com remoção de contaminantes da ordem de 95-98%, mas os flocos bacterianos gerados na decomposição ainda estão dispersos no meio líquido, devendo ser separados para que não atinjam o corpo hídrico receptor. Para tal separação, utilizam-se decantadores, também conhecidos como clarificadores secundários, nos quais o licor misto entra no centro do tanque circular, sendo coletado nas extremidades já separado dos sólidos (Figura 2.14). No fundo dos decantadores ficam retidos os flocos biológicos por sedimentação que são direcionados à Estação Elevatória de Recirculação de Lodo (EERL), para recircular no sistema, garantindo assim que o tempo de permanência dos flocos biológicos no interior do sistema seja bastante superior ao do próprio esgoto. Os reatores anaeróbios atuam, portanto, também como biodigestores do lodo aeróbio.

Figura 2.14 - Decantador



Fonte: Thiago (2012)

Uma vez separados os flocos biológicos do esgoto já tratado, o efluente final é direcionado ao tanque de pós-aeração, no qual é submetido a dois processos: desinfecção e pós-aeração. A desinfecção consiste na dosagem de cloro-gás, como agente desinfetante, visando eliminar agentes microbiológicos que transmitam doenças de veiculação hídrica e que não foram inativados no decorrer do tratamento. A pós-aeração visa garantir níveis ótimos de oxigênio dissolvidos iguais ou superiores a 5mg/L, essenciais ao desenvolvimento da vida aquática, em especial á fauna. Parte do efluente final é direcionada à Estação de Tratamento de Água de Serviço (ETA), que tem por objetivo gerar água de reuso, cujo padrão de qualidade está distante dos previstos na Portaria 518 do Ministério da Saúde, que versa sobre potabilidade de água, mas que ainda assim possui amplo emprego na estação, seja na



lubrificação de bombas, dosagem de cloro por sistema Venturi, rega de jardins, além da própria limpeza de todas as unidades, mostrado na Figura 2.15.

Figura 2.15 - Água pronta pra resuso



Fonte: Thiago (2012)

Voltando ao lodo, cuja coleta é feita após o tratamento anaeróbio, já mostrado na figura 2.12, o mesmo é conduzido à Estação Elevatória de Lodo (EEL) para a etapa de centrifugação (Figura 2.14a), onde é feita a adição de um polímero químico para que ocorra a floculação. Após esta etapa, o lodo fica em forma de “torta”, que é lançada em caçambas que são destinadas a um aterro sanitário (Figura 2.16).

Figura 2.16 – Torta em caçambas



2.16 a) Estação Elevatória de Lodo



2.16 b) “Torta” de lodo lançada em caçambas

Fonte: Melges (2012)

## 2.4 CARACTERIZAÇÃO DA CINZA DO LODO DE ÁGUAS RESIDUÁRIAS (CLAR)

Conforme Geyer et al.(1995), as cinzas são torrões bastante friáveis e de coloração avermelhada. Os autores mencionam a possibilidade de que a cor possa ser decorrente da presença de óxido de ferro. Algumas partículas são brilhantes, demonstrando a presença provável de quartzo ou mica.

Saito et al. (1996) e Cusidó et al. (2011) mencionam que o uso do lodo sanitário para fabricação de tijolo é uma boa alternativa, por ser este um resíduo viável e interessante. Cusidó et al. (2011) mostram que o lodo pode ser incorporado em torno de 5% a 25% na fabricação de tijolos prensados. A coloração avermelhada, devida à presença de óxidos de ferro, é mais clara se comparada à coloração dos tijolos comuns e à argila.

Segundo Monzó et al. (1996), estudos sobre as Cinzas de Lodo de Águas Residuárias (CLAR) mostram que as partículas das cinzas não são esféricas; são irregulares se comparadas às partículas do cimento comum, mostrando um efeito negativo na trabalhabilidade das argamassas; ou seja, quanto maior as partículas, menor a trabalhabilidade. As cinzas se comportam como um material que pode proporcionar um aumento da resistência à compressão. Altos teores de enxofre (12.4%) nas cinzas não diminuíram a resistência à compressão de argamassa. Quanto menor a granulometria das cinzas, melhor a reatividade pozolânica. Os ensaios de flexão mostram que não houve alterações na resistência das amostras. Para um teor de substituição de 15% de cinzas de lodo de águas residuárias (CLAR) por cimento comum, Monzó et.al (1996) observaram acréscimos de resistência a compressão para as diferentes frações granulométricas de CLAR, em relação à mistura de referência.

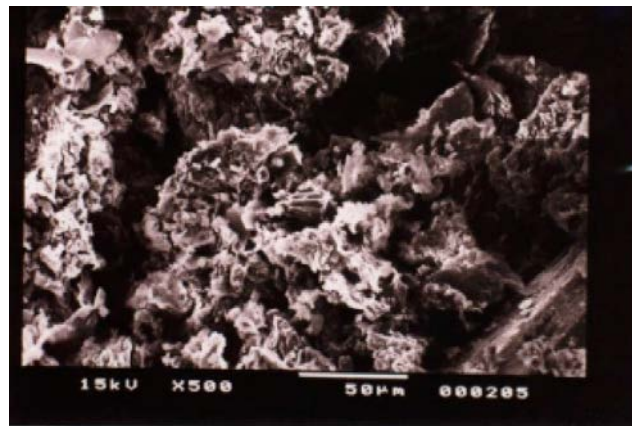
Conforme Tay e Show (1997), a disposição do lodo do processo de tratamento de águas residuárias apresenta problemas cada vez mais difíceis para as cidades altamente urbanizadas. A incineração pode ser uma solução alternativa viável para a eliminação do lodo, gerando um volume reduzido de cinzas inodoras e inorgânicas. A viabilidade do reuso das cinzas misturado na cal, visando um material cimentício após incineração foi estudada, e as propriedades do cimento feito a partir do lodo foram investigadas. A avaliação da resistência à compressão de cubos de argamassa indicou que é possível a produção de cimento a partir de

lodo que satisfaça os requisitos de resistência conforme a norma da ASTM para o cimento de alvenaria.

A Cinza de Lodo de Esgoto (CLE), ou também definida a partir deste ponto como Cinza de Lodo de Águas Residuárias (CLAR), é a cinza resultante do processo de incineração do lodo, que normalmente ocorre a temperaturas entre 550°C e 950°C (GEYER, 2001).

Geyer (2001) destaca que, após incineração na mufla, há uma perda significativa de matéria sólida resultando num percentual em torno de 33% a 34%. As amostras de lodo calcinadas a uma temperatura de 550°C foram analisadas por meio de ensaio de microscopia de varredura eletrônica com ampliação de 500 vezes. O autor observou, que as suas partículas das cinzas são mais angulares que arredondadas (Figura 2.17), o que as torna mais suscetíveis a se quebrarem e ainda que a matriz seja capaz de reter os compostos nocivos presentes no resíduo.

Figura 2.17- Microscopia da cinza, após calcinação a 550°C.



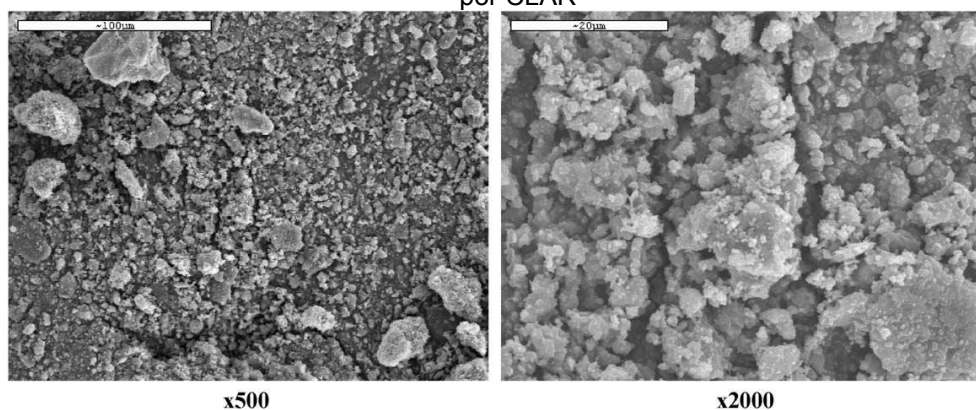
Fonte: Geyer (2001)

Durante o processo de incineração, os sólidos voláteis são convertidos em gás carbônico e água; já os sólidos fixos são transformados em Cinza de Lodo de Águas Residuárias (CLAR). A incineração tem como principal vantagem a redução do volume de lodo, obtendo-se, por este processo, um volume correspondente de 10 a 20% do volume total. Em contrapartida, durante o processo de decomposição, apesar dos organismos patogênicos e compostos orgânicos tóxicos serem eliminados, os metais pesados permanecem incorporados às cinzas, e, portanto, torna-se necessária uma disposição final adequada para as mesmas (TSUTIYA, 2001).

Tay e Show (2002) realizaram estudos na tentativa de reaproveitar o resíduo do lodo como material cimentício: o lodo digerido e desidratado foi misturado com a cal e em seguida passou por vários processos de queima, moagem e peneiramento, até ser transformado em um cimento biológico que foi denominado de “Bio-cimento”. Este novo “bio-cimento” substituiu parcialmente o cimento Portland usado na produção de argamassas e de concreto.

Estudos realizados por Monzó et al. (2003) avaliaram a substituição parcial do cimento Portland por Cinza de Lodo de Águas Residuárias (CLAR). Os autores observaram uma diminuição de trabalhabilidade, sendo que esta diminuição pode ser explicada por dois fatores: a morfologia irregular das partículas e a alta absorção de água em nas superfícies de partículas de CLAR (Figura 2.18).

Figura 2.18 - Microscopia de varredura eletrônica de argamassa com substituição de 30% de cimento por CLAR



Fonte: Monzó et al. (2003)

Estudos realizados por Pan et al. (2003) mostram a influência da finura das cinzas do lodo sobre as propriedades das argamassas. Nesta pesquisa, os autores utilizaram a moagem mecânica para obtenção de cinzas com finura de 500 a 1000  $m^2/kg$ . Estas cinzas substituíram 20% do cimento Portland. Os autores observaram que quando a finura é aumentada, surge um efeito lubrificante que aumenta a trabalhabilidade das argamassas. Além disso, a atividade pozolânica das cinzas e a resistência à compressão da argamassa aumentam em virtude da diminuição do tamanho das partículas. Estes resultados mostram que a aplicação de moagem mecânica para ajustar a finura das partículas é uma ação eficaz para melhorar as propriedades da argamassa.

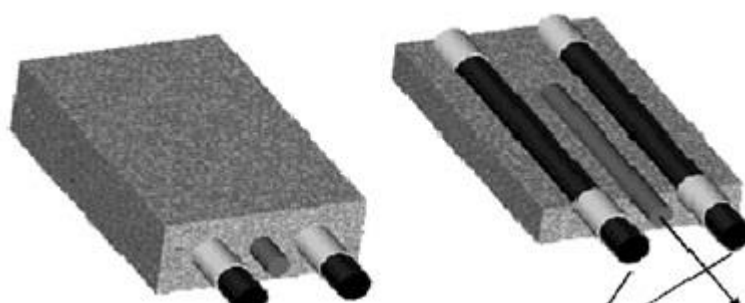
O termo Concreto Ecológico ou concreto verde refere-se ao concreto projetado para reduzir o impacto ambiental em comparação ao concreto tradicional. Assim, uma estrutura de concreto ambientalmente sustentável é aquela que é construída de modo a minimizar o

impacto ambiental, em vista do seu ciclo de vida. Uma das formas que estão sendo exploradas para o desenvolvimento do concreto verde é a adição de materiais provenientes de resíduos orgânicos que podem substituir, pelo menos parcialmente, as tradicionais matérias-primas (principalmente cimento e agregados), afetando minimamente as outras propriedades da mesma. Pérez et al. (2005) mencionam que a incorporação de cinzas no concreto de elementos pré-fabricado permitiu a redução do consumo de cimento e de areia fina.

Chiou et al. (2006) investigou o uso de resíduos de estações de tratamento de águas residuais na fabricação de materiais cerâmicos. Evitar a poluição secundária induzida por lodos e convertê-los em recursos úteis são temas que têm sido amplamente investigados. Os autores concluem que, tanto a argila expansiva, como as cinzas do lodo, individualmente ou combinadas entre si, podem produzir agregados leves.

Alcocel et al. (2006) realizaram estudos sobre os efeitos da adição de cinzas do lodo de depuradora em relação à corrosão de armaduras inseridas em argamassas de cimento Portland. Em argamassas onde é feita a substituição parcial de até 10% de cimento Portland por cinzas, o processo de corrosão não foi alterado quando comparado com argamassas comuns, além de apresentarem atividade pozolânica moderada (figura 2.19).

Figura 2.19 - Esboço da amostra para medições de corrosão



Fonte: Alcocel et.al. (2006)

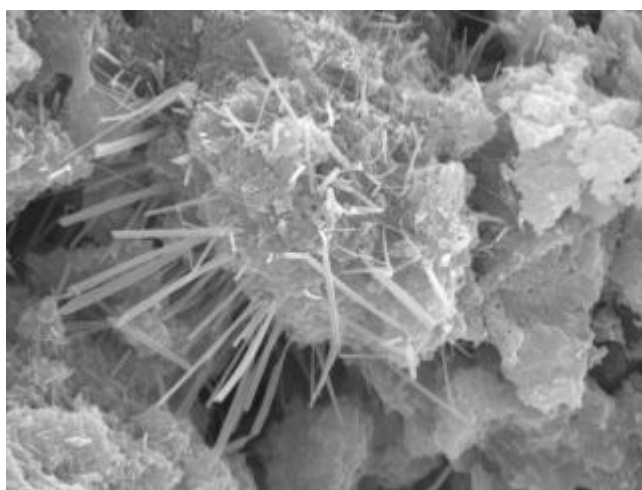
Fontes (2008) avaliou de aplicação das cinzas de lodo de esgoto e de resíduo sólido urbano como aditivo mineral na produção de concretos de alto desempenho, sendo estes da ordem de 60 MPa, bem como de argamassas. A autora realizou ensaios de caracterização físico-química, mineralógica e ambiental desses materiais, tendo também realizados ensaios físico-mecânicos e de durabilidade nos concretos e argamassas. Por apresentarem metais pesados em sua composição, ela também investigou o encapsulamento destes na microestrutura dos concretos através de ensaios ambientais de lixiviação e solubilização. A autora concluiu que a incorporação de cinzas de lodo de esgoto e de resíduo sólido urbano em argamassa em argamassas e concretos de alto desempenho proporcionou melhor desempenho

físico-mecânico e de durabilidade do material quando comparados às suas respectivas referências. Do ponto de vista ambiental, os materiais apresentaram comportamento satisfatório no que diz respeito à imobilização dos metais pesados no interior da matriz cimentícia. O elevado índice de atividade pozolânica do material, proporcionado pela sua granulometria e teor de amorfos, contribuíram para melhorar o desempenho dos concretos de alto desempenho.

Garcés et al. (2008) estudaram a incorporação das cinza de lodo em argamassas, visando verificar a sua trabalhabilidade, resistência mecânica, expansão e porosidade. Foram adicionadas 10% de cinzas de lodo de esgoto ao cimento, seguindo-se a norma europeia para a verificação da satisfação às exigências de resistência inicial, tração e compressão. A resistência das argamassas contendo cimento e adição das cinza de lodo é superior à da argamassa elaborada com cimento sem adições minerais. Destaca-se que estas são mais caras e comprometem mais o meio ambiente que aquelas.

Estudos realizados por Payá et al. (2011), no desenvolvimento de argamassas com substituição de 30% de cimento por cinzas, constataram que as cinzas apresentaram uma grande atividade pozolânica, além de fornecer um bom comportamento em relação à resistência mecânica. Estudos de microscopia eletrônica (figura 2.20) foram realizados em pastas de cimento, onde foi observada a formação de etringita.

Figura 2.20 - Microscopia de varredura eletrônica para argamassas com 30% de substituição de cimento por cinzas de lodo de águas residuais



Fonte: Payá et al. (2011)

Pan et al. (2012) fizeram estudos sobre as cinzas dos lodos de águas residuárias de indústrias químicas e de papel. Resultados dos testes de lixiviação de tijolos elaborados com

este material mostraram que os mesmos podem ser usados sem efeitos adversos à saúde humana. Deste modo, a indústria de materiais cerâmicos pode diminuir a exploração de matéria prima ao incorporar a cinza de lodo na fabricação de tijolos. No caso apresentado, para cada 200 tijolos por dia, 30 deles podem serem feitos com lodo.

Carrión et al. (2013) mencionam estudos realizados por Khanbilvardi e Ajshari (1995), e por Tay e Show (1997), sobre a possibilidade de substituir parte do agregado fino usado na fabricação de concretos por Cinzas de Lodo de Águas Residuárias (CLAR). Embora a resistência à compressão tenha sofrido uma diminuição de 20%, correspondente a uma substituição de 30% do árido fino por cinza, a resistência à flexão foi superior ao mínimo estabelecido pelo American Concrete Institute (ACI). Os autores mencionados por Carrión et al. (2013) concluem que a cinza não é um material expansivo, embora absorva umidade; além disso, apesar da análise química ter detectado a existência de sulfatos e cloretos, as suas respectivas concentrações foram baixas, sendo insuficientes para provocar efeitos negativos ao concreto. Ensaios de lixiviação realizados tanto no concreto fresco como no endurecido demonstraram que as cinzas são basicamente inertes na matriz.

Sendo assim, Carrión et al. (2013) estudaram a viabilidade de adicionar a CLAR em blocos de concreto pré-fabricados, utilizando misturas com substituição de agregado fino por CLAR em porcentagens de 5%, 10% e 15%, cujos resultados obtidos por meio de ensaios experimentais foram comparados aos de blocos de concreto sem substituição. Os autores chegaram às seguintes conclusões: o uso da cinza em escala industrial é possível e comercialmente viável; o uso de cinza, com uma porcentagem de substituição de areia por cinza em 15%, permite melhorar as características dos blocos em relação à sua resistência à compressão, sem prejudicar de modo significativo outras características, como, por exemplo, uma redução e um aumento significativos nos valores da densidade e da absorção capilar, respectivamente; a CLAR cumpre os requisitos de ser um material sustentável, permitindo reduzir o volume de material a ser descartado no meio ambiente, e podendo ser considerado como uma matéria prima para a fabricação de blocos de concreto. Na figura 2.21, apresenta-se o equipamento usado para a fabricação dos blocos.

Figura 2.21 - Equipamento usado para a fabricação de blocos de cimento



Fonte: Carrión et al. (2013)



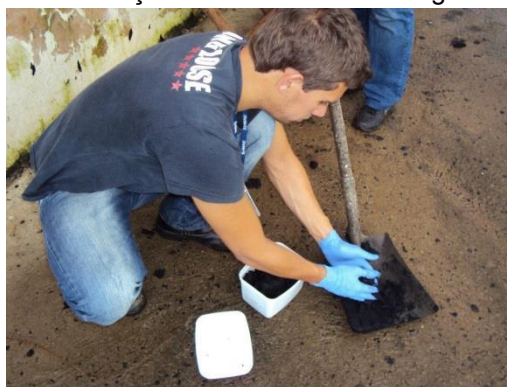
### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

Descrevem-se, neste capítulo, os materiais e métodos utilizados para a preparação das amostras e sua caracterização. O objetivo é adequar a cinza de lodo de águas residuárias a uma condição que permita sua aplicação como um material que possa apresentar propriedades pozolônicas. As atividades relatadas neste capítulo foram desenvolvidas no Laboratório Central de Engenharia Civil, no Departamento de Física e Química, ambos da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP), no Laboratório CESP de Engenharia Civil, e no Instituto de Ciencia y Tecnología del Hormigón (ICITECH), da Universidade Politécnica de Valência (UPV), na Espanha.

Foram produzidas cinzas a partir do lodo coletado na Estação de Tratamento de Esgotos, que é operada pelo Serviço Municipal Autônomo de Água e Esgoto (SEMAE), na cidade de São José do Rio Preto-SP (figura 3.1).

A cinza foi designada a partir deste ponto como CLAR, que corresponde ao termo “Cinza de Lodo de Águas Residuárias”. Este material foi produzido por meio de uma mufla, que calcinou o lodo a uma temperatura controlada de 650°C, pelo período de 2 horas. Inicialmente, também foram realizadas calcinações para outras temperaturas e para outro período de tempo, de modo a quantificar a perda de massa para cada situação.

Figura 3.1- Coleta do lodo na Estação de Tratamento de Esgoto de São José do Rio Preto



Fonte: Thiago (2012)

### 3.1 TRANSPORTE E PROCEDIMENTOS PARA SECAGEM DO LODO DE ÁGUAS RESIDUÁRIAS

Amostras do lodo de águas residuárias foram colocadas em potes plásticos que, por sua vez, foram colocados em caixas térmicas, visando garantir as características e propriedades da amostra coletada (figura 3.2). Posteriormente, essas caixas foram transportadas para o Laboratório Central de Engenharia Civil, na Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, da Universidade Estadual “Júlio de Mesquita Filho”.

Para eliminar o excesso de umidade, as amostras foram colocadas em uma estufa, a uma temperatura de 100°C. Foram registradas as perdas de massa após 24 horas (figura 3.3).

Figura 3.2 - Identificação da amostra e equipamentos usados no transporte de São José do Rio Preto à Ilha Solteira



Fonte: Thiago (2012)

Figura 3.3 - Equipamentos usados no processo de secagem da amostra



a) Estufa

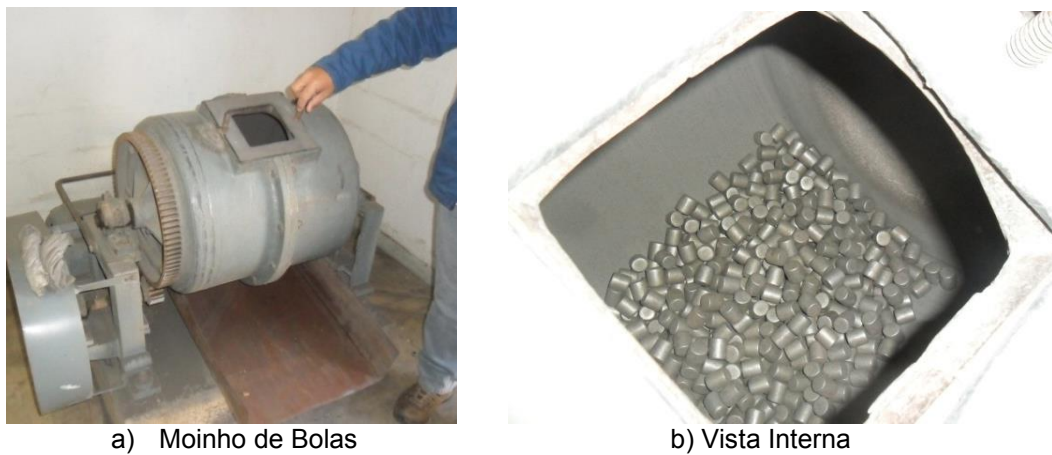
b) Amostra seca

Fonte: Melges (2012).

## 3.2 MOAGEM DO MATERIAL SECO

Após o material ter sido seco na estufa, ele foi triturado, com intenção de se obter um material mais fino. Foi utilizado um moinho de bolas, pertencente ao Laboratório CESP de Engenharia Civil (figura 3.4). O tempo de moagem foi de 50 minutos. A figura 3.4 mostra o aspecto do lodo seco após ter sido passado pelo moinho de bolas. Destaca-se que 100% do material triturado pelo moinho passou pela peneira ABNT 30, com abertura de malha de 0,59 mm. (figura 3.5). A moagem teve por objetivo obter materiais que atendessem à finura exigida pela NBR 12653 (ABNT, 2012) para materiais pozolânicos. Essa norma estabelece um limite máximo de 34% para o material retido na peneira de abertura de malha de 45  $\mu\text{m}$ .

Figura 3.4 - Moinho de Bolas



Fonte: Melges (2012).

Figura 3.5 - Aspecto do material triturado



Fonte: Melges (2012)

### 3.3 PROCEDIMENTOS DE CALCINAÇÃO

A figura 3.6 apresenta a mufla onde o material foi calcinado. A temperatura inicialmente estabelecida para realizar a queima foi de 650°C, pelo período de 2 horas. No entanto, outras temperaturas (550°C, 750°C, 850°C) e outro período de tempo (4h) também foram inicialmente testados.

Figura 3.6 - Equipamentos usados para queima



Fonte: Melges (2012)

### 3.4 TESTE PRELIMINAR DE REATIVIDADE POZOLÂNICA

A finalidade deste teste foi a de verificar a reatividade das cinzas misturas à cal hidratada  $\text{Ca(OH)}_2$  e à água, por meio da formação de compostos de silicato de cálcio hidratado e aluminato de cálcio, que provocam o endurecimento da pasta (Figura 3.7).

Foram elaboradas pastas com a CLAR calcinada a 650°C, a 750°C e a 850°C, pelo período de 2h, e que foram designadas pelas letras “a”, “b” e “c”, respectivamente.

As proporções de Cal/CLAR/Água utilizadas foram de 3:7:7. Três das misturas foram colocadas em um local com temperatura ambiente, da ordem de 25°C, e as outras três, em um banho térmico, com temperatura da ordem de 65°C para 3, 7, 14, e 28 dias de idade.

Figura 3.7 - Amostra da mistura de Água, Cal Hidratada e CLAR



Foto: Thiago (2013)

### 3.5 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO

Para que um material apresente características pozolânicas, ele deve, a princípio, ser um material fino, amorfo e possuir certa quantidade de sílica e alumina.

Visando a verificação da existência de algumas dessas características na amostra, foram realizados diversos ensaios: Granulometria, Perda ao Fogo, Teor de cloretos, Resíduos Insolúveis, Difração de Raios-X, Fluorescência de Raios X, Termogravimetria, e Microscopia Eletrônica de Varredura.

#### 3.5.1 Granulometria por Difração a Laser

Para a determinação da distribuição do tamanho de partículas da CLAR, foi utilizado o granulômetro a laser MasterSizer (2000), da Malvern Instruments, mostrado na figura 3.8.

Este equipamento possui a capacidade de medir o tamanho das partículas que esteja no intervalo entre 0,02 a 2000  $\mu\text{m}$ .

Maiores detalhes sobre o equipamento podem ser vistos em Orgeira (2011).

Este ensaio foi realizado nas instalações do ICITECH.

Figura 3.8 - Granulômetro a laser



Fonte: Melges (2013 )

### 3.5.2 Perda de Massa em Relação ao Fogo

Inicialmente, dois cadinhos de porcelana foram colocados em uma mufla, que foi aquecida até atingir uma temperatura de 950°C, permanecendo assim pelo período de 1 hora; posteriormente, após o resfriamento, os cadinhos tiveram os seus pesos determinados. Este procedimento teve como objetivo retirar toda a umidade e também a eliminar qualquer tipo de resíduo orgânico nos cadinhos.

Em seguida, acrescentou-se certa quantidade de material aos cadinhos, que foram novamente pesados.

Os cadinhos foram inseridos na mufla para realização da queima a 650°C durante 1 hora.

Após o resfriamento, os cadinhos foram pesados para que a perda de massa referente a esta temperatura pudesse ser calculada; a seguir, os cadinhos foram recolocados na mufla para que se pudesse realizar a queima a uma temperatura de 950°C, durante o período de 1 hora.

Após o resfriamento, os cadinhos foram novamente pesados para que a perda correspondente a essa temperatura, bem como a perda total de massa, pudessem ser calculadas. Este ensaio foi realizado nas instalações do ICITECH.

Figura 3.9 – Procedimento para Perda de Massa



a) Mufla.



b) Cadinhos de porcelana.

Fonte: Melges (2013)

### 3.5.3 Teor de Cloretos

Para a determinação dos cloretos inicialmente coleta-se 50g de água destilada em uma proveta graduada e pesa-se 1 g de CLAR em um béquer com graduação limite de 100 ml, conforme as figuras 3.10 e 3.11. Em seguida, utiliza-se a água para diluir a mistura.

Posteriormente, é feito um aquecimento, durante 1 hora, com temperatura alta levando à fervura. É necessário tampar o recipiente para que não haja perda de excessiva de vapor de água (Figura 3.12).

Em seguida, monta-se a bancada com suporte e funil de vidro (figura 3.13).

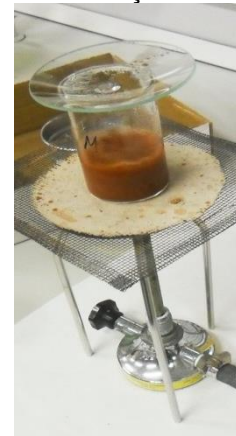
Figura 3.10- Proveta graduada



Figura 3.11- Pesagem do material



Figura 3.12 Aquecimento da solução



Fonte: Melges (2013)

Adiciona-se um pouco de água destilada aquecida para remover todo o material existente dentro do Becker, lembrando-se que o limite total de líquido não pode ultrapassar o limite de 100 ml, para que se respeite o limite do balão de vidro onde o líquido é colocado (figura 3.14). Caso necessário, pode-se adicionar água destilada até que se complete este limite. Deve-se tampar o balão e agitá-lo, virando-o por 2 vezes (figura 3.15). Deve-se, em seguida: pipetar 5 ml da solução, colocar em um erlenmeyer, e pipetar 3 gotas de cromato de potássio ( $K_2CrO_4$ ), conforme mostrado nas figuras 3.16 e 3.17.

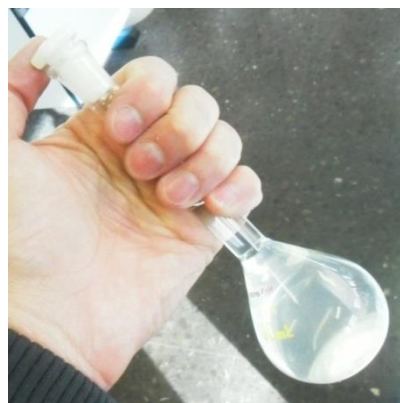
Figura 3.13- Dispositivo de filtragem



Figura 3.14- Balão volumétrico (100ml)



Figura 3.15- Agitação da solução



Fonte: Melges (2013)

Figura 3.16- Pipetagem de 5 ml da solução



Figura 3.17- Pipetagem de 3 gotas de cromato de potássio



Foto: Melges (2013)



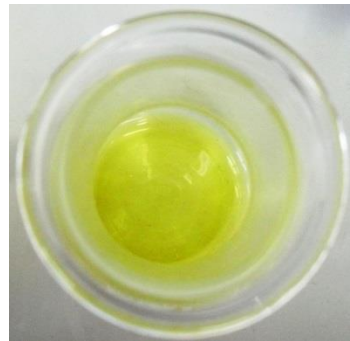
O cromato de potássio é usado como indicador da presença de íons cloreto ( $\text{Cl}^-$ ). Neste método, os cloretos são titulados usando-se uma solução padrão de nitrato de prata ( $\text{AgNO}_3$ ) de concentração de 0,0025 mol/l (figura 3.18).

O final da reação produz um precipitado de cor laranja, correspondente à cor do precipitado de cromato de prata ( $\text{Ag}_2\text{CrO}_4$ ), conforme mostrado nas figuras 3.19. Pelo processo estequiométrico é determinada a concentração de cloretos.

Figura 3.18 - Dispositivo de titulação de nitrato de prata



Figura 3.19- Colorações relacionadas à titulação



a) Coloração amarela antes da titulação



b) coloração laranja após a titulação

Fonte: Melges (2013)

O teor de cloreto é obtido por meio da seguinte expressão:

Teor de Cloretos (%) *na CLAR* =

$$= \text{Concentração molar de } \text{AgNO}_3 \text{ (mol/l)} \times \frac{\text{Vol. } \text{AgNO}_3 \text{ (l)}}{\text{Vol. Solução no Frasco (l)}} \times$$

$$\times \text{Vol. Solução no Balão (l)} \times \frac{\text{massa atômica Cl (g/mol)}}{\text{Massa Inicial da CLAR (g)}} \times 100$$

### 3.5.4 Resíduos Insolúveis

O procedimento de ensaio utilizado para determinar a quantidade de resíduos insolúveis na CLAR, definido pela norma europeia UNE-EN-196-2006, é apresentado a seguir.

- a) Determina-se o peso de aproximadamente 1g de material, registrando-se o peso real, em um béquer com capacidade para 400 ml (figura 3.18);
- b) Adiciona-se 25 ml de água destilada;
- c) Adiciona-se 40 ml de ácido clorídrico concentrado (marca PANREAC, 37%,  $HCl=36,46g/mol$ );
- d) Coloca-se o béquer em uma caixa de areia térmica e, com o calor, deve-se esperar até que o ácido evapore (figura 3.19);
- e) Adiciona-se 20 ml de ácido clorídrico concentrado e espera-se que o ácido evapore.
- f) Repete-se o procedimento mencionado no item e);
- g) Adiciona-se 100 ml de ácido clorídrico diluído na proporção 1:3, e faz-se o aquecimento da solução até próximo à temperatura de ebulição do ácido.

Figura 3.20- Pesagem do material



Figura 3.21- Aquecimento da solução com HCl na caixa de areia



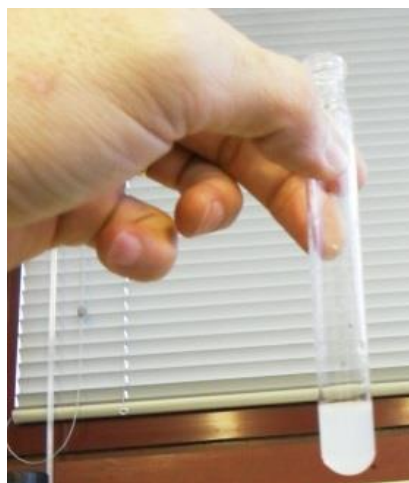
Fonte: Melges (2013)

- h) Quando a solução estiver aquecida, realiza-se o processo de filtração, utilizando-se o filtro Quali 42 ASHLESS, marca Whatman, com diâmetro de 150 mm (figura 3.22);
- i) Após a filtração, inicia-se o processo da eliminação do cloretos, adicionando-se água destilada aquecida no filtro;
- j) Após diversas lavagens, coloca-se um tubo de ensaio na saída do funil para recolher parte do líquido filtrado. Adiciona-se ao tubo 2 gotas da solução de  $\text{AgNO}_3$ , com concentração de 0,01mol/l. Caso a cor do líquido no tubo se torne branca, deve-se continuar com o procedimento de limpeza do cloreto; caso seja transparente, pode-se passar para a próxima etapa (figura 3.23);

Figura 3.22– Filtração após ataque com HCl



Figura 3.23 - Verificação da presença de cloro



Fonte: Melges (2013)

- k) Deve-se retirar o filtro de papel do funil e coloca-lo em um balão de ensaio e, em seguida, adicionar 100 ml de KOH, com concentração de 4mol/l (figura 3.24);
- l) Deve-se deixar a solução descansar pelo tempo de 16h;
- m) Em seguida, monta-se um aparato composto por um aquecedor onde será colocado o balão, e um condensador. Deve-se então aquecer a mistura, próxima à ebulição, pelo período de 4h.

Figura 3.24 – Balão com filtro e com solução de KOH



Figura 3.25 – Sistema de aquecimento e condensador



Fonte: Melges (2013)

- n) Em seguida, retira-se o filtro do balão, colocando-o dentro de outro filtro. Utiliza-se um pouco de água destilada para lavar o balão, despejando o seu conteúdo no novo sistema de filtragem.
- o) Adiciona-se 100 ml de ácido clorídrico diluído na proporção 1:9.
- p) Repete-se o procedimento de retirada do cloreto por meio da adição de água destilada aquecida.
- q) Quando os filtros estiverem secos, eles são retirados e colocados em um cadinho de alumina, previamente pesado. Em seguida, com o auxílio de um bico de Bunsen, o papel é calcinado, restando apenas cinzas (Figura 3.26).
- r) Após esse procedimento, o cadinho é colocado em uma mufla e submetido a uma temperatura de 950°C por 1h (Figura 3.27). Após o resfriamento, na temperatura ambiente, o cadinho é pesado e a porcentagem de resíduo insolúvel é calculada.

Figura 3.26 - Calcinação dos filtros



Figura 3.27- Utilização da mufla



Fonte: Melges (2013)

Por fim, o cadinho é pesado onde obtém-se a massa de resíduo insolúvel através da expressão:

$$m1\% = R_i \frac{R_i}{m_l} \times 100 \quad \text{onde: } R_i = \text{Massa de Resíduo Insolúvel,}$$

$m_1$  = massa inicial da CLAR.

### 3.5.5 Ensaio de Difração de Raios X

Foram realizados ensaios de difração de raios x de modo a identificar as fases cristalinas presentes na CLAR. Na figura 3.7, tem-se o equipamento utilizado. Os ensaios foram realizados no Departamento de Física e Química da FEIS-UNESP.

Figura 3.5 – Equipamento de Difração de Raios X.



Fonte: Melges (2013)

### 3.5.6 Fluorescência de Raios X

Este ensaio foi realizado na Universidad de Alicante, na Espanha, por meio de contato realizado pelo Prof.Dr. Jordi Payá.

Conforme Tashima (2012), este ensaio permite identificar os elementos químicos de um material sólido. A técnica utilizada é a emissão secundária de radiação de raios-X que é gerada ao excitar uma amostra com uma fonte emissora de raios-X. A radiação primária expulsa os elétrons do interior dos átomos. Então, os elétrons das extremidades ocupam os lugares vagos e o excesso energético dessa transmissão se dissipa em fótons: a chamada radiação X fluorescente secundária. Através do espectro da amostra, é possível identificar cada elemento químico. A concentração de cada elemento se detecta medindo a intensidade da energia aplicada a cada transmissão de elétrons.

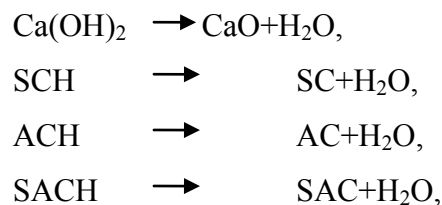
### 3.5.7 Ensaio de Termogravimetria

Orgeira (2011) menciona que a mistura do cimento Portland com água, mediante uma série de reações químicas, tem, como um dos resultados a liberação de cal (hidróxido cálcico ou portlandita). Esta portlandita, em contato com materiais pozolânicos, reage e origina a formação de novos compostos de hidratação, similares aos da hidratação do cimento.

Conforme Orgeira (2011), o ensaio de termogravimetria, permite que se obtenha a curva da perda de massa (TG) decorrente das reações de desidratação. Este ensaio é muito útil

no caso do estudo de pastas, uma vez que é possível determinar, por meio dos gráficos obtidos, a porcentagem de cal que foi fixada por meio das reações químicas com a CLAR. Já a curva de DTG é a representação gráfica da derivada da curva de TG, e é a que fornece informações a respeito da velocidade correspondente à perda ou ao aumento de massa em relação à temperatura ou ao tempo. Esta representação permite identificar, com maior precisão, a alteração no valor da massa que ocorre quando a perda é muito pequena ou quando existem processos que tenham temperaturas de ativação muito próximas entre si.

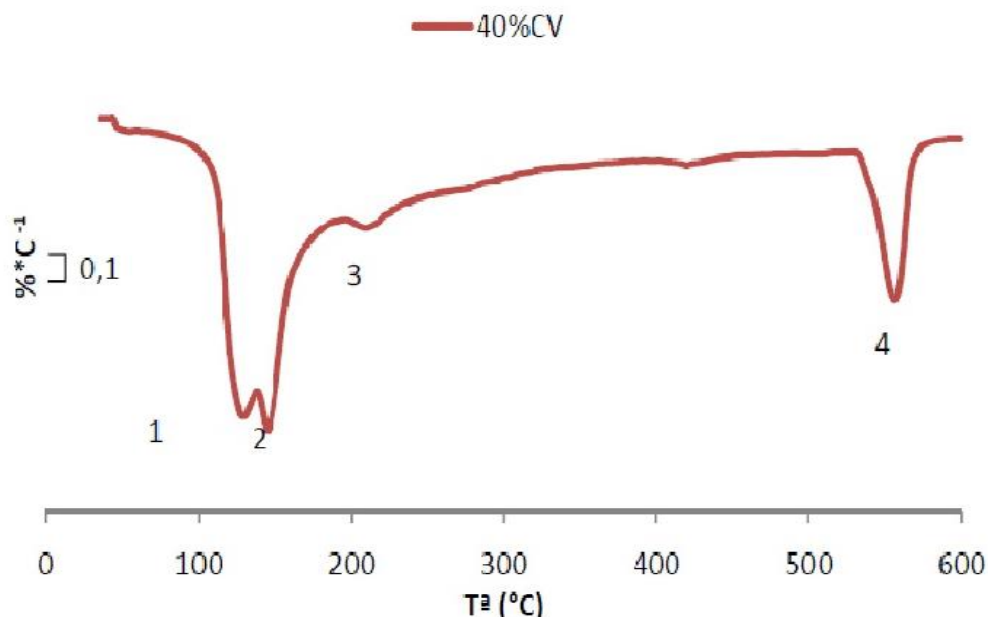
Orgeira (2011) apresenta as seguintes reações de desidratação que normalmente ocorrem em pastas de cimento:



onde SCH, ACH e SACH é a nomenclatura utilizada para silicato de cálcio hidratado, aluminato cálcico hidratado e sílico-aluminato cálcico hidratado, respectivamente.

Na figura 3.6, extraída de Orgeira (2011), tem-se um exemplo de uma curva de DTG de uma pasta de cimento com 40% de substituição de cimento por cinza volante, aos 56 dias de idade, definida pelo termo “40% CV”. O pico 1 corresponde à desidratação da etringita e SCH e ocorre no intervalo de temperatura de 100°C a 180°C, que praticamente se superpõe com o pico 2, correspondente à reação de desidratação do SCH; o pico 3 corresponde à reação de desidratação dos compostos SACH-ACH, que ocorre no intervalo de temperatura de 180°C a 240°C. Por fim, o pico 4 representa a reação de desidratação do CH, que corresponde ao intervalo de temperatura de 520°C a 600°C.

Figura 3.6 – Exemplo de curva DTG de pasta de cimento com 40% de substituição por cinza volante, aos 56 dias de idade.

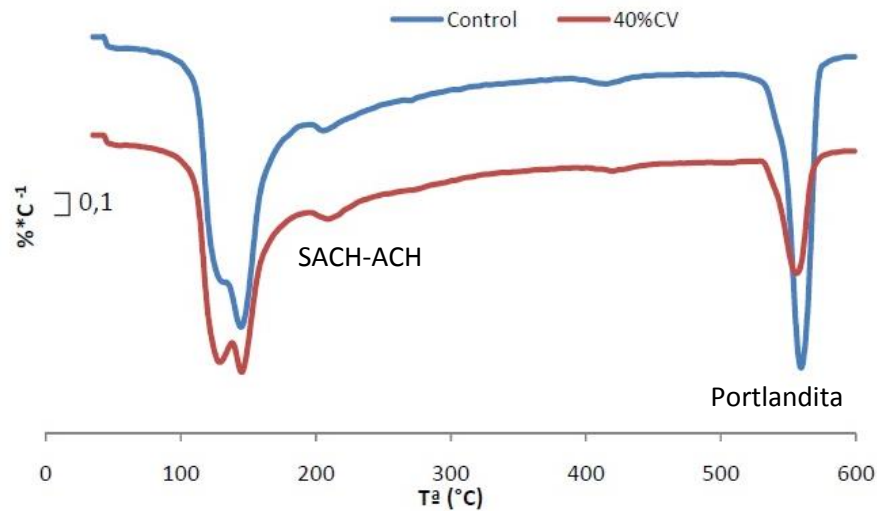


Fonte: Orgeira (2011)

Na figura 3.7, Orgeira (2011) apresenta duas curvas de DTG: uma da pasta de cimento, definida pelo termo “Control”, sem qualquer substituição, e a outra, com 40% de substituição de cimento por cinzas volantes, ambas correspondentes a uma idade de 56 dias. Observa-se que as curvas são similares entre si; ressalta-se, no entanto, uma maior quantidade de compostos de hidratação SACH-ACH na pasta com cinza volante, decorrente da melhor definição do pico observado na figura em relação à pasta de cimento. Além disso, pode ser também observada uma diminuição do pico correspondente à portlandita, indicando a existência de uma reação pozolânica entre a portlandita e a cinza volante.



Figura 3.7 – Exemplo de duas curvas do tipo DTG, sendo uma de pasta de cimento com 40% de substituição por cinza volante (40%CV) e, aos 56 dias de idade, e a outra somente de cimento (Control).



Fonte: Adaptada de Orgeira (2011)

Neste trabalho, foram realizados ensaios de Termogravimetria para os seguintes materiais:

- materiais puros: Hidróxido de Cálcio (ou cal), CLAR e CIMENTO;
- pastas de CAL/CLAR nas proporções de 3:7 e 5:5, curadas à temperatura ambiente (em câmara úmida, a 20°C) e à temperatura de 40°C (em banho térmico), ensaiadas aos 1, 3, 7, 28 e 90 dias;
- pastas de CIMENTO/CLAR, curadas à temperatura ambiente (em câmara úmida, a 20°C), nas proporções de 100/0, 85/15 e 75/25, aos 3, 7, 28 e 90 dias.

Para os materiais puros, a temperatura atingiu 1000°C, tendo sido utilizados recipientes de alumina. Já para as pastas, foram utilizados recipientes de alumínio, para uma temperatura de ensaio de 600°C.

Foi utilizado o módulo TGA 850 Mettler-Toledo, que permitiu elaborar o gráfico da curva termogravimétrica (TG) e a derivada de curva termogravimétrica (DTG). Nas figuras 3.51 e 3.52 têm-se ilustrados os equipamentos, utensílios e materiais usados nos ensaios, que, por sua vez, foram realizados nas instalações do ICITECH.

Figura 3.51- Equipamento usado no ensaio de Termogravimetria



Fonte: Melges (2013)

Figura 3.52 - Recipientes de alumina (1000°C) e de alumínio (600°C)



Fonte: Melges (2013)

Para calcular a porcentagem de cal fixada em pastas de CAL/CLAR, foi utilizada a seguinte expressão:

Cal Fixada(%) em pastas de Cal/CLAR =

$$\frac{\left( \begin{array}{c} \text{Pureza} \\ \text{da Cal} \end{array} \right) \times \left( \begin{array}{c} \text{Porcentagem de} \\ \text{cal na pasta} \end{array} \right) - \left( \begin{array}{c} \text{Porcentagem da perda de} \\ \text{água correspondente à} \\ \text{portlandita} \end{array} \right) \times \left( \frac{\text{Massa molecular da Cal}}{\text{Massa molecular da Água}} \right)}{\left( \begin{array}{c} \text{Pureza} \\ \text{da Cal} \end{array} \right) \times \left( \begin{array}{c} \text{Porcentagem de} \\ \text{cal na pasta} \end{array} \right)}$$

Já para calcular a porcentagem de cal fixada em pastas de CIMENTO/CLAR, foi utilizada a seguinte expressão:

Cal Fixada(%) em pastas de CIMENTO/CLAR =

$$\frac{\left( \begin{array}{c} \% \text{ de cimento na Pasta} \\ \text{Cimento-CLAR} \end{array} \right) \times \left( \begin{array}{c} \% \text{ de Portlandita na pasta} \\ \text{Cimento-Controle} \end{array} \right) - \left( \begin{array}{c} \% \text{ de Portlandita na pasta} \\ \text{Cimento-CLAR} \end{array} \right)}{\left( \begin{array}{c} \% \text{ de cimento na Pasta} \\ \text{Cimento-CLAR} \end{array} \right) \times \left( \begin{array}{c} \% \text{ de Portlandita na pasta} \\ \text{Cimento-Controle} \end{array} \right)}$$

### 3.5.8 Microscopia Eletrônica de Varredura (SEM)

De modo a detalhar a natureza física e química da superfície da CLAR e das pastas elaboradas, em escala submicrométrica, foram realizados ensaios por meio de um Microscópio Eletrônico de Varredura – MEV (ou *SEM - Scanning Electron Microscope*), mostrado na Figura 3.5.3. No caso das pastas, o objetivo foi observar os produtos de hidratação formados após os 28 dias de sua elaboração. O recobrimento das amostras foi feito com ouro de modo a se obterem imagens mais nítidas.

Figura 3.53 – Microscópio Eletrônico de Varredura



Fonte: Melges (2013)

## 4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo, são apresentados e discutidos os resultados dos procedimentos e dos ensaios mencionados no capítulo anterior.

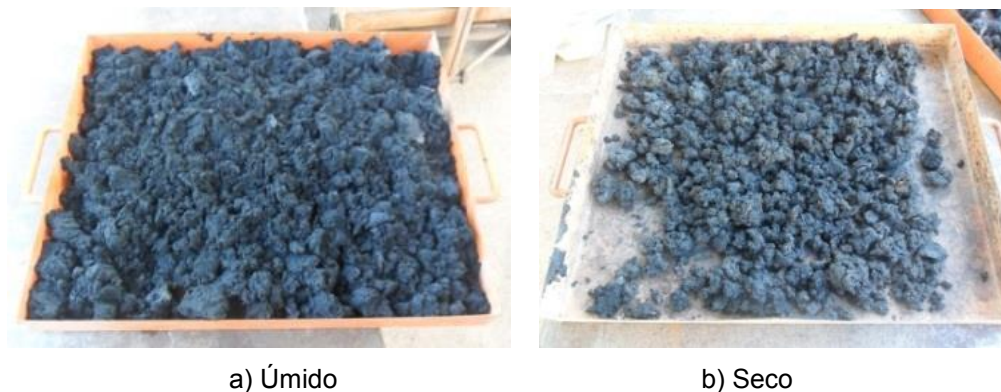
### 4.1 PERDA DE ÁGUA DO LODO DE ÁGUAS RESIDUÁRIAS NA ESTUFA

A secagem do lodo foi feita por meio de uma estufa, durante o período de 24 horas, a uma temperatura constante de 100°C. A tabela 4.1 mostra a variação de massa decorrente da secagem do material. Na figura 4.1, apresentam-se a amostra úmida e após 24 horas na estufa.

Tabela 4.1 - Perda de massa após secagem na estufa (100°C 24h)

Massa úmida (Kg)	Massa seca (Kg)	% Perda
17,565	4,060	76,9

Figura 4.1 – Aspecto do material



Fonte: Melges (2012)

A perda de massa de lodo, devido à eliminação de água livre por meio da estufa, foi de aproximadamente **77%**. Neste caso, conclui-se que o mais econômico é o transporte do lodo seco, ou mesmo das cinzas, após um procedimento de autocombustão.

## 4.2 PERDA DE MASSA DECORRENTE DA CALCINAÇÃO DO LODO SECO NA MUFLA

As perdas decorrentes da calcinação, para diferentes temperaturas e durações, estão apresentadas na tabela 4.2. Os valores observados estão no intervalo de aproximadamente **52% a 58%**. Uma vez que a água livre é praticamente eliminada na estufa, os valores das perdas de massa decorrentes da calcinação na mufla são próximos entre si.

Tabela 4.2 – Perdas de massa decorrentes da calcinação na mufla

Tempo de calcinação	Temperatura			
	550°C	650° C	750° C	850°C
2h	52 %	53%	56%	57%
4h	54%	58%	57%	57%

Fonte: Thiago (2012)

## 4.3 TESTE DE REATIVIDADE POZOLÂNICA

Foi observado que todas as pastas com hidróxido de cálcio e CLAR calcinadas nas temperaturas de 650°C, 750°C e 850°C, pelo período de 2h, endureceram, indicando a presença de atividade pozolânica nas idades de 7, 14 e 28 dias (Figura 4.2).

Figura 4.2 – Teste de reatividade Pozolânica a 25°C e 65°C



Fonte: Thiago (2012)

#### 4.4 ENSAIO DE GRANULOMETRIA

O resultado do ensaio de granulometria está mostrado na tabela 4.3 e na figura 4.3. Conclui-se que o diâmetro da CLAR estava adequado para que as reações químicas pudessem ocorrer de modo satisfatório. A CLAR 650°C usada neste ensaio foi calcinada a uma temperatura de 650°C, pelo período de 2 horas, de modo a eliminar a matéria orgânica presente na amostra.

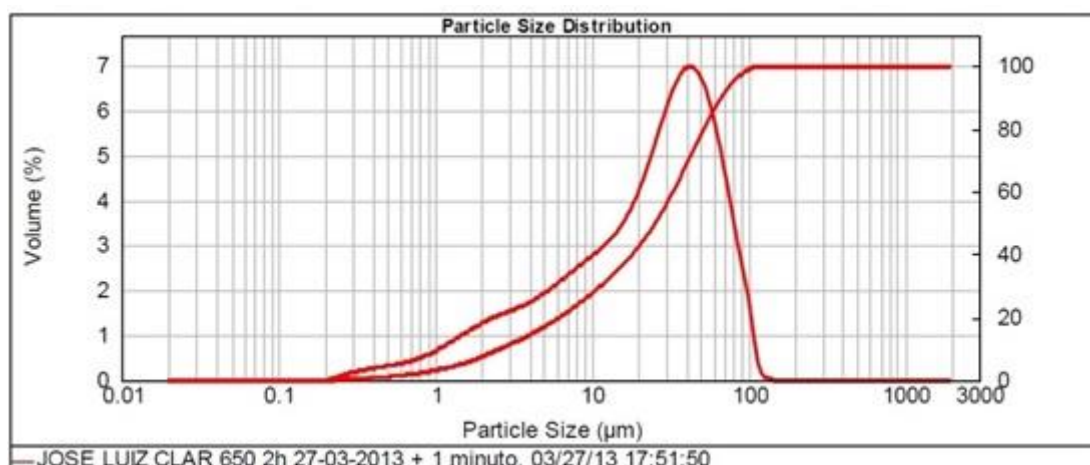
Tabela 4.3 – Valores dos diâmetros obtidos por meio do ensaio de granulometria a laser

dmédio, em $\mu\text{m}$	d(0,9), em $\mu\text{m}$	d(0,5), em $\mu\text{m}$	d(0,1), em $\mu\text{m}$
30,647	67,220	25,605	2,662

**Obs.:**  
 dméd = diâmetro médio da CLAR  
 d(0,9) = diâmetro onde 90% das partículas de CLAR são inferiores a este valor  
 d(0,5) = diâmetro onde 50% das partículas de CLAR são inferiores a este valor  
 d(0,1) = diâmetro onde 10% das partículas de CLAR são inferiores a este valor

Fonte: Melges (2013)

Figura 4.3 – Granulometria da CLAR



Fonte: Melges (2013)

#### 4.5 PERDA DE MASSA EM RELAÇÃO AO FOGO

Apresenta-se, na tabela 4.4, as perdas de massa observadas para quatro amostras de CLAR, todas previamente calcinadas pelo período de 2h, sendo duas delas à temperatura de 650°C, e, as duas outras, à temperatura de 850°C.

Tabela 4.4 – Perda de Massa em relação ao Fogo CLAR 650°C

		Perda até 650°C (1h)	Perda entre 650°C e 950°C (1h)	Perda total	Perda total (valor medio)
<b>CLAR 650</b>	Amostra 1	2,08%	3,24%	5,32%	5,38%
	Amostra 2	2,06%	3,37%	5,43%	
<b>CLAR 850</b>	Amostra 1	0,49%	2,32%	2,81%	2,88%
	Amostra 2	0,53%	2,42%	2,95%	

Fonte:Thiago (2012)

#### 4.6. TEOR DE CLORETOS

Craus (2010) menciona que a Norma ACI determina o limite do teor de cloretos em 0,2%. Já os teores encontrados nas amostras ensaiadas foram inferiores a 0,1% conforme tabela 4.5. Um teor de cloretos excessivo no concreto pode provocar a corrosão das armaduras, sendo portanto, uma vantagem da CLAR, o fato de que os teores nela encontrados sejam menores que o limite.

A CLAR a 650°C durante 2 horas onde o valor de 26,23% é baixo para um material que possui quartzo não mostra informação sobre a materia amorfa, onde em torno de 73% é soluvel mas não significa que seja amorfo.

Tabela 4.5 teor de cloretos

	<b>Amostra 1</b>	<b>Amostra 2</b>
<b>Massa</b>	1,03 g	1 g
<b>Volume</b>	5 ml	5 ml
<b>Reagente AgNO<sub>3</sub> ml</b>	0,5 ml	0,45 ml
<b>% Cl</b>	<b>0,086 %</b>	<b>0,080 %</b>

Fonte: Melges (2013)

#### 4.7 RESÍDUOS INSOLÚVEIS

Foram avaliadas duas amostras, usando-se o parâmetro de cálculo dado pela expressão:  $R_i\% = (R_i/m1) \cdot 100$  para a CLAR 650°C.

Foi observado um valor médio de 26,27% de resíduos insolúveis. Considera-se, face à solubilidade observada, uma indicação de que o material seja composto, em grande parte, de material amorfo.

Tabela 4.6 - Teor de resíduos insolúveis

<b>Amostra</b>	<b>Massa inicial (g)</b>	<b>Resíduo Insolúvel (g)</b>	<b>Resíduo Insolúvel (%)</b>	<b>Valor médio (%)</b>
<b>1</b>	1,0054	0,2727	27,12%	<b>26,27%</b>
<b>2</b>	1,0003	0,2542	25,41%	

Fonte: Melges (2013)

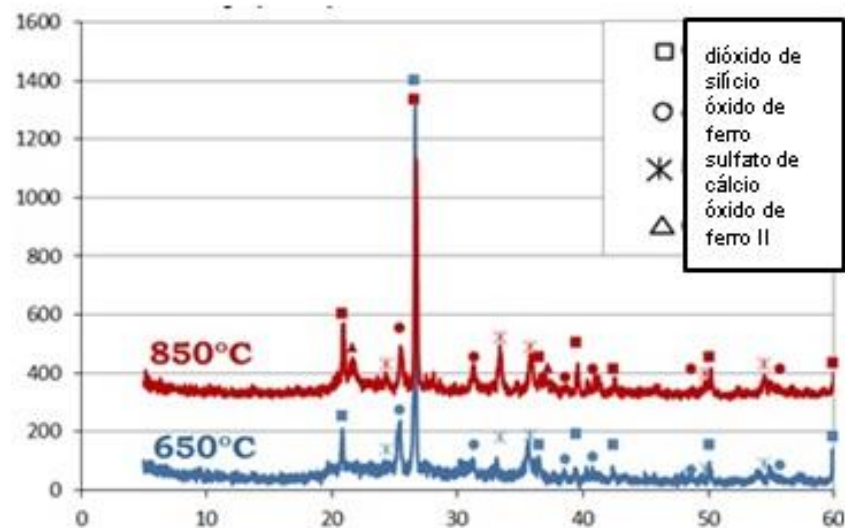
#### 4.8 ENSAIO DE DIFRAÇÃO DE RAIOS X

Apresenta-se, na figura 4.4, o resultado do teste de Difração de Raios X para duas amostras, tendo uma delas sido calcinada a 650°C, e a outra, a 850°C, pelo período de 4h. Este ensaio permitiu a identificação mineralógica da CLAR. Foram observados picos pronunciados nos gráficos, indicando a presença de compostos cristalinos, identificados como



quartzo (dióxido de silício), hematita (óxido de ferro), anidrita (sulfato de cálcio) e goetita (óxido de ferro II.). Observou-se, no entanto, que a forma dos gráficos no intervalo  $2\theta=20^\circ-30^\circ$  sugere também a presença de uma fase amorfa.

Fig. 4.4- Resultado do ensaio de Difração de Raios X para as amostras calcinadas às temperaturas de  $650^\circ\text{C}$  e  $850^\circ\text{C}$ .



Fonte: Melges (2013)

#### 4.9 ENSAIO DE FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X

Foram enviadas amostras de CLAR, calcinadas a  $650^\circ\text{C}$  pelo período de 2h, à Universidad de Alicante, Espanha, para a realização deste ensaio. Os resultados obtidos encontram-se na Tabela 4.7. Dado o elevado teor de óxido de silício, pode-se considerar a CLAR como sendo um potencial material que apresenta uma elevada atividade pozolânica. Com base na tabela 4.8, extraída da NBR 12653 (2012) – Materiais Pozolânicos, observa-se que a CLAR atende a todas as exigências químicas mencionadas para a classe de material do tipo “E”, referente a qualquer pozolana que não seja natural, artificial ou do tipo Cinza Volante.

Foi observada a presença de metais pesados na amostra como, por exemplo, Zinco (Zn), Bário (Ba), Cromo (Cr), Níquel (Ni), Cobre (Cu), Estanho (Sn) e Chumbo (Pb).

4.7 – Percentagens dos Óxidos na amostra de CLAR 650°C

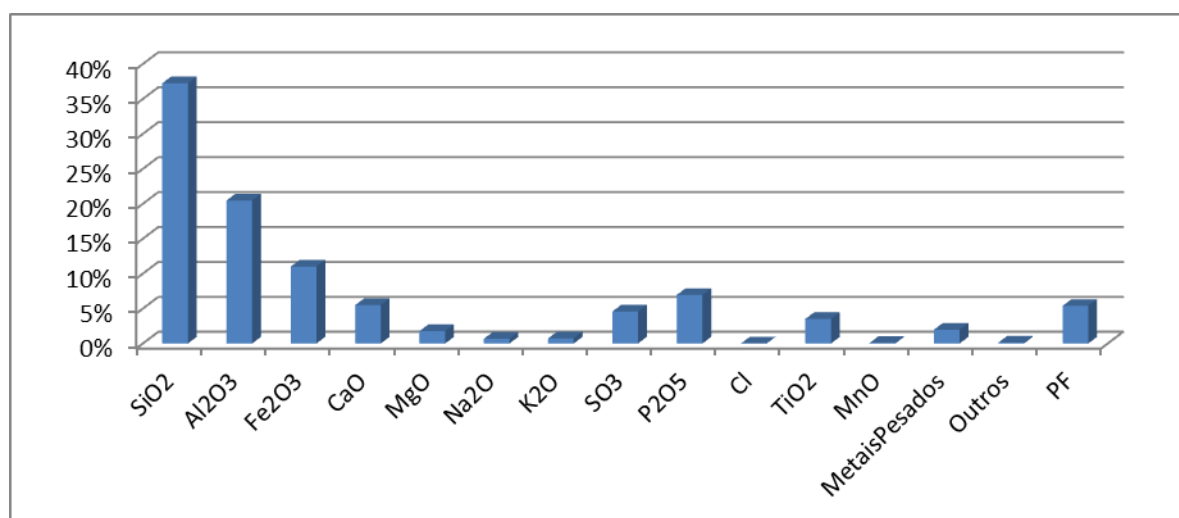
SiO <sub>2</sub>	37,23%
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	20,47%
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11,01%
CaO	5,48%
MgO	1,77%
Na <sub>2</sub> O	0,67%
K <sub>2</sub> O	0,74%
SO <sub>3</sub>	4,58%
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	6,94%
Cl	0,01%
TiO <sub>2</sub>	3,51%
MnO	0,08%
Metais Pesados	1,98%
Outros	0,13%
PF	5,38%
	100,00

Tabela 4.8 – Percentagens dos Óxidos NBR 12653(2012)

Valores expressos em porcentagem (%)

Propriedades	Classe de material pozolânico		
	N	C	E
SiO <sub>2</sub> + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	≥ 70	≥ 70	≥ 50
SO <sub>3</sub>	≤ 4	≤ 5	≤ 5
Teor de umidade	≤ 3	≤ 3	≤ 3
Perda ao fogo	≤ 10	≤ 6	≤ 6
Álcalis disponíveis em Na <sub>2</sub> O	≤ 1,5	≤ 1,5	≤ 1,5

Figura 4.5 Percentuais de óxidos do eixo y



Fonte: Melges (2013)

#### 4.10 ENSAIO DE TERMOGRAVIMETRIA

Neste item, foi utilizada a CLAR calcinada a uma temperatura de 650°C, pelo período de 2h.

Nas tabelas 4.9 e 4.10, apresentam-se os resultados relativos à cal fixada, para pastas de Cal/CLAR, nas proporções 3/7 e 5/5, para as temperaturas de cura correspondentes a 20°C e a 40°C. Nas figuras 4.6 e 4.7, são apresentados os resultados correspondentes às tabelas mencionadas. Para uma menor percentagem de cal em relação à CLAR (3/7), a portlandita foi rapidamente consumida, tanto para a cura realizada na temperatura ambiente, como para a cura realizada em banho térmico.

Observa-se que, aos 3 dias, a percentagem de cal fixada foi da ordem de 90%. Já para a maior proporção de cal em relação à CLAR (5/5), pode-se observar que a fixação de cal foi mais rápida para a amostra curada no banho térmico, como era de se esperar. No entanto, aos 90 dias, a percentagem de cal fixada é praticamente a mesma, sendo esta acima de 90%. Os arquivos para a data de 28 dias, relativos à proporção 5/5 apresentaram problema, não sendo possível a obtenção de seus valores.

Tabela 4.9 - Percentagem de cal fixada para pastas de Cal/CLAR.

Idade	Temp. de cura: 20°C		Temp. de cura: 40°C	
	Prop.: 3/7	Prop.: 5/5	Prop.: 3/7	Prop.: 5/5
<b>1 dia</b>	-	-	90,2%	64,5%
<b>3 dias</b>	89,3%	56,5%	92,7%	70,9%
<b>7 dias</b>	96,8%	76,9%	91,1%	87,2%
<b>28 dias</b>	100%	*	100%	*
<b>90 dias</b>	100%	92,9%	100%	93,8%

Obs.: \* arquivo com problema – não foi possível realizar a medida

Fonte: Melges (2014)

Figura 4.6 - Porcentagem de cal fixada para pastas de Cal/CLAR curadas em câmara úmida.

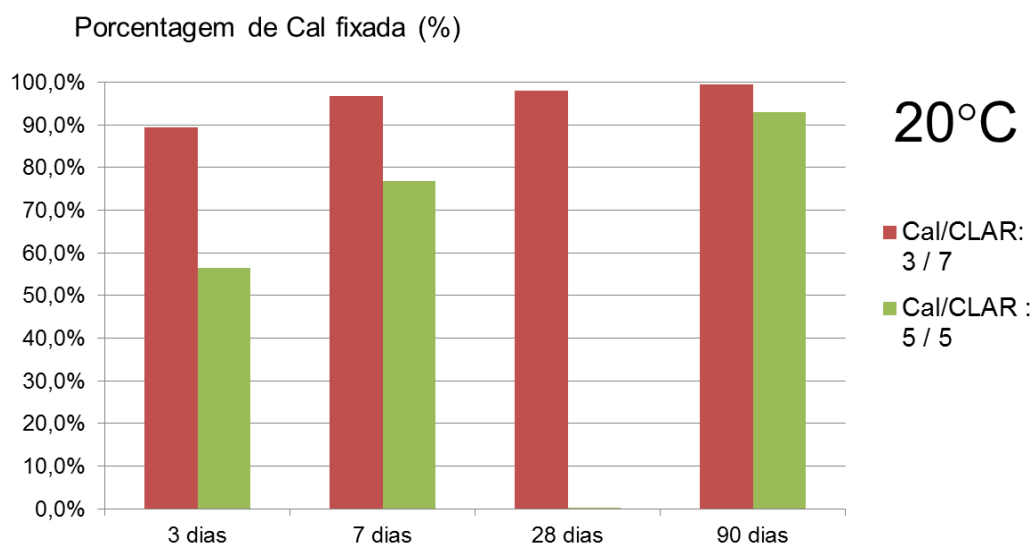
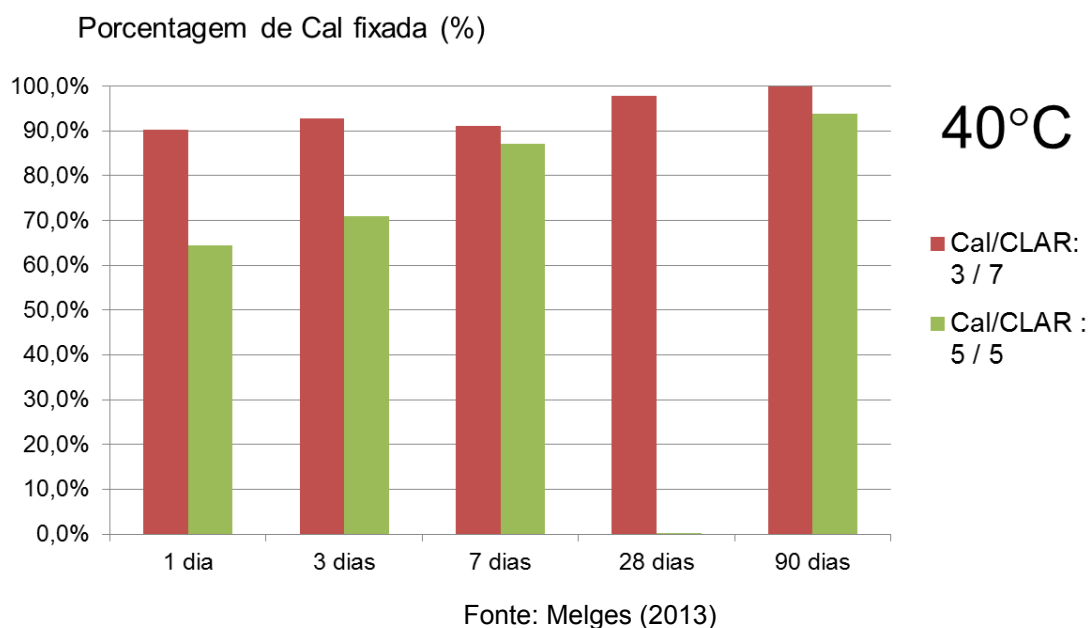


Figura 4.7 - Porcentagem de cal fixada para pastas de Cal/CLAR curadas em banho térmico.



Na tabela 4.10, apresentam-se os resultados relativos à cal fixada para pastas de CIMENTO/CLAR nas proporções 85/15 e 75/25, para a temperatura de cura correspondente a 20°C (câmara úmida). Na figura 4.8, são apresentados os resultados correspondentes à tabela mencionada.

Para a proporção 85/15, e para 3 dias, o valor é negativo, indicando que a portlandita está sendo liberada em decorrência das reações de hidratação do cimento. Uma vez que as

reações pozolânicas têm um caráter mais lento, a fixação de cal será visível a um prazo mais longo. Ou seja, a curtos espaços de tempo, a cinza atua como filler, atuando como um elemento de nucleação para os produtos de hidratação do cimento.

Já para a proporção 75/25, para 3 dias, tem-se valores positivos da porcentagem de cal fixada. Essa porcentagem aumenta com o tempo porque o cimento continua reagindo com a água e liberando portlandita, que, por sua vez, reage com a CLAR.

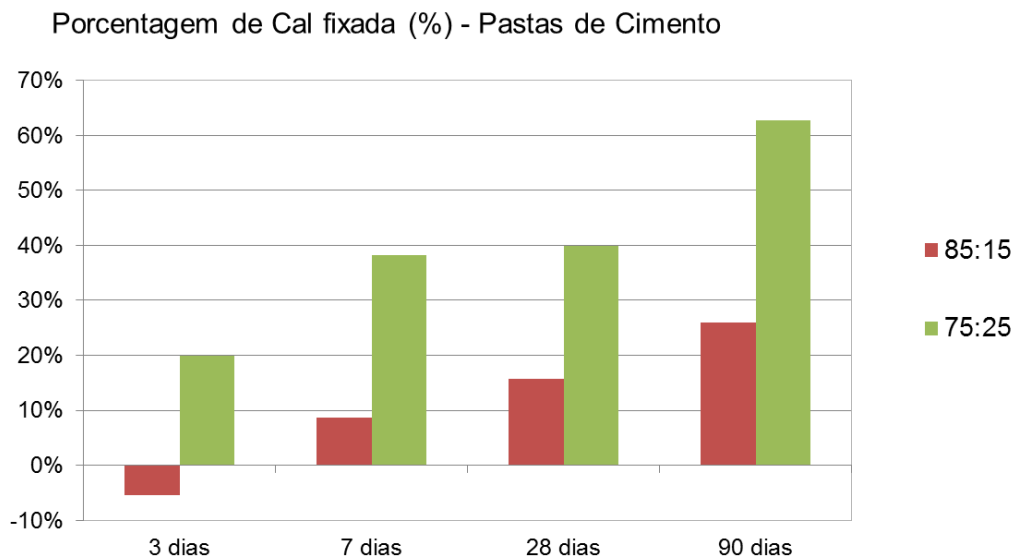
A longo prazo, como era de se esperar, a porcentagem de cal fixada é maior para a proporção 75:25, onde há uma quantidade maior de CLAR para as reações de pozolanicidade.

Tabela 4.10 - Porcentagem de cal fixada para pastas de CIMENTO/CLAR.

Idade	Proporção 85: 15	Proporção 75: 25
3 dias	-5,4%	19,9%
7 dias	8,7%	38,2%
28 dias	15,7%	39,9%
90 dias	25,9%	62,7%

Fonte: Melges (2014)

Figura 4.8 - Porcentagem de cal fixada para pastas de Pastas de cimento.

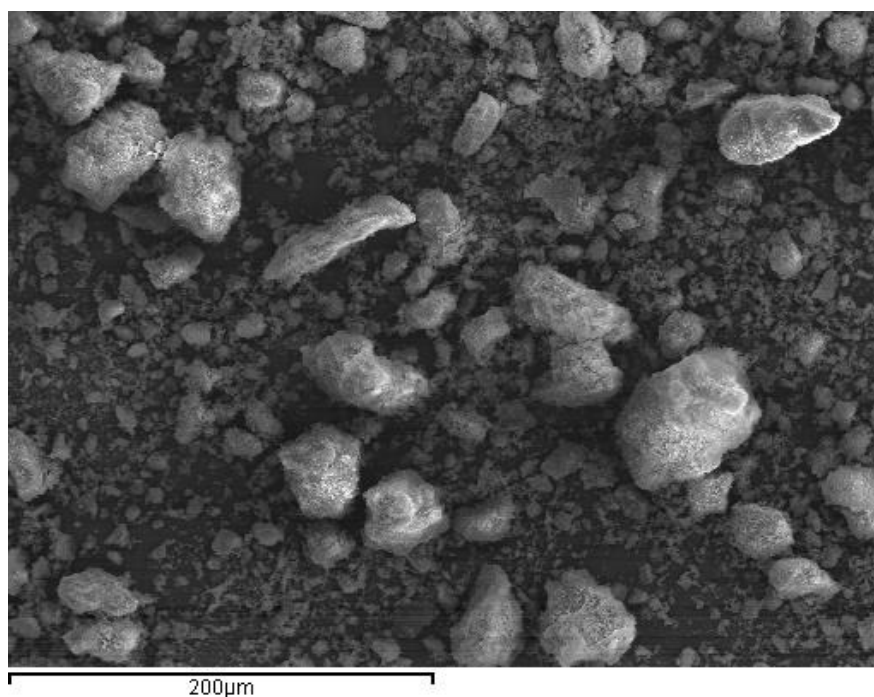


Fonte: Melges (2014)

#### 4.11 ENSAIO DE MICROSCOPIA DE VARREDURA ELETRÔNICA (MEV)

As figuras apresentadas neste item referem-se à CLAR calcinada a 650°C pelo período de 2h. Na Figura 4.9 tem-se a ampliação de 300x. Observa-se que as partículas apresentam formas irregulares, algumas mais alongadas e outras menos, com aspecto poroso e rugoso. Uma geometria amorfa mas com semelhança à prismática também foi constatada.

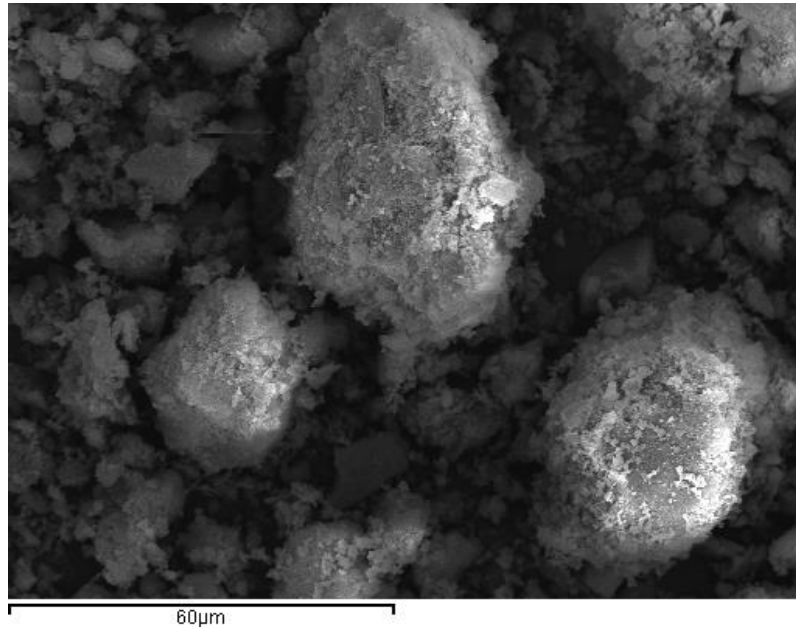
Figura 4.9 – Microscopia da CLAR ampliação 300x.



Fonte: Melges (2013)

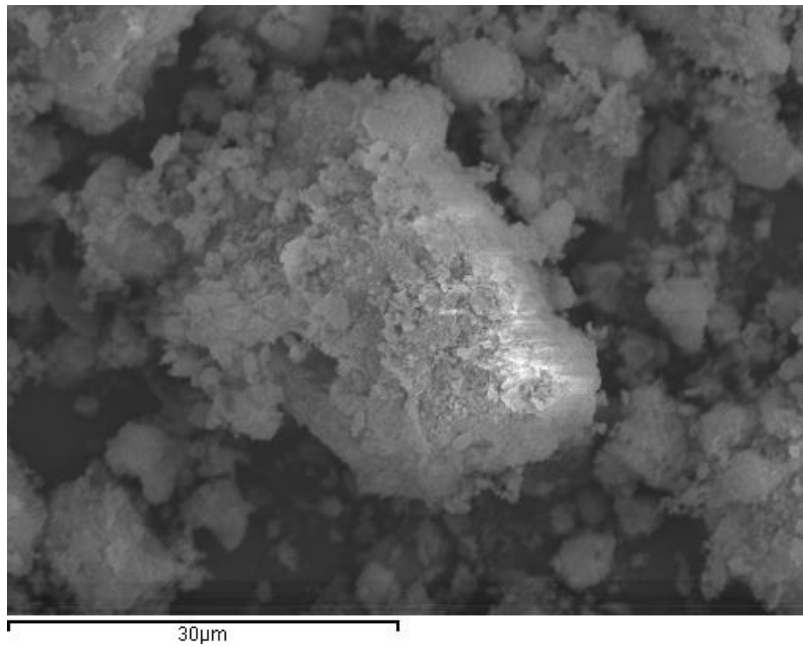
Na figura 4.10 e 4.11, tem-se uma ampliação da CLAR de 1000x e de 2000x. O que se pode observar é que a partícula não apresenta uma superfície lisa, parecendo haver o depósito de outras partículas menores.

Figura 4.10 – Ampliação da CLAR: 1000x



Fonte: Melges (2013)

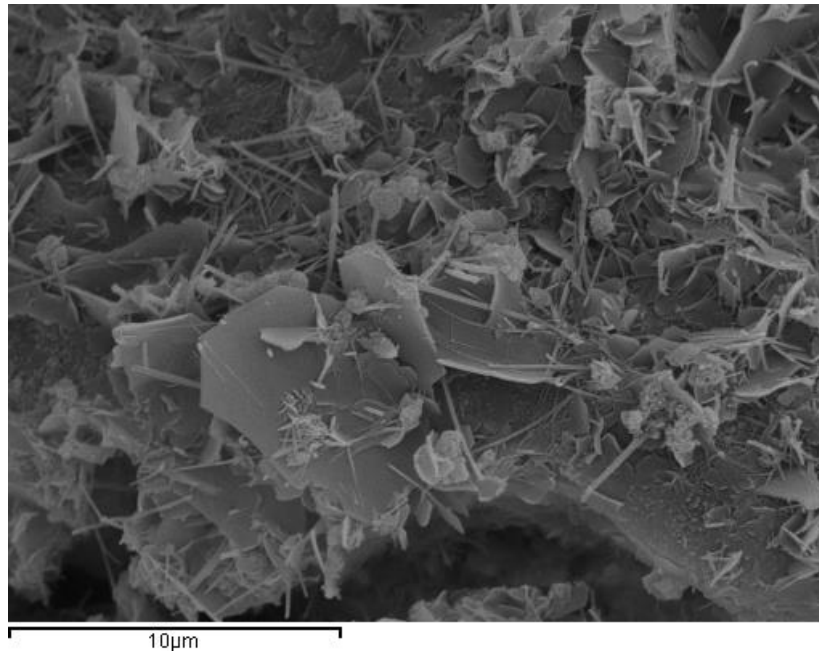
Figura 4.11 – Ampliação da CLAR: 2000x



Fonte: Melges (2013)

Já na figura 4. 12, têm-se a ampliações, em 5000x, de pastas de CAL/CLAR, na proporção de 3:7, aos 7 dias dias, curada à temperatura de 20°C. Os elementos que apresentam o formato de lâminas provavelmente são produtos de hidratação com a presença de sulfatos.

Figura 4.12 - Pasta Cal/CLAR de 3/7, aos 7 dias, ampliação de 5000x, curada a 20°C



Fonte: Melges (2013)

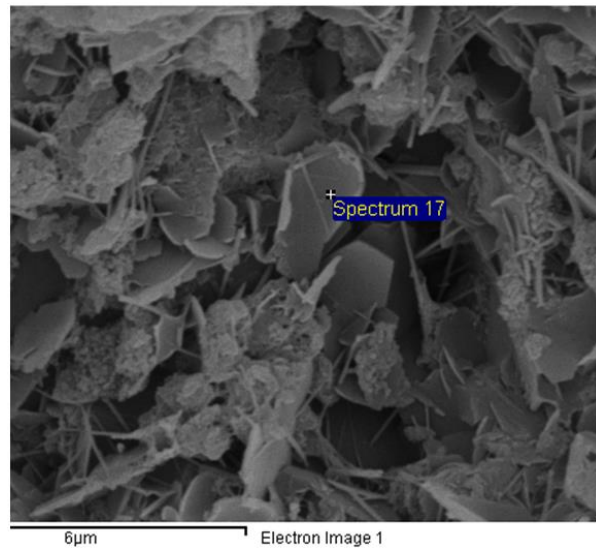
Na figura 4.13, tem-se o EDX de um ponto que apresenta uma substancial porcentagem de cálcio em sua constituição, observando-se ainda algumas porcentagens de Silício e Alumínio, o que pode indicar o produto de hidratação Sílico-Aluminato de Cálcio, e, conseqüentemente, uma reação pozolânica.



Figura 4. 13 – Ensaio de EDX para um ponto da pasta Cal/CLAR de 3/7 aos 7 dias, curada a 20°C, ampliação de 10 000x

Standard :  
 C CaCO3 1-jun-1999 12:00 AM  
 O SiO2 1-jun-1999 12:00 AM  
 Al Al2O3 1-jun-1999 12:00 AM  
 Si SiO2 1-jun-1999 12:00 AM  
 Ca Wollastonite 1-jun-1999 12:00 AM  
 Fe Fe 1-jun-1999 12:00 AM

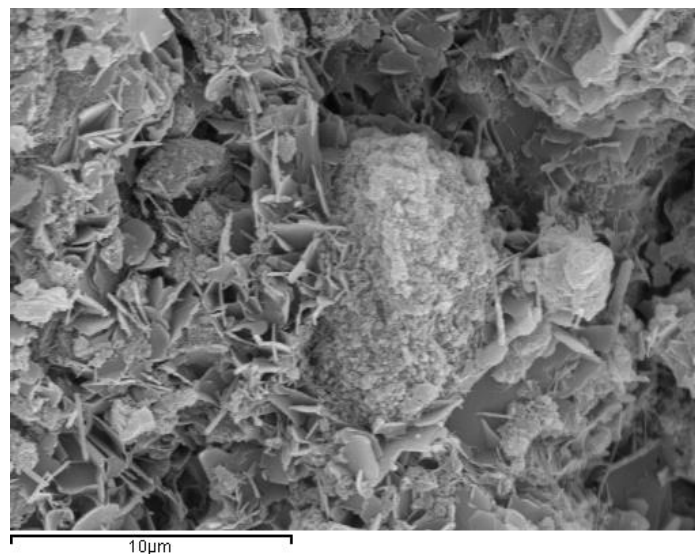
Element	Weight %	Atomic%
C K	7.77	14.58
O K	40.04	56.39
Al K	3.91	3.26
Si K	4.87	3.90
Ca K	27.46	15.43
Fe K	15.95	6.44
Totals	100.00	



Fonte: Melges (2013)

Na figura 4.14, tem-se uma ampliação de 5000x, de pastas de CAL/CLAR, na proporção de 3:7, aos 28 dias, curada à temperatura de 20°C. Nesta figura, por se referir a um tempo maior, já se tem uma superposição de elementos do tipo lâmina-CLAR-portlandita. Na figura 4.15, tem-se um ensaio de EDX, que identifica, de modo claro, uma partícula de CLAR não reacionada formando silicato silico hidratado. Onde o ferro Fe é o que substitui o alumínio nele composto, mas não aparece o enxofre.

Figura 4. 14 Pastas Cal/CLAR de 3/7, aos 28 dias, ampliação de 5000x, curada a 20°C



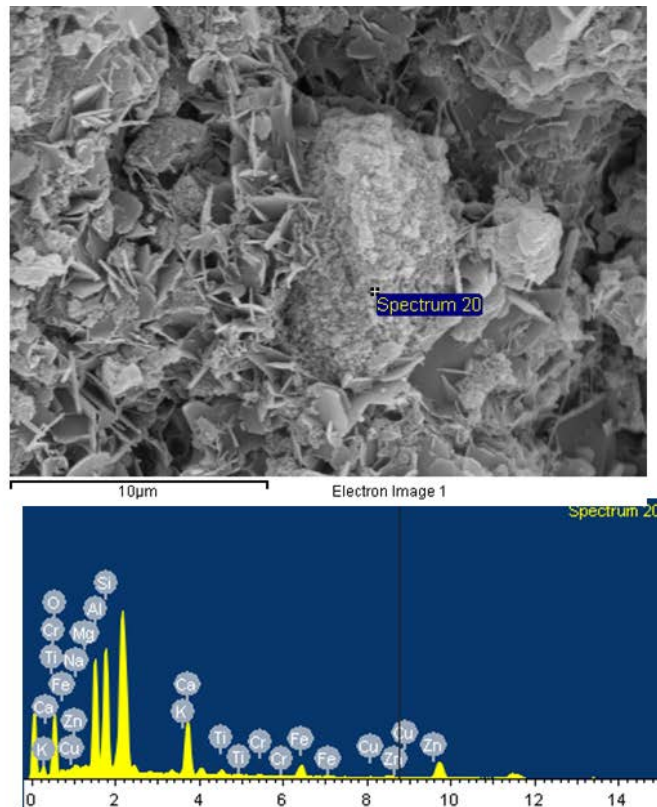
Fonte: Melges (2013)

Figura 4.15 EDX da Pasta Cal/CLAR de 3/7, aos 28 dias, ampliação de 5000x, curada a 20°C

Standard:

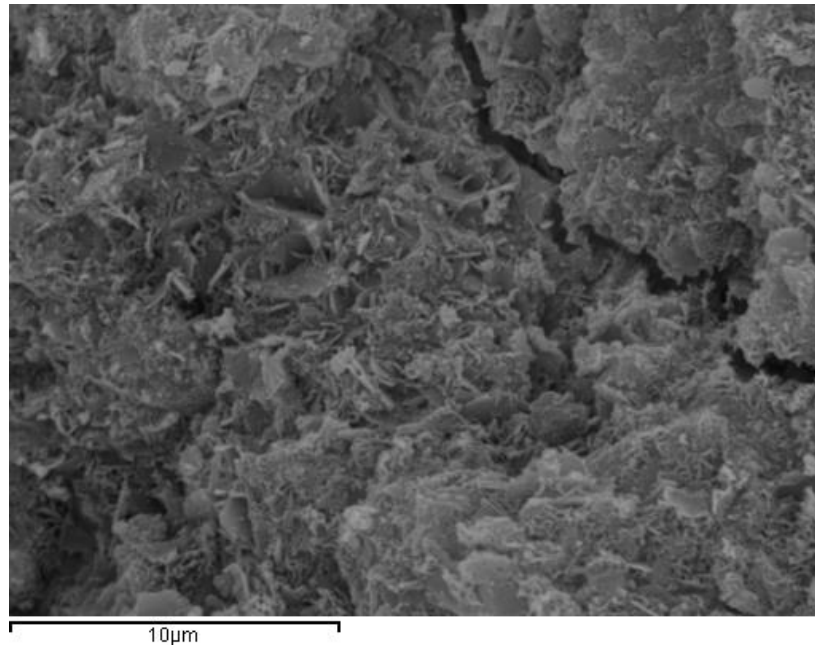
Na Albite 1-jun-1999 12:00 AM  
Mg MgO 1-jun-1999 12:00 AM  
Al Al2O3 1-jun-1999 12:00 AM  
Si SiO2 1-jun-1999 12:00 AM  
K MAD-10 Feldspar 1-jun-1999 12:00 AM  
Ca Wollastonite 1-jun-1999 12:00 AM  
Ti Ti 1-jun-1999 12:00 AM  
Cr Cr 1-jun-1999 12:00 AM  
Fe Fe 1-jun-1999 12:00 AM  
Cu Cu 1-jun-1999 12:00 AM  
Zn ZnO 11-abr-2012 10:58 AM

Element	Weight%	Atomic%	Compd%	Formula
Na K	0.71	0.69	0.95	Na2O
Mg K	0.37	0.34	0.61	MgO
Al K	14.75	12.26	27.88	Al2O3
Si K	18.89	15.08	40.41	SiO2
K K	0.69	0.39	0.83	K2O
Ca K	11.58	6.48	16.21	CaO
Ti K	1.75	0.82	2.92	TiO2
Cr K	0.51	0.22	0.75	Cr2O3
Fe K	6.62	2.66	8.51	FeO
Cu K	0.64	0.23	0.80	CuO
Zn K	0.10	0.04	0.13	ZnO
O	43.39	60.80		
Totals	100.00			



Já na figura 4.16, tem-se a ampliação, em 5000x, de pastas de CAL/CLAR, na proporção de 3:7, aos 7 dias, curadas às temperaturas de 40°C. Observa-se que, para a temperatura de 40°C, a geometria dos elementos em forma de lâmina não está tão bem definida como para a temperatura de 20C, já mostrada na figura 4.12. O EDX, no entanto, tomado para esta temperatura de cura apresenta composição análoga à sua equivalente curada à temperatura de 20°C.

Figura 4.16 Pasta Cal/CLAR de 3/7, aos 7 dias, ampliação de 5000x, curada a 40°C



Fonte: Melges (2014)

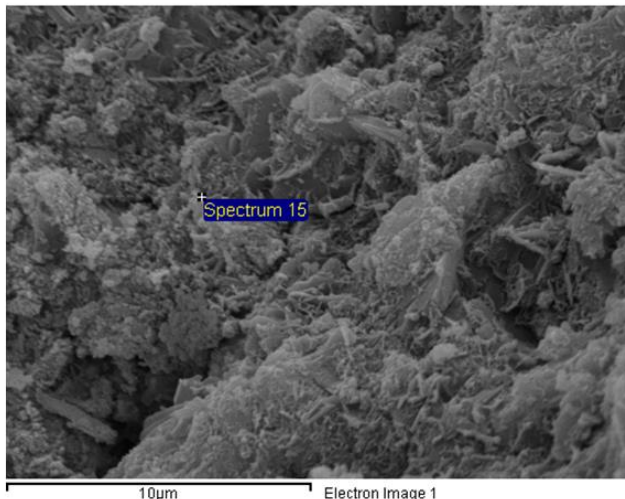
Na figura 4,17, tem-se o ensaio realizado para a pasta, na proporção de 3:7, aos 7 dias, curadas à temperatura de 20°C, com ampliação de 10000x. A partícula lisa, pelo elevado conteúdo de cálcio, sugere ser uma partícula de Portlandita. No entanto, a presença de Silício, Alumínio e Ferro faz crer que já se tenha iniciado um processo de reação pozolânica com a CLAR. Situação análoga ocorre na figura 3.13, referente à pasta cuja temperatura de cura foi de 40°C.

Figura 4. 17 – Ensaio de EDX para um ponto da pasta Cal/CLAR de 3/7 aos 7 dias, curada a 40°C, ampliação de 5000x

Standard :

O SiO<sub>2</sub> 1-jun-1999 12:00 AM  
 Mg MgO 1-jun-1999 12:00 AM  
 Al Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 1-jun-1999 12:00 AM  
 Si SiO<sub>2</sub> 1-jun-1999 12:00 AM  
 Ca Wollastonite 1-jun-1999 12:00 AM  
 Fe Fe 1-jun-1999 12:00 AM

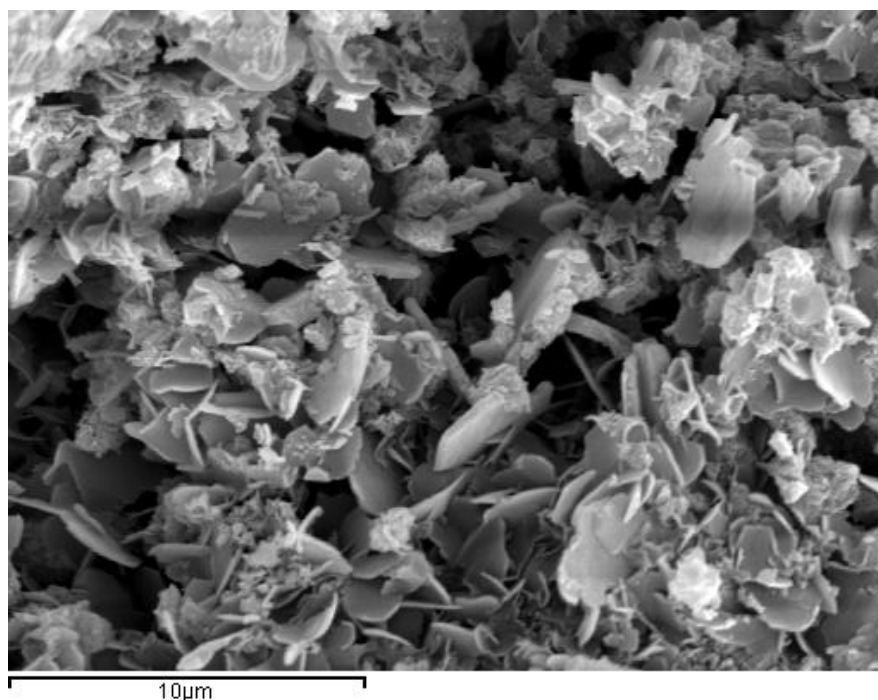
Element	Weight%	Atomic%	
O K	37.32	58.71	
Mg K	0.88	0.92	
Al K	7.47	6.96	
Si K	8.08	7.24	
Ca K	30.05	18.87	
Fe K	16.21	7.30	
Totals	100.00		



Fonte: Melges (2014)

Para pastas CAL/CLAR na proporção 5:5, curadas à temperatura 20°C, aos 90 dias, é difícil observar separadamente os diferentes elementos que se formam nas reações, conforme pode ser visto na figura 4.18, mediante a formação de novos compostos de hidratação, como por exemplo, a etringita.

Figura 4.18: Pasta Cal/CLAR 5:5, 20°C, 90 dias, ampliação de 5000x



Fonte: Melges (2013)

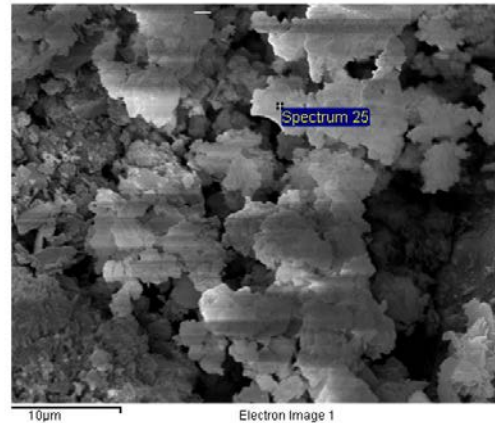
Nas figuras 4.19 e 4.20, apresentam-se alguns ensaios de EDX para a pasta Cal/Clar, proporção de 5:5, curada a 20°C, aos 90 dias.

Figura 4.19: EDX para a pasta Cal/Clar 5:5, 20°C, 90 dias, ampliação de 5000x

Standard :

C CaCO<sub>3</sub> 1-jun-1999 12:00 AM  
 Al Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 1-jun-1999 12:00 AM  
 Si SiO<sub>2</sub> 1-jun-1999 12:00 AM  
 Ca Wollastonite 1-jun-1999 12:00 AM  
 Fe Fe 1-jun-1999 12:00 AM

Element	Weight %	Atomic %	Compd %	Formula
C K	9.43	15.74	34.55	CO <sub>2</sub>
Al K	6.64	4.94	12.55	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Si K	5.18	3.70	11.08	SiO <sub>2</sub>
Ca K	27.26	13.64	38.14	CaO
Fe K	2.85	1.02	3.67	FeO
O	48.63	60.96		
Totals	100.00			



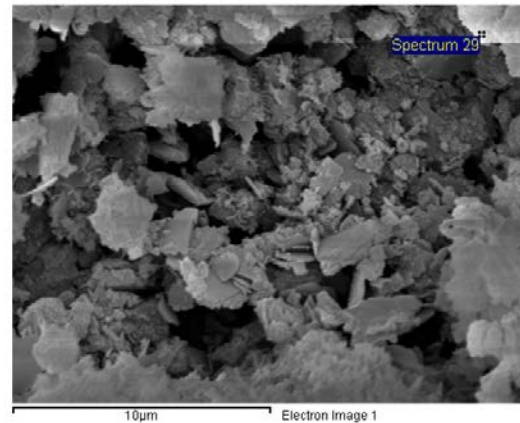
Fonte: Melges (2013)

Figura 4.20: EDX para a pasta Cal/Clar 5:5, 20°C, 90 dias, ampliação de 5000x

Standard :

Mg MgO 1-jun-1999 12:00 AM  
 Al Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 1-jun-1999 12:00 AM  
 Si SiO<sub>2</sub> 1-jun-1999 12:00 AM  
 Ca Wollastonite 1-jun-1999 12:00 AM  
 Fe Fe 1-jun-1999 12:00 AM

Element	Weight%	Atomic%	Compd %	Formula
Mg K	0.93	0.96	1.54	MgO
Al K	6.98	6.50	13.18	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Si K	8.60	7.70	18.41	SiO <sub>2</sub>
Ca K	43.42	27.23	60.75	CaO
Fe K	4.76	2.14	6.12	FeO
O	35.31	55.47		
Totals	100.00			



Fonte: Melges (2013)

## 5. CONCLUSÕES

A presente pesquisa vem avaliar a eficiência do uso das Cinzas de Águas Residuárias (CLAR) como sendo um material com potencial pozolânico.

No processo de secagem do lodo existe uma perda de água significativa, tornando inviável o transporte desse material úmido. O ideal é que o material seja desidratado na própria ETE, facilitando o transporte e otimizando a aplicação do mesmo.

As perdas decorrentes da calcinação em diferentes temperaturas na mufla foram de 52% a 58%. A pequena variação deste intervalo evidencia que, a partir de 650°C, a matéria orgânica foi totalmente eliminada.

No teste preliminar de reatividade pozolânica, observou-se o endurecimento das pastas de CLAR e cal hidratada, concluindo-se que o material apresentou potencial reativo.

O ensaio do teor de cloretos apresentou um valor abaixo do limite de 0,1%, recomendado pela Norma ACI, conforme Crauss (2010). Esse resultado torna interessante o uso da CLAR em concretos por não apresentar um potencial de corrosão da armadura.

O lodo, na sua forma seca, assume o formato de grãos, havendo uma grande necessidade de passar por moagem, diminuindo o seu diâmetro, de modo a aumentar o efeito pozolânico.

O ensaio de resíduos insolúveis mostra que o material possui uma grande quantidade de partículas amorfas.

No ensaio de difração de raios-X, no intervalo  $2\theta = 20^\circ - 30^\circ$ , observa-se a possibilidade da presença de uma fase amorfa.

Através do ensaio de fluorescência de raios-X, é possível quantificar a porcentagem de óxidos presentes no material. Foi quantificado óxido de silício, óxido de alumínio, óxido de ferro, entre outros, passíveis de reagir com a cal liberada, e formar compostos semelhantes aos observados durante a reação de hidratação do cimento. Foi identificada a presença de metais pesados, o que pode ser um problema se esse material for lançando diretamente ao solo, justificando o seu uso em pastas, argamassas e concretos.

O ensaio de termogravimetria está relacionado com a fixação de cal em pastas de Cal/CLAR e de Cimento/CLAR. Tanto em uma como na outra, foram observadas significativas quantidades de cal fixada. A porcentagem de cal fixada aumenta com o tempo, mediante a reação dos óxidos presentes na CLAR com o hidróxido cálcico que é liberado na reação de hidratação do cimento.

No ensaio de microscopia de varredura eletrônica, foram observadas a morfologia da CLAR, os produtos de hidratação e a formação de novos compostos, auxiliando a verificar a existência do potencial pozolânico da CLAR.

Como sugestão para futuras pesquisas têm-se:

- a) fabricação da CLAR por meio de um processo de autocombustão;
- b) estudo de uma relação diâmetro médio/tempo no moinho de bolas;
- c) aplicação em argamassas e em concretos, avaliando a resistência mecânica e a durabilidade.

## 6. REFERÊNCIAS

ALCOCEL, E. G; GARCÉS, P.; PEREZ CARRIÓN, M. Y; PAYÁ, J. Efecto de la adición de ceniza de lodo de depuradora (CLD) en las propiedades mecánicas y niveles de corrosión de armaduras embebidas en morteros de cemento Pórtland. **Materiales de construcción**, Madrid, n. 56, v. 282, p. 31-43, 2006.

ANDREOLI, C. V.; PEGORINI, E. S. **Reciclagem de bio sólidos**: transformando problemas em soluções. Curitiba: SANEPAR, FINEP, 1999.

ÂNGULO, S. C.; ZORDAN, S. E.; JOHN, V. M. **Desenvolvimento sustentável e a reciclagem de resíduos na construção civil**. [S. l.: s. n], 2012. Disponível: <em:<http://www.ambiente.sp.gov.br/municipioverdeazul/DiretivaHabitacaoSustentavel/DesenvSustentReciclagemResiduosConstrCivil.pdf>> Acesso em: 27 set. 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 10004**: resíduos sólidos: classificação. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 12653**: materiais pozolânicos: classificação. Rio de Janeiro, 2012.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Pesquisa nacional de saneamento básico 2000**. Brasília, DF, 2002. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/presidencia/noticias/27032002pnsb.shtm>>. Acesso em: 29 set. 2012.

CARRIÓN, M. T. P.; BROTONS, F. B.; TERRADILLOS, P. G.; MALO, O. G.; BERNABEU, J. P. Potential use of sewage sludge ash as a fine aggregate replacement in precast concrete blocks. **Materiales de construcción**, Madrid, v. 64, n. 313, p. 1-7, 2014.

CHIOU, I-J.; KUEN-SHENG, W.; CHING-HO, C.; YA-TING, L. Lightweight aggregate made from sewage sludge and incinerated ash. **Waste Management**, Kidlington, v. 26, p. 1453-1461, 2006.

CHEESEMAN, C. R.; VIRDI, G. S. Properties and microstructure of lightweight aggregate produced from sintered sewage sludge ash. **Resources, Conservation and Recycling**, Amsterdam, v. 45, p. 18-30, 2005.

CRAUSS, C. **Penetração de cloretos em concretos com diferentes tipos de cimento submetidos a tratamento superficial**. 2010. 100 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria - UFSM, , 2010.

CUSIDÓ, J.; LÁZARO, A.; CREMADES, V. Environmental effects of using clay bricks produced with sewage sludge. **Waste Management**, Kidlington, v. 32, p. 1202-1208, 2011. Disponível em: < [http://ac.els-cdn.com/S0956053X11005940/1-s2.0-S0956053X11005940-main.pdf?\\_tid=525eaa20-c106-11e3-abc7-00000aacb35e&acdnat=1397172044\\_89023e766018b25c0e557d37779e4616](http://ac.els-cdn.com/S0956053X11005940/1-s2.0-S0956053X11005940-main.pdf?_tid=525eaa20-c106-11e3-abc7-00000aacb35e&acdnat=1397172044_89023e766018b25c0e557d37779e4616)>. Acesso em: 13 dez. 2012.



DETERMINACIÓN **Del contenido de cloruros solubles UNE –EM -196**. Madrid: [s. n.], 2006.

ENGENHARIA O2: sistema de lodo ativado. Disponível em: <<http://www.o2engenharia.com.br/o2eng/lodos-ativados>>. [S. l.: s. n.], 2012. Acesso em: 29 set. 2012.

FONTES, C. M. A. **Utilização das cinzas de lodo de esgoto e de resíduo sólido**. 2008. 294 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

FONSECA, G. C. da. **Adições minerais e as disposições normativas relativas à produção de concreto no Brasil: uma abordagem epistêmica**. 2010. 106 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia, da Unoversidade Federal de Minas Gerais - UFMG, Belo Horizonte, 2010.

GARCÉS, P. M.; PÉREZ CARRIÓN, E.; GARCÍA-ALCOCEL, J. PAYÁ, J.; MONZÓ, M.; V.; BORRACHERO, A. C. Mechanical and physical properties of cement blended with sewage sludge ash. **Waste Management**, Kidlington, v. 28, n. 12, p. 2495-2502, 2008. Disponível em: < <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/18424024>>. Acesso em: 13 dez. 2012.

GEYER, A. L. **Contribuição ao estudo da disposição final e aproveitamento da cinza de lodo de estações de tratamento de esgotos sanitários como adição ao concreto**. 2001. 238 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, Porto Alegre, 2001.

GEYER, A. L. B.; RECENA, F. P.; SCHURER, A. **Caracterização dos lodos de estações de tratamento e esgotos sanitários de Porto Alegre**. Porto Alegre: CPGEC/UFRGS, 1995.

GUERRA, J. S. **Gestão de resíduos da construção civil em obras de edificações**. 2009. 105 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade de Pernambuco, Recife, 2009.

GUILLEN, G. **Reator anaeróbio de fluxo ascendente: um ecossistema anaeróbio: introdução**. [S. l.: s. n.], 2012. Disponível em: <<http://www.oocities.org/guillermoguillen/saneam.htm>>. Acesso em: 05 out. 2012.

MONZÓ, J.; PAYÁ, M. V.; BORRACHERO, A. C. Use of sewage sludge ash(SSA)-cement admixtures in mortars. **Cement and Concrete Research**, Kidlington, v. 26, n. 9, p. 1389-1398, 2003.

JOHN, M. V. Desenvolvimento sustentável e reciclagem na construção civil. In: SEMINÁRIO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL EA RECICLAGEM NA CONSTRUÇÃO CIVIL-MATERIAIS RECICLADOS E SUAS APLICAÇÕES, 4., 2003, **Anais...** São Paulo: IBRACON, 2003. p. 1-13.

LETTINGA, G.; VAN VELSEN, A. F. M.; HOBMA; S. W.; ZEEUW, W. de; KLAPWIJK, A. Use of upflow sludge blanket reactor concept for biological waste water treatment, especially for anaerobic treatment. **Journal of Environmental Engineering**, Reston, v. 121, n. 9, p. 633-638, 1980.

LEVY, S. M. **Reciclagem do entulho da construção civil, para utilização com agregados para argamassas e concretos**. 1997. 198 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997.

MONZÓ, J. J.; PAYA, M. V.; BORRACHERO, A. C.; GIRBES, I. Reuse of sewage sludge ashes (SSA) in cement mixtures. **Waste Management**, Kidlington, v. 23, n. 4, p.373-381, 2003.

MONZÓ, J. J.; PAYA, M. V.; BORRACHERO, A. C. Use of sewage sludge ash(SSA)-cement admixtures in mortars. **Cement and Concrete Research**, Kidlington, v. 26, n. 9, p. 1389-1398, 1996.

NUVOLARI, A. **Esgoto sanitário: coleta, transporte, tratamento e reuso agrícola**. Edgard Blucher: São Paulo, 2003.

ORGEIRA, N. B. **Evaluacion del proceso de hidratacion de morteiros de cemento com ceniza volante mediante métodos destructivos y no destructivos**. 2011. 74 f. Dissertacion (Maestría en Ingeniería Civil) - Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, 2011.

PAN, S-C.; TENG, D. H.; LEE, C. C.; CHENG, C. L. **Influence of the fineness of sewage sludge ash on the mortar properties**. **Cement and Concrete Research**, Kidlington, v. 33, n. 11, p. 1749-1754, 2003.

PAYÁ, J.; GARCÉS, P.; MONZÓ, J.; BORRACHERO, M. V.; SORIANO, L.; BONILLA, M.; MELLADO, A.; SAVAL, J. M.; REIG, L. New contributions to the Portland cement-sewage sludge ash system. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE CHEMISTRY OF CEMENT (ICCC), 13., 2011, Madrid. **Proceedings...** Madrid: [s. n.], 2011.

PAULA JUNIOR, D. R.; MORAES, L. M.; CAMARGO, S. A. R.; NOUR, E. A. A.; ROSTON, D. M. Estabilização de lodos de esgoto utilizando reatores anaeróbios sequenciais (Sistema RAS). **Revista Brasileira de Ciências Ambientais**, São Paulo, n. 1, p. 40-46, 2005.

PÉREZ CARRIÓN, J. M.; GARCÉS, P.; GARCÍA, E.; PAYÁ, J.; MONZÓ, J.; BORRACHERO, M. V. Hormigones ecológicos (green concrete): reutilización de cenizas de lodos de depuradora en la preparación de hormigones. En: CONGRESO NACIONAL DE MATERIALES COMPUESTOS, 6., 2005, Valencia. **Anales...** Valencia: [s. n.], 2005. p. 931-938.

PILLAR, R. I. C. S.; FRANCA, R. G.; MIRANDA, A.; ROSSONI, F. Utilização de lodo da estação de tratamento na confecção de tijolos cerâmicos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 25., 2009, Recife. **Anais...** Recife: ABES, 2009.

PINTO, T. P. **Metodologia para a gestão diferenciada de resíduos sólidos da construção urbana**. 1999. 218 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.

RITA, F. **Desempenho de um reator Uasb em escala piloto para o tratamento anaeróbio de líquidos percolados de resíduos sólidos urbanos**. 2002. 97 f. Dissertação (Mestrado em

Engenharia Química) – Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, Florianópolis, 2002.

SAITO, K.; SONE, Y.; ISHIKAWA, O.; OGAWA, S.; IRYAMA, M.; ASADA, S., KOLIMA, H. **Recycling and reuse of sludge**. Toquio: [s. n], 1996.

SERVIÇO AUTONOMO DE ÁGUA E ESGOTO – SEMAE. São José do Rio Preto, 2012. Disponível em: <[http://www.riopreto.sp.gov.br/PortalGOV/do/subportais\\_Show?c=3887](http://www.riopreto.sp.gov.br/PortalGOV/do/subportais_Show?c=3887)>. Acesso em: 19 set. 2012.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO. **Cimento e emissão de CO2**. Rio de Janeiro, 2012. Disponível em: <<http://www.snico.org.br/>>. Acesso em: 20 set. 2012.

TAY, J. H. Sludge ash as filler for portland cement concrete. **Journal of Environmental Engineering**, Reston, v. 113, n. 2, p. 345-351, 1987.

TAY, J. H.; SHOW, K.Y.; HONG, S.Y. Potential reuse of wastewater sludge for innovative applications in construction industry. **Bulletin of the College of Engineering**, [S. l], n. 86, p. 103-112, 2002.

TAY, J. H.; SHOW, K.Y. Resouse recovery of sludge as a building and construction material: a future trend in the sludge management. **Water Science and Technology**, London, v. 36, n. 11, p. 259-266, 1997.

TASHIMA, M. M. **Producción y caracterización de materiales cementantes a partir del silicoaluminato cálcico vítreo (VCAS)**. 2012. 454 f. Tesis (Doctoral) - Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, 2012.

TSUTIYA, M. T. Características de biossólidos gerados em estações de tratamento de esgotos. In: TSUTIYA, M. T.; COMPARINI, J. B.; ALEM SOBRINHO, P.; HESPANHOL, I.; CARVALHO, P. C. T.; MELFI, A. J.; MELO, W. J.; MARQUES, M. O. (Ed). **Biossólidos na agricultura**. São Paulo: [s. n], 2001. p. 89-129.

SPERLING, M. V.; GONÇALVES, R. F. Lodo de esgotos: características e produção. In: ANDREOLI, C. V. et al. **Lodo de esgotos: Tratamento e disposição final**. v. 6. Belo Horizonte: FCO, 2001. cap. 2, p. 17-67.

VON SPERLING, M. **Princípios básicos do tratamento de esgotos**. v. 2. Belo Horizonte: UFMG, 1996.

VON SPERLLING, M. **Lodo ativado**. v. 4. Belo Horizonte: UFMG, 1997.

VON SPERLLING, M. **Lodos de esgotos: tratamento e disposição final**. v. 6. Belo Horizonte: UFMG, 2001.

VON SPERLLING, M. **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias**. Horizonte: UFMG, 1997.

## ANEXO A - Curvas Termogravimétricas

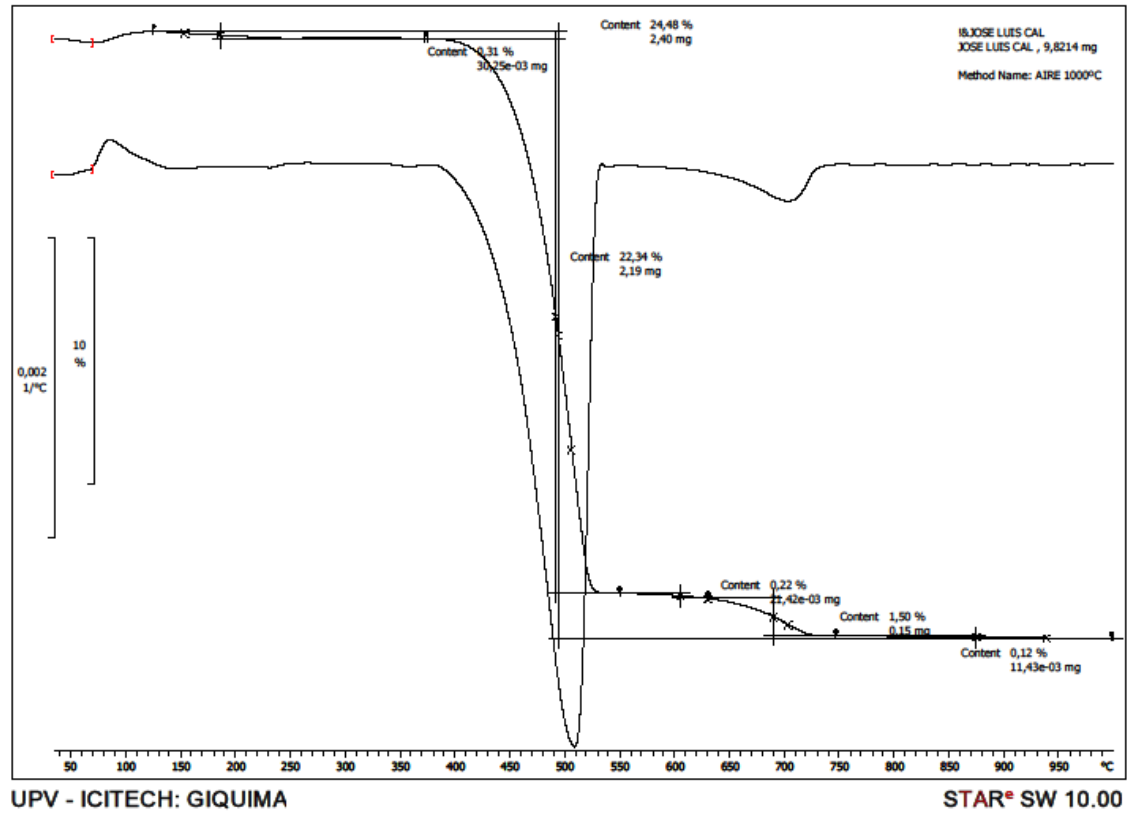
- A.1 Curvas termogravimétricas da **CAL**, da **CLAR** e do **CIMENTO**.
- A.2 Curvas termogravimétricas de pastas de **CAL/CLAR**, na proporção de **3 : 7**, curadas em **câmara úmida (20°C)**, para 3, 7, 28 e 90 dias de idade.
- A.3 Curvas termogravimétricas de pastas de **CAL/CLAR**, na proporção de **5 : 5**, curadas em **câmara úmida (20°C)**, para 3, 7, 28 e 90 dias de idade.
- A.4 Curvas termogravimétricas de pastas de **CAL/CLAR**, na proporção de **3 : 7**, curadas em **banho térmico (40°C)**, para 1, 3, 7, 28 e 90 dias de idade.
- A.5 Curvas termogravimétricas de pastas de **CAL/CLAR**, na proporção de **5 : 5**, curadas em **banho térmico (40°C)**, para 1, 3, 7, 28 e 90 dias de idade.
- A.6 Curvas termogravimétricas de pastas de **CIMENTO/CLAR**, na proporção de **85 : 15** , curadas em **câmara úmida (20°C)**, para 3, 7, 28 e 90 dias de idade.
- A.7 Curvas termogravimétricas de pastas de **CIMENTO/CLAR**, na proporção de **75 : 25**, curadas em **câmara úmida (20°C)**, para 3, 7, 28 e 90 dias de idade.
- A.8. **CIMENTO/CLAR**, na proporção 75/25, câmara úmida (20°C), para 3, 7, 28 e 90 dias.

### **OBSERVAÇÃO:**

a CLAR usada nestes ensaios foi calcinada a uma temperatura de 650°C pelo período de 2h .

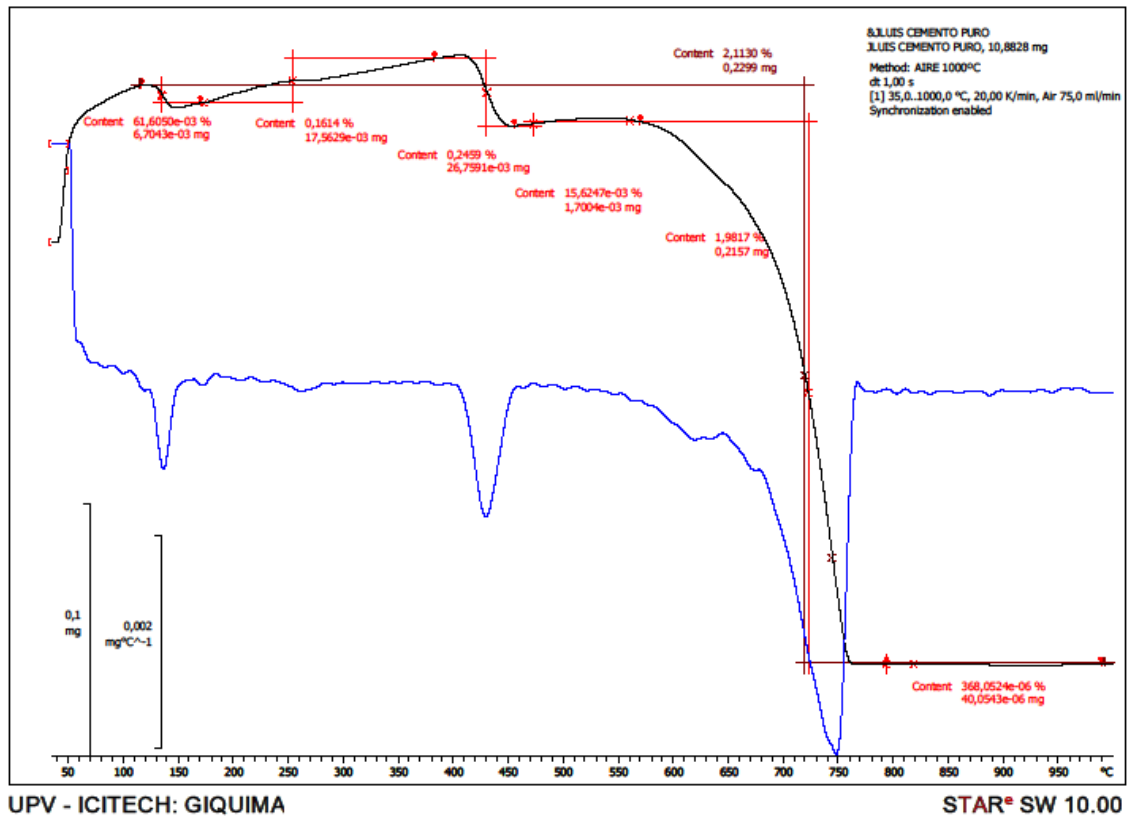
## A.1 Curvas termogravimétricas da CAL, da CLAR e do CIMENTO.

### a) CAL



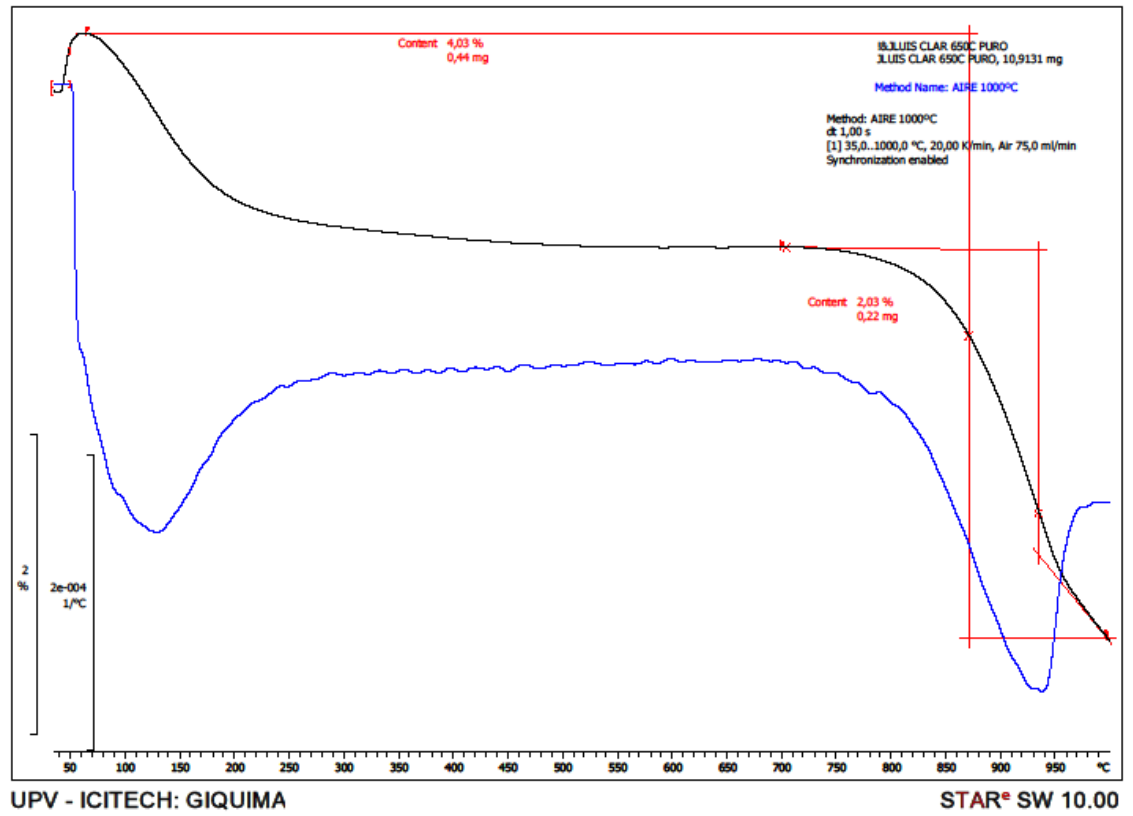
Fonte: Melges (2013)

## b) CIMENTO



Fonte: Melges (2013)

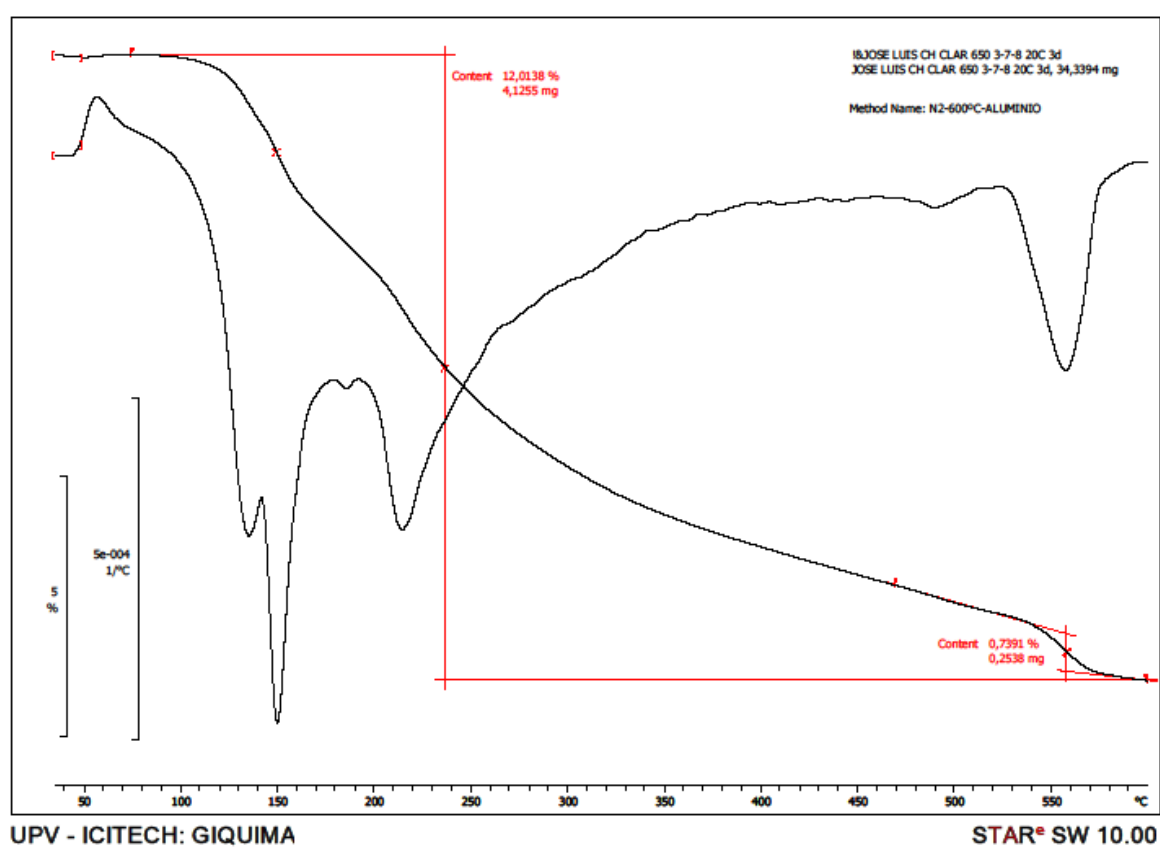
## c) CLAR



Fonte: Melges (2013)

## A.2 CAL/CLAR, proporção de 3: 7 câmara úmida (20°C), para 3, 7, 28 e 90 dias.

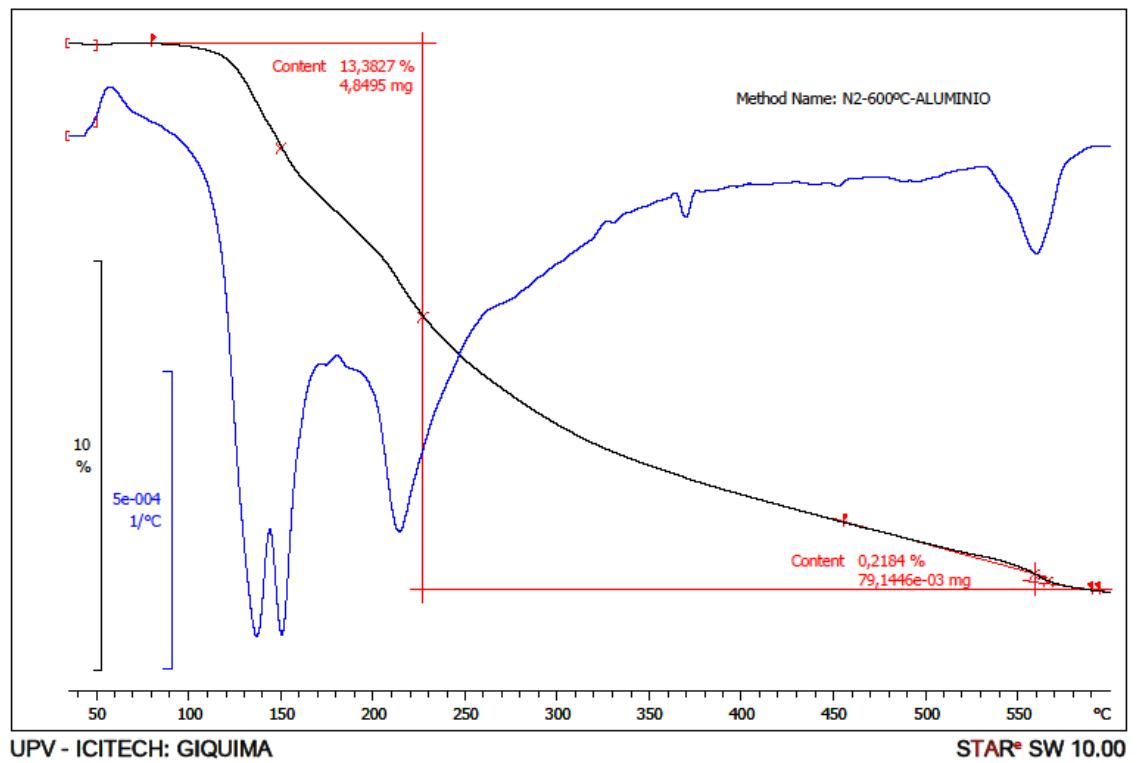
### A.2.1 Para 3 dias CH CLAR 650°C 3-7-8 3d 20°C



Fonte: Melges (2013)

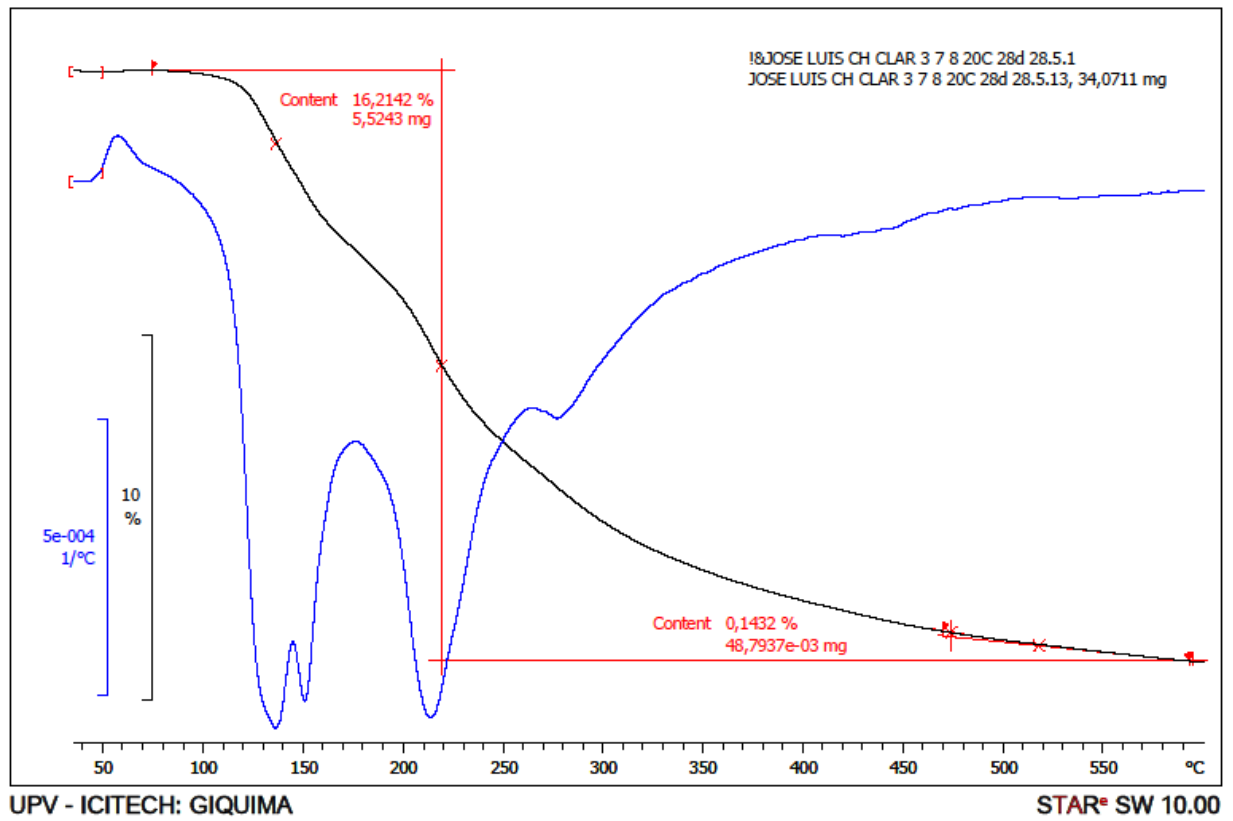


## A.2.2 Para 7 dias: CH CLAR 650°C 3-7-8 7d 20°C



Fonte: Melges (2013)

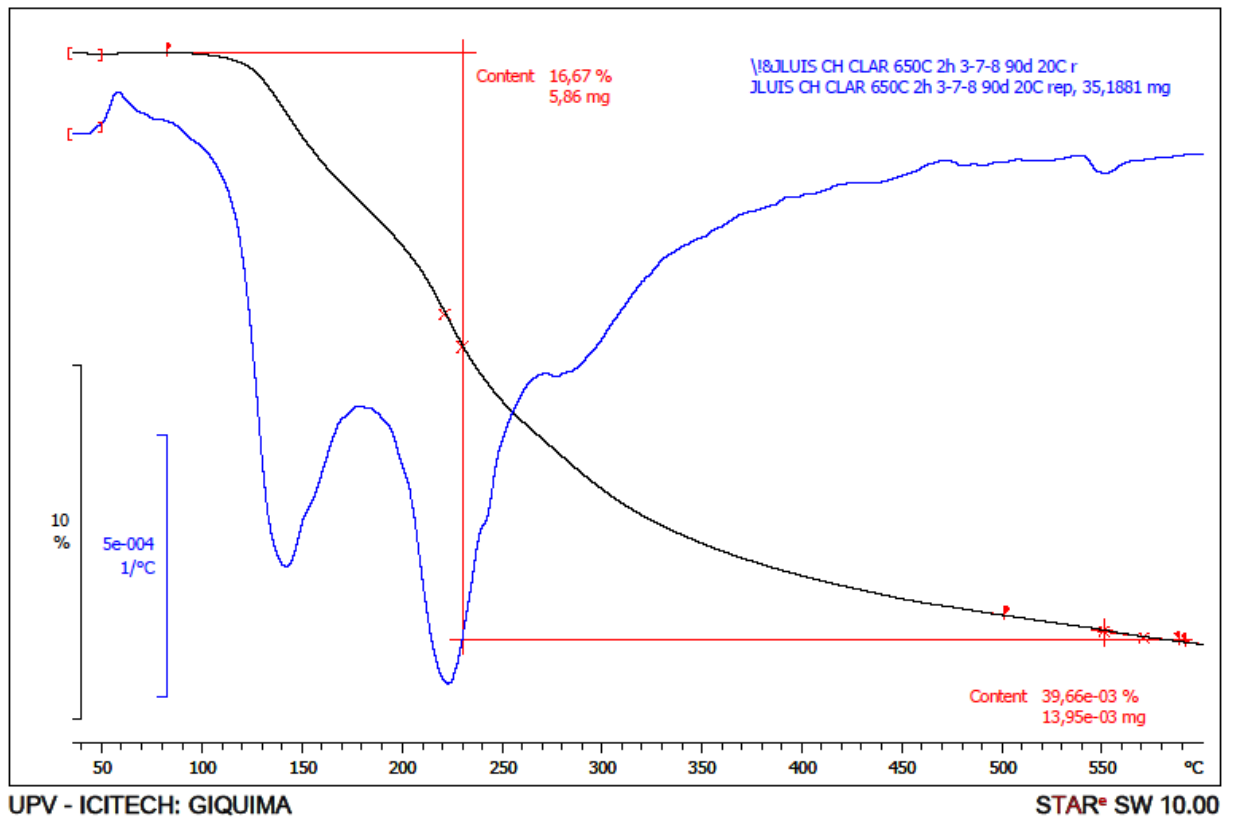
## A.2.3 Para 28 dias: CH CLAR 3-7-8 28d 20°C



Fonte: Melges (2013)

Observação: Considerou se que, para este gráfico que toda portlandita foi consumida na reação.

## A.2.4 Para 90 dias: CH CLAR 650°C 3-7-8 90d 20°C

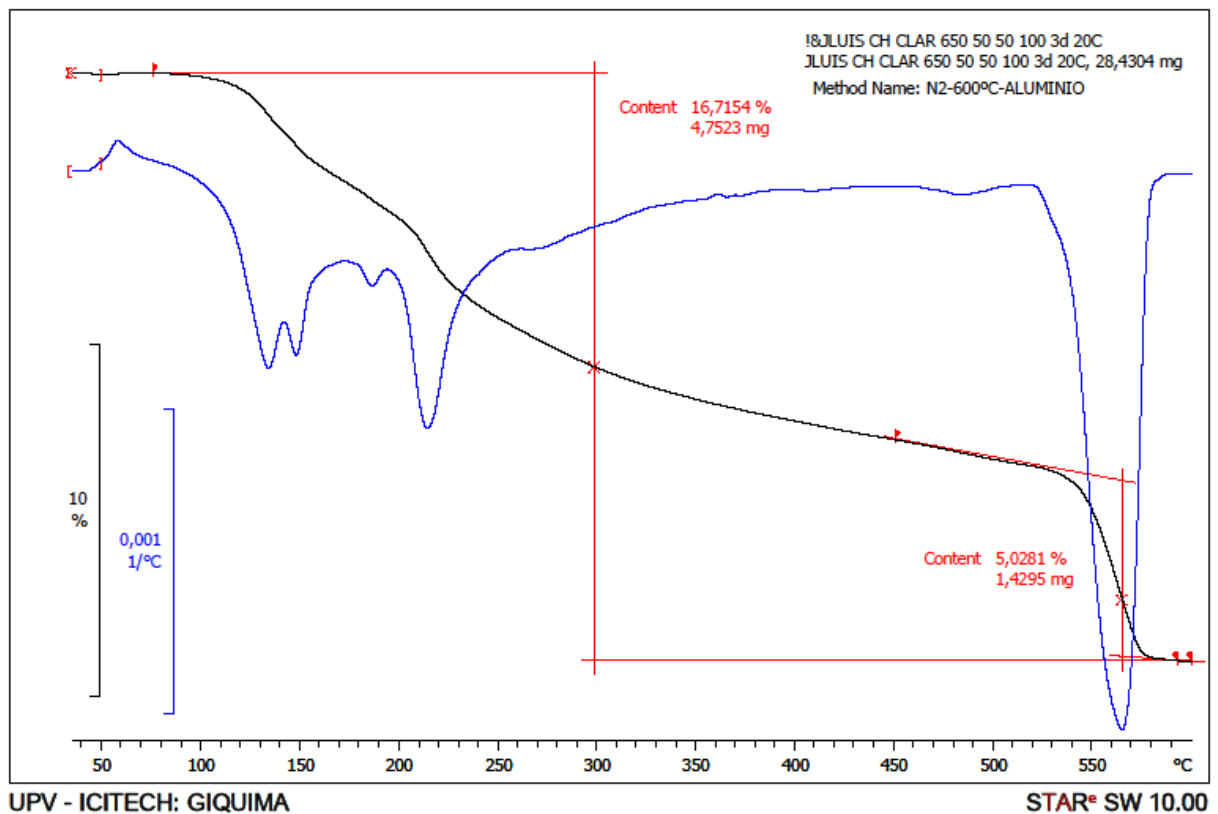


Fonte: Melges (2013)

Observação: Considerou se que, para este gráfico que toda portlandita foi consumida na reação.

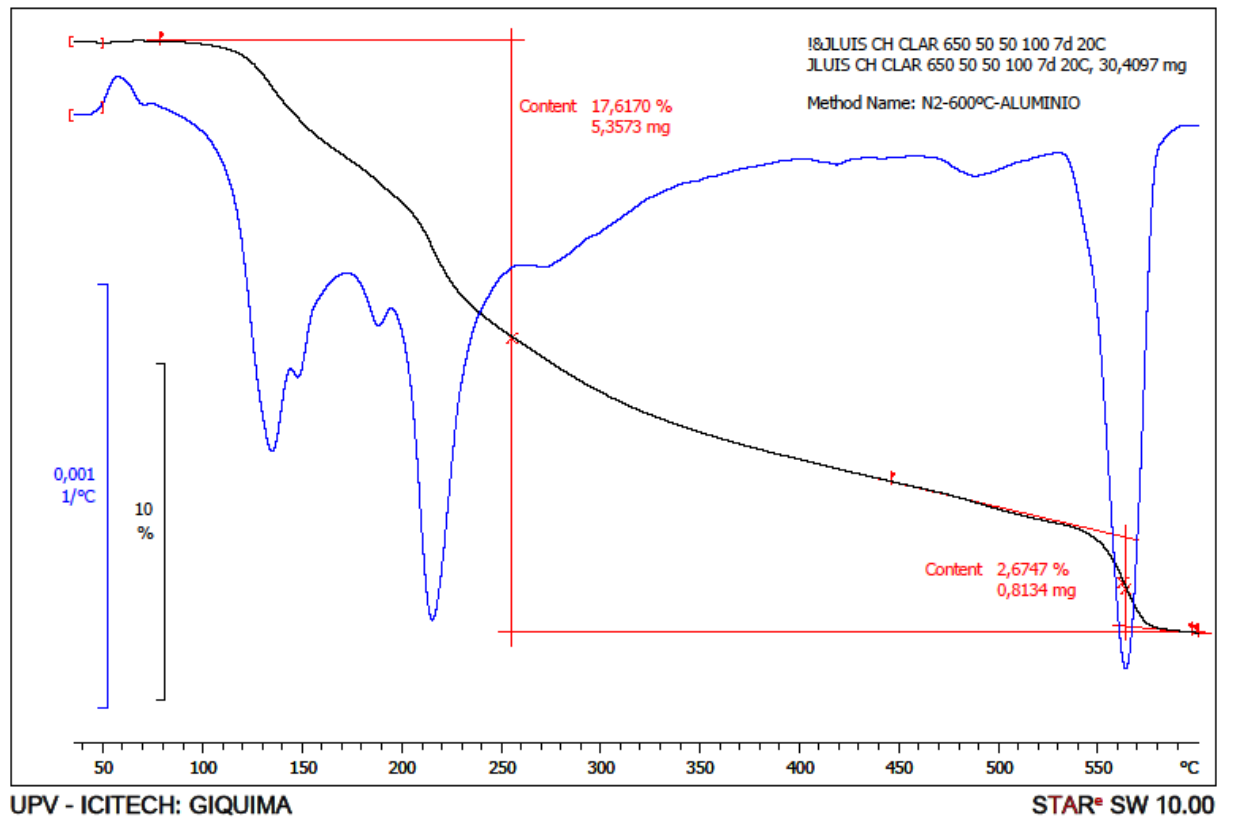
### A.3 CAL/CLAR, proporção de 5: 5 câmara úmida (20°C), para 3, 7, 28 e 90 dias.

#### A.3.1 Para 3 dias: CH CLAR 650°C 50-50-100 3d 20°C



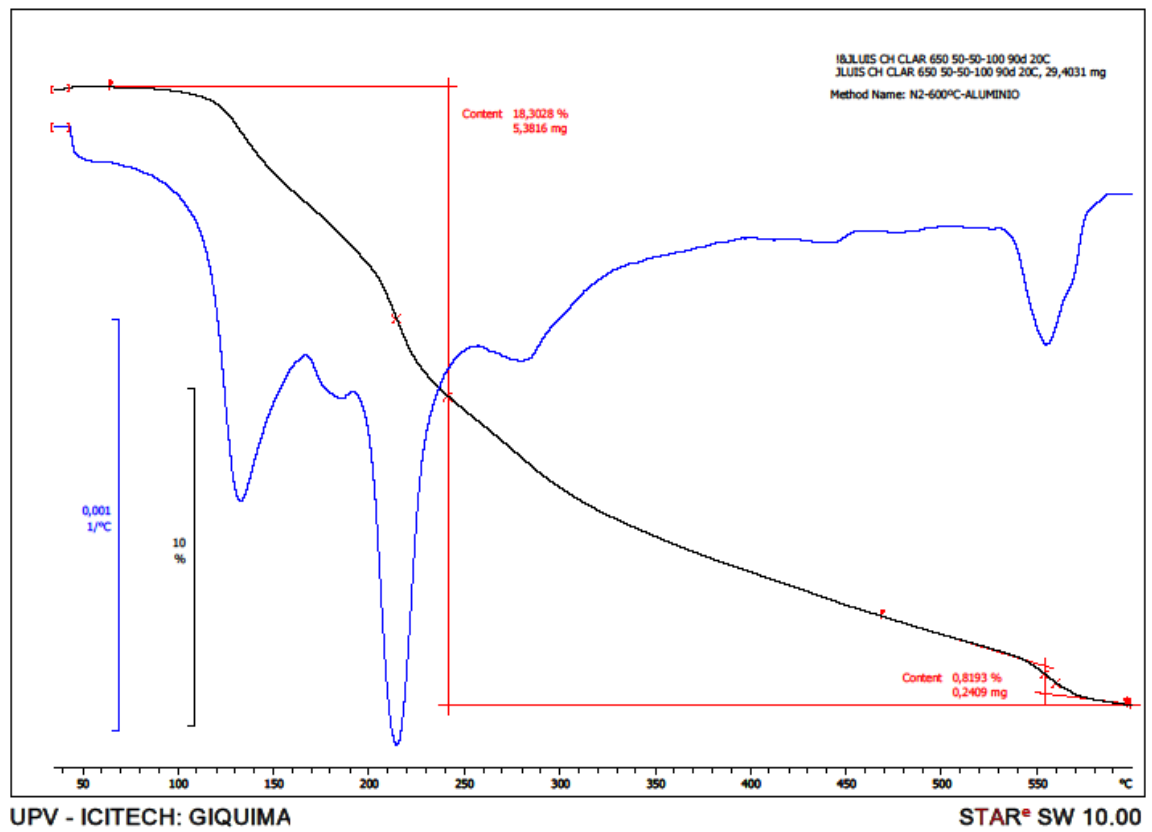
Fonte: Melges (2013)

## A.3.2 Para 3 dias: CH CLAR 650°C 50-50-100 7d 20°C



Fonte: Melges (2013)

## A.3.4 Para 90 dias: CH CLAR 650°C 50-50-100 90d 20°C

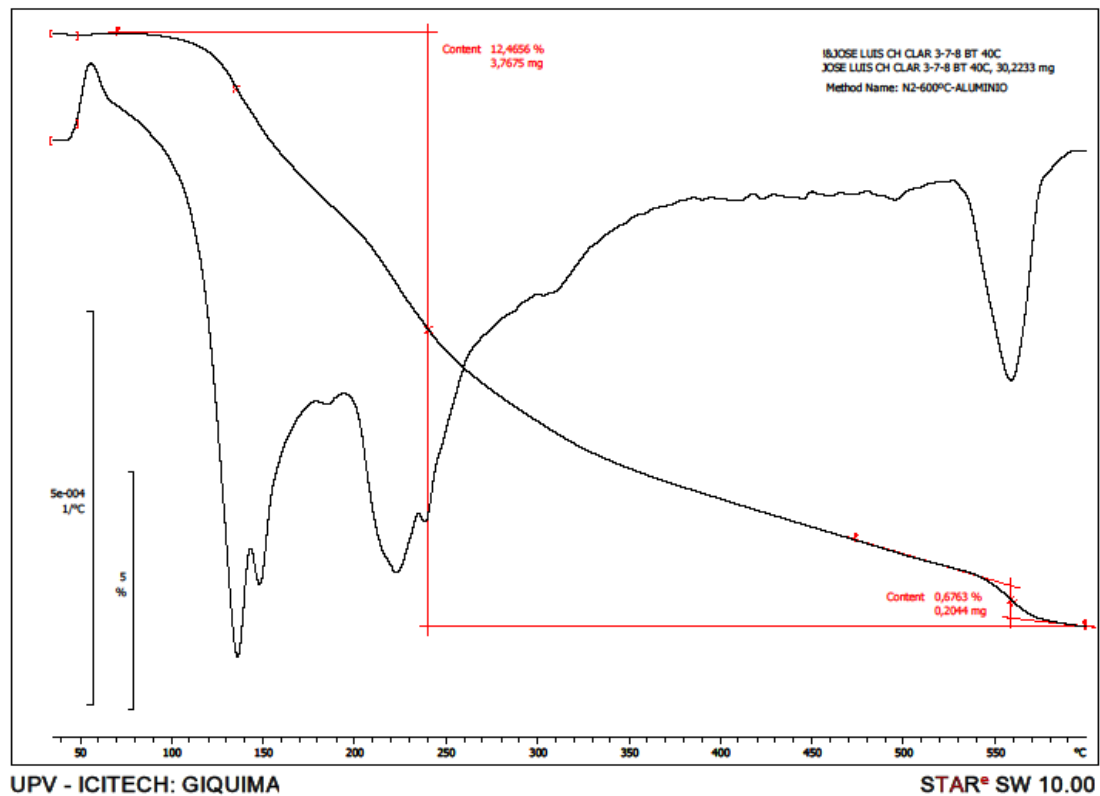


Fonte: Melges (2013)

## A.3.4 Para 28 dias: CH CLAR 650°C 50-50-100 90d 20°C – Problema no arquivo.

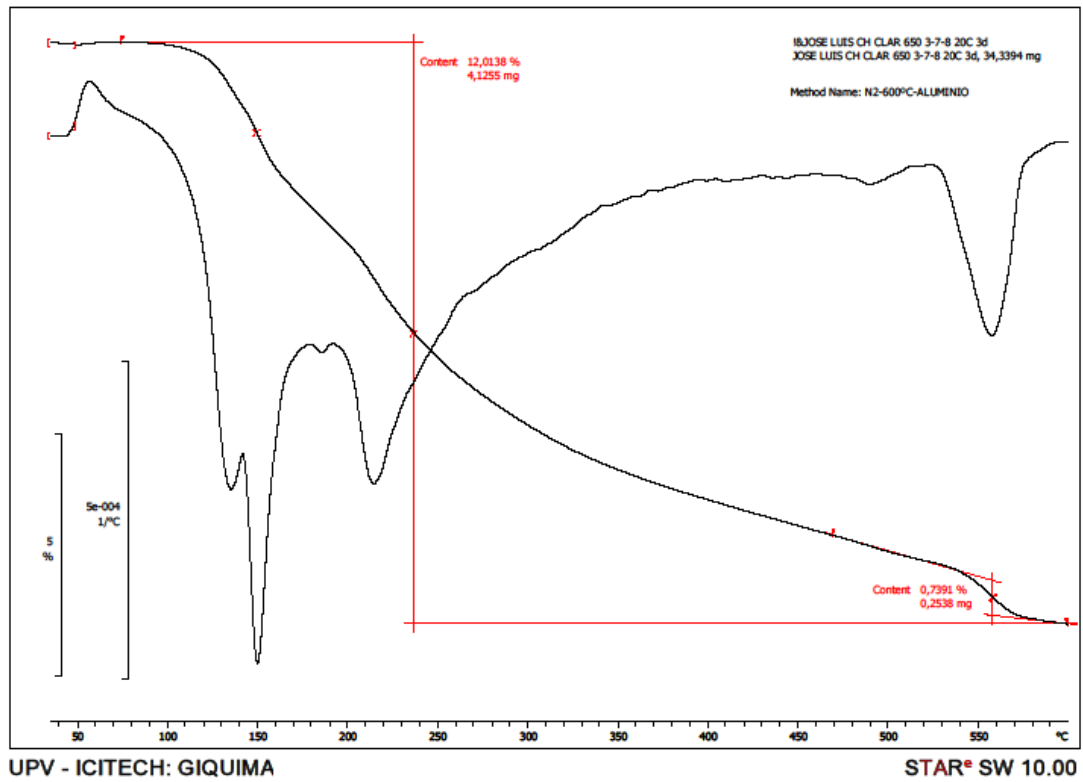
#### A.4 Curvas termogravimétricas de pastas de CAL/CLAR, na proporção de 3 : 7, curadas em banho térmico (40°C), para 1, 3, 7, 28 e 90 dias de idade.

##### A.4.1 Para 1 dia: CH CLAR 650°C 1d 40°C



Fonte: Melges (2013)

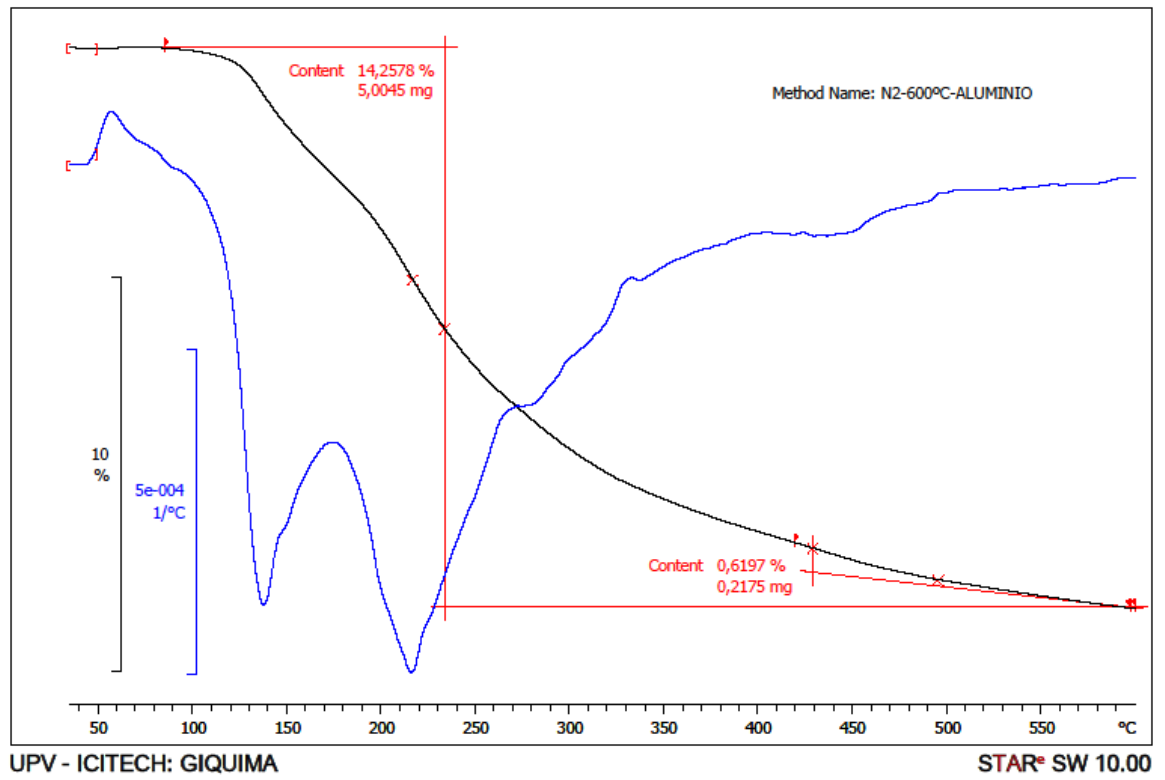
## A.4.2 Para 3 dias: CH CLAR 650°C 3d 40°C



Fonte: Melges (2013)

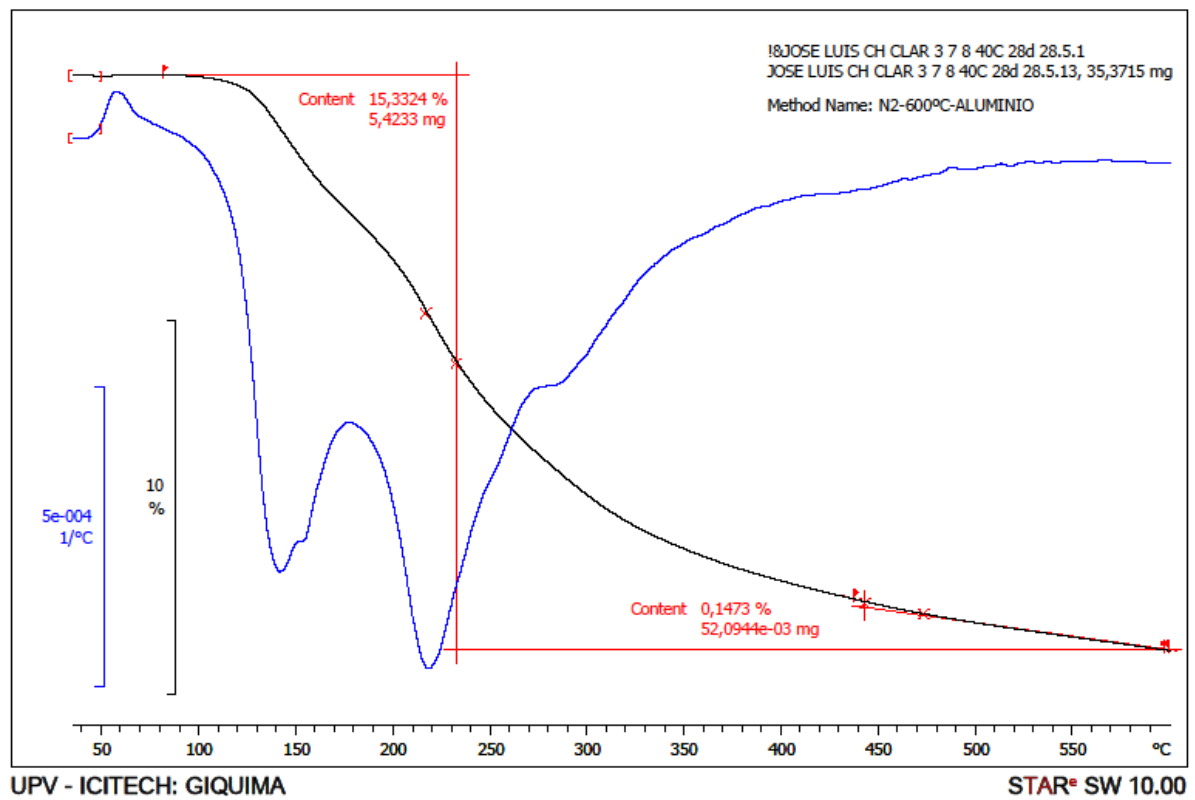


## A.4.3 Para 7 dias: CH CLAR 650°C 40°C



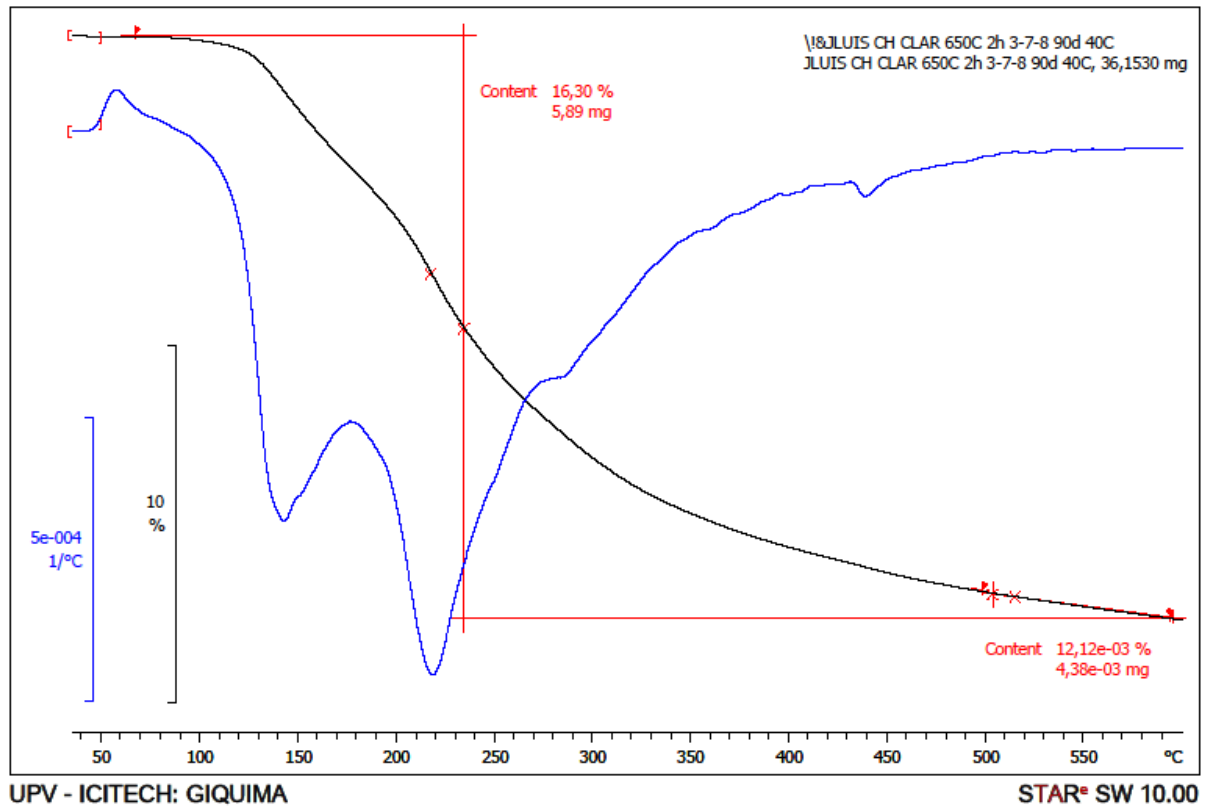
Fonte: Melges (2013)

## A.4.4 Para 28 dias: CH CLAR 650°C 40°C



Fonte: Melges (2013)

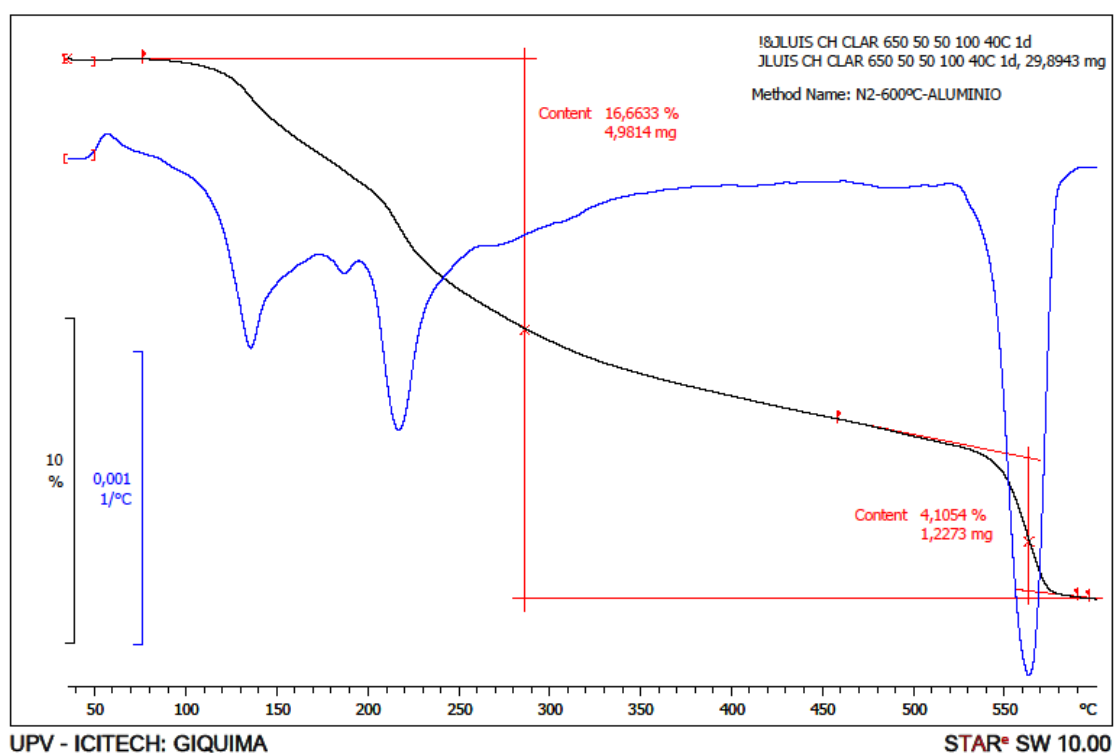
## A.4.5 Para 90 dias: CH CLAR 650°C 40°C



Fonte: Melges (2013)

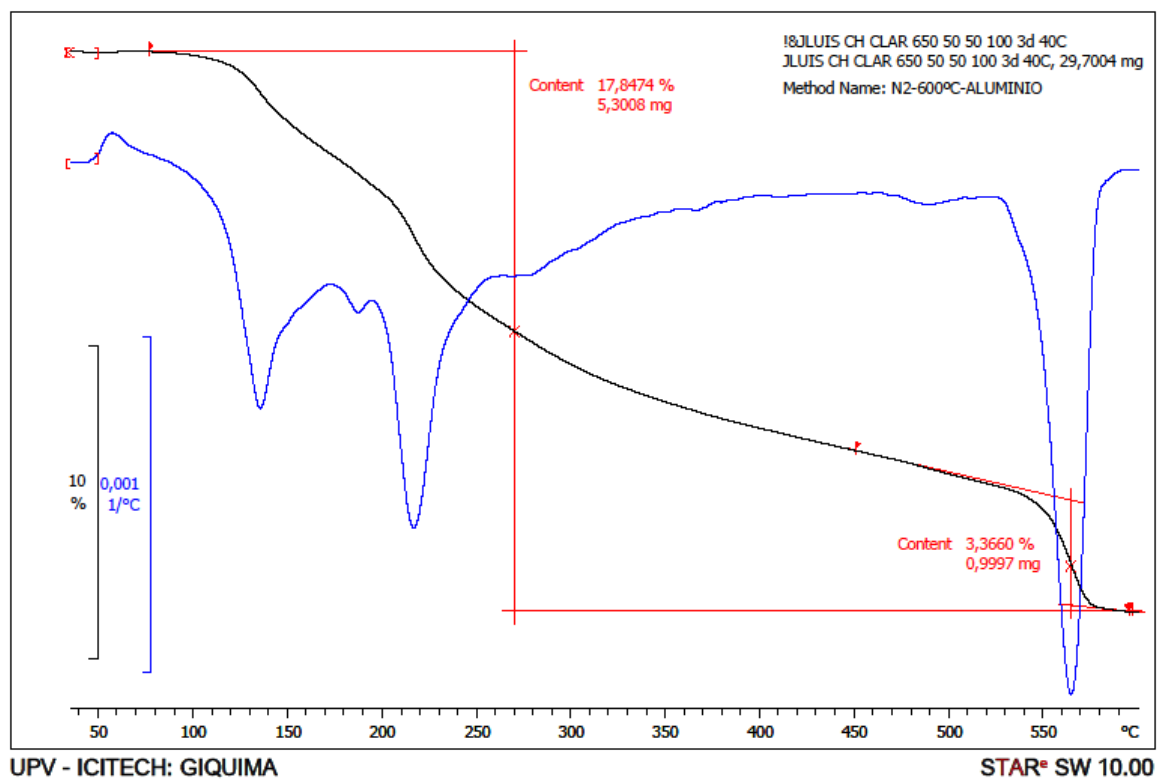
## A.5 Curvas termogravimétricas de pastas de CAL/CLAR, na proporção de 5 : 5, curadas em banho térmico (40°C), para 1, 3, 7, 28 e 90 dias de idade.

### A.5.1 Para 1 dia: CH CLAR 650°C 1d 40°C



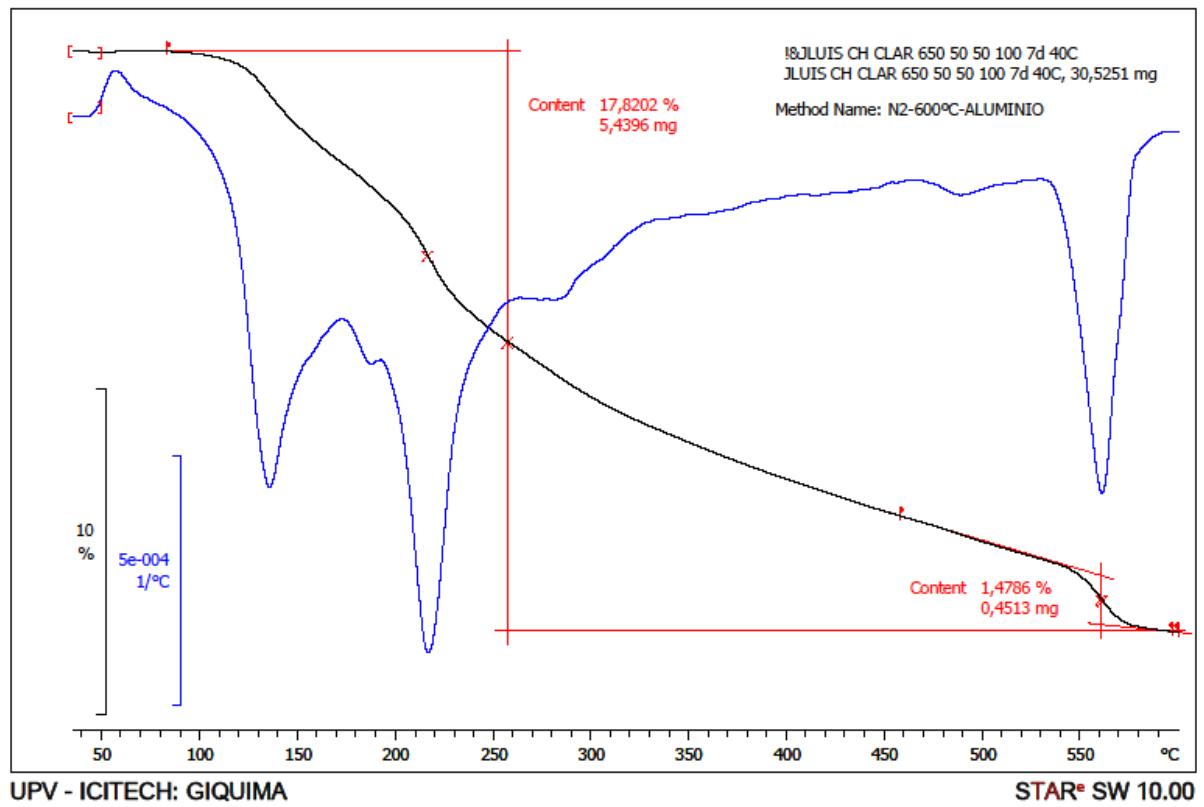
Fonte: Melges (2013)

## A.5.2 Para 3 dias: CH CLAR 650°C 40°C



Fonte: Melges (2013)

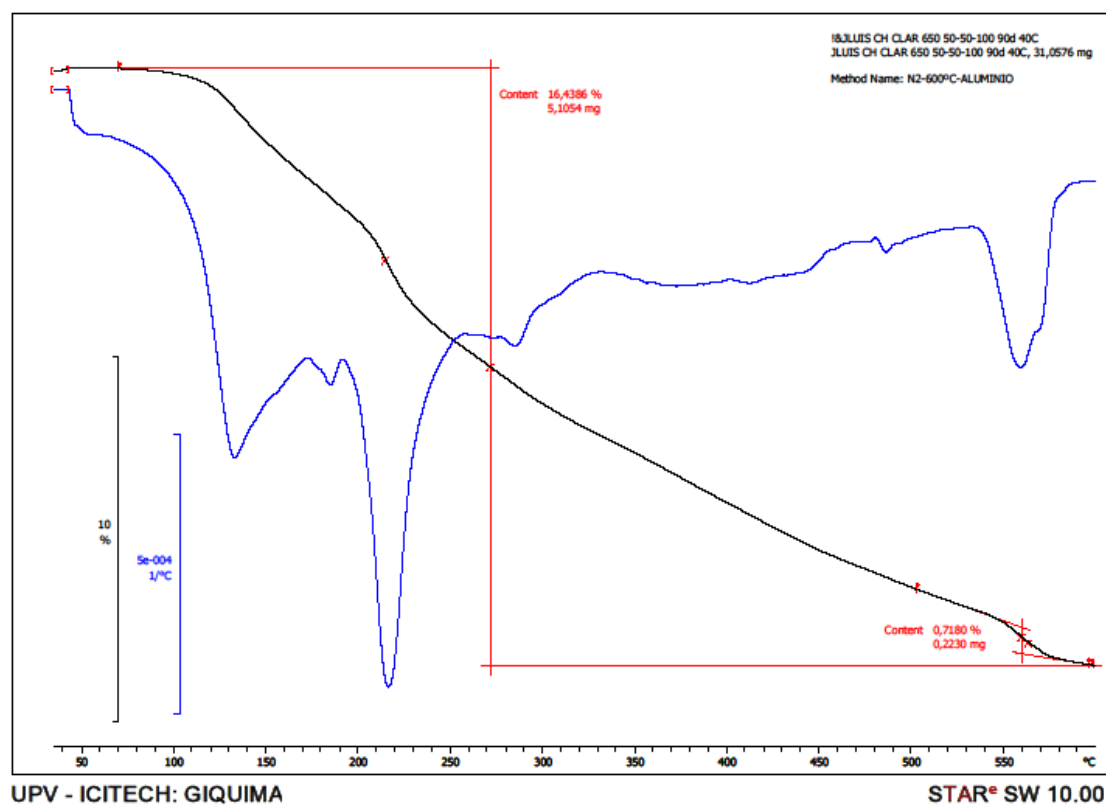
## A.5.3 Para 7 dias: CH CLAR 650°C 40°C



Fonte: Melges (2013)

## A.5.4 Para 28 dias: CH CLAR 650°C 40°C – problema no arquivo.

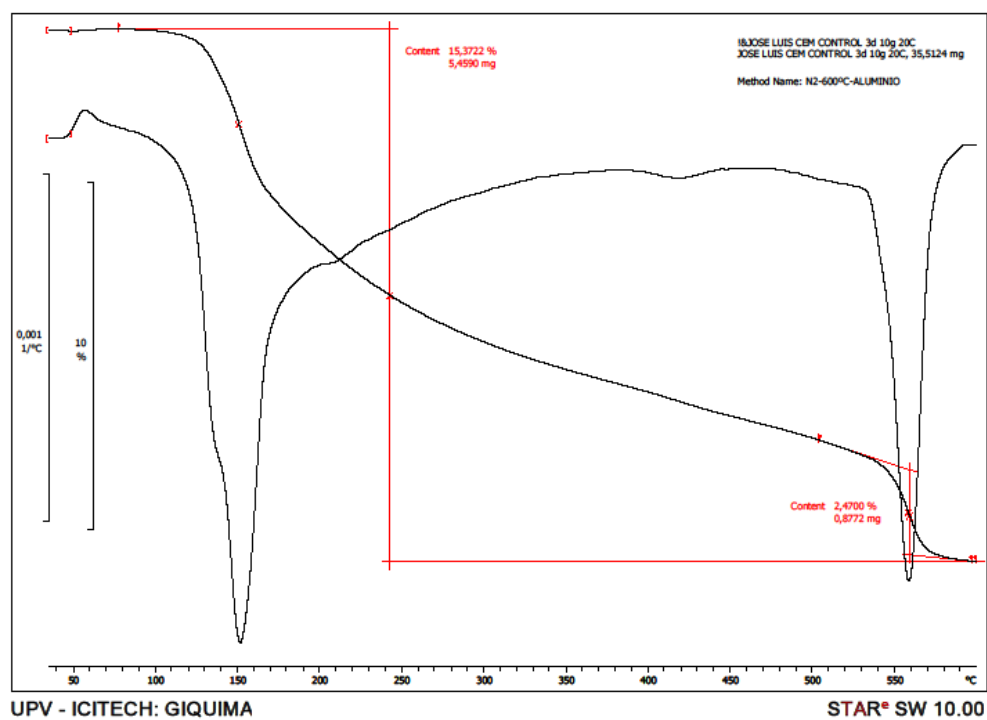
## A.5.5 Para 90 dias: CH CLAR 650°C 40°C



Fonte: Melges (2013)

## A.6 CIMENTO-CONTROLE, câmara úmida (20°C), para 3, 7, 28 e 90 dias.

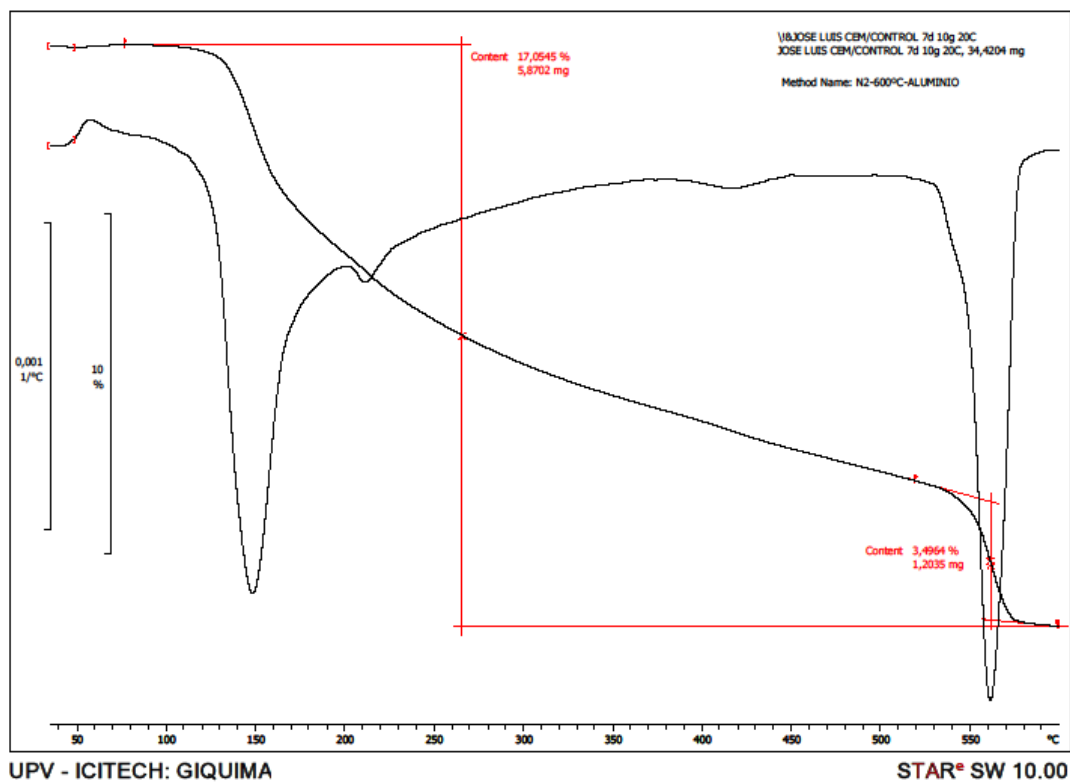
### A.6.1 Para 3 dias CEM CONTROLE 3d 20°C



Fonte: Melges (2013)

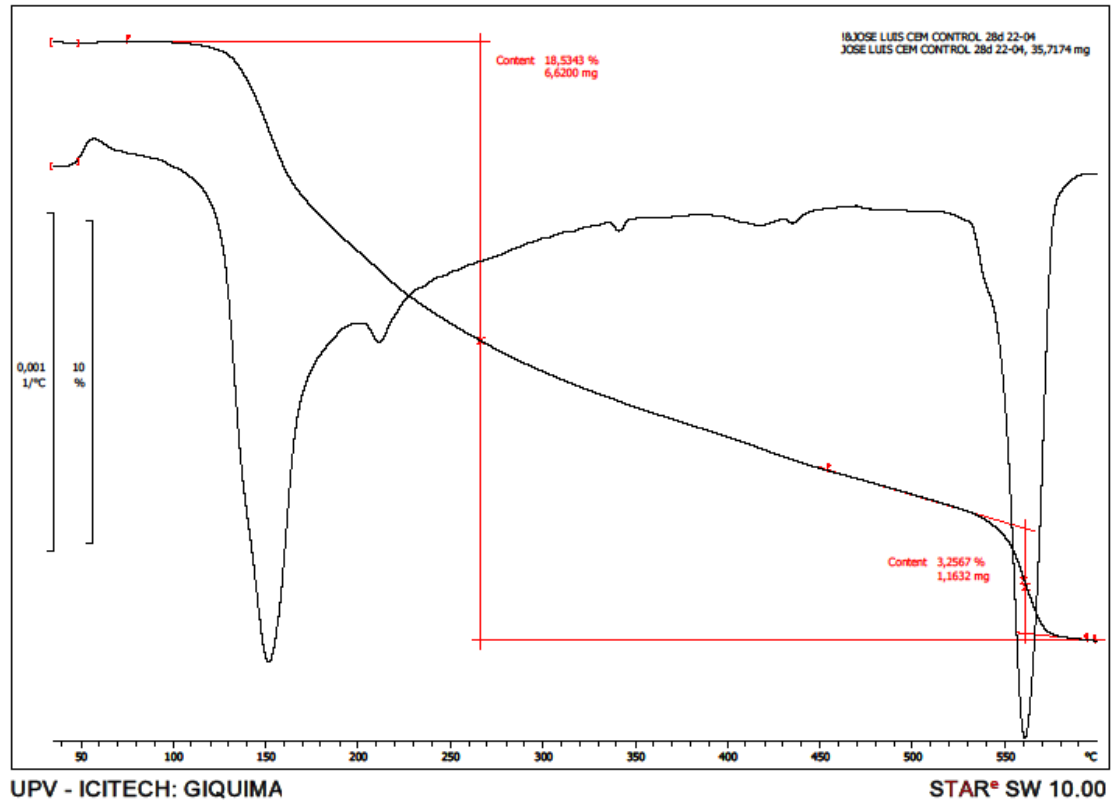


## A.6.2 Para 7 dias CEM CONTROLE 7d 20°C



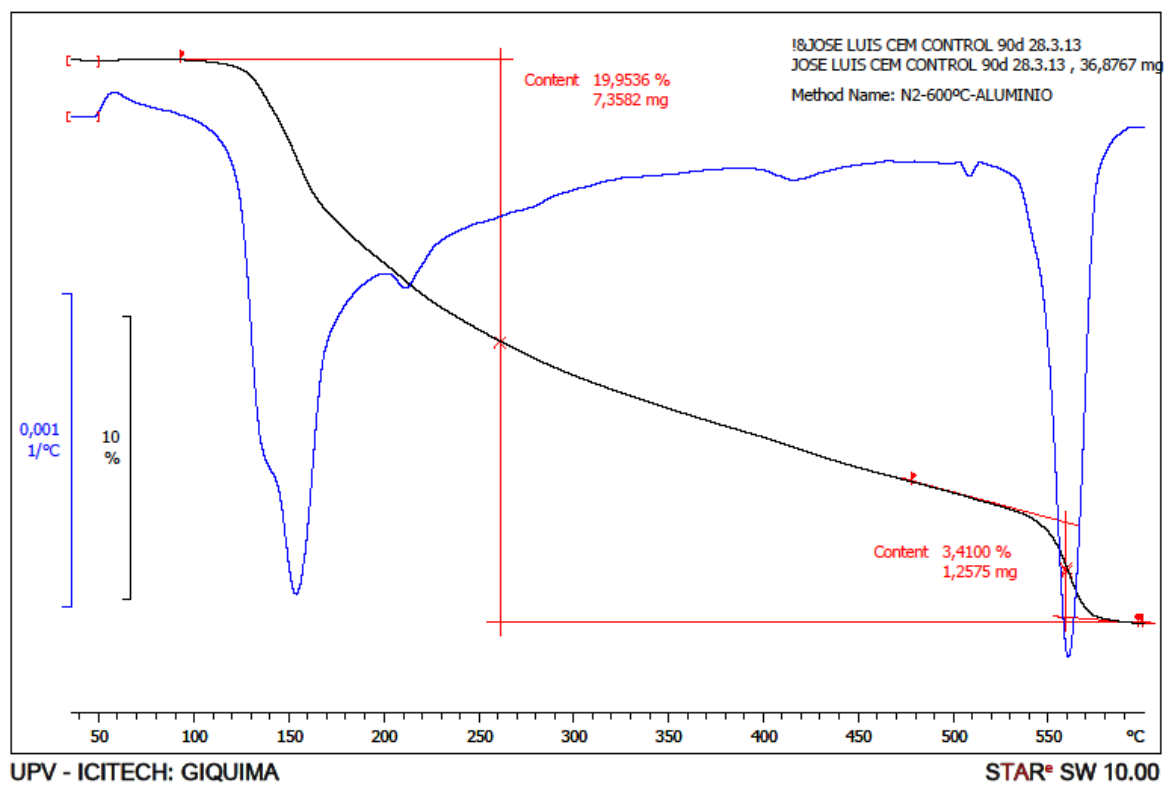
Fonte: Melges (2013)

## A.6.3 Para 28 dias CEM CONTROLE 28d 20°C



Fonte: Melges (2013)

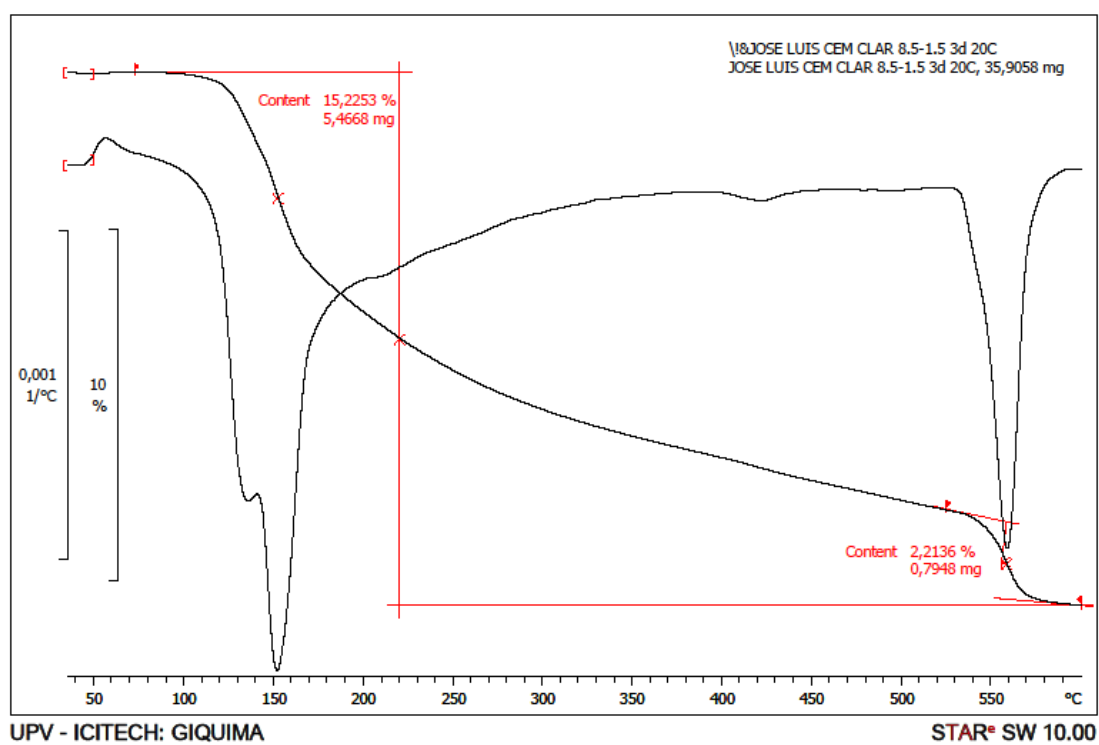
## A.6.4 Para 90 dias CEM CONTROLE 3d 20°C



Fonte: Melges (2013)

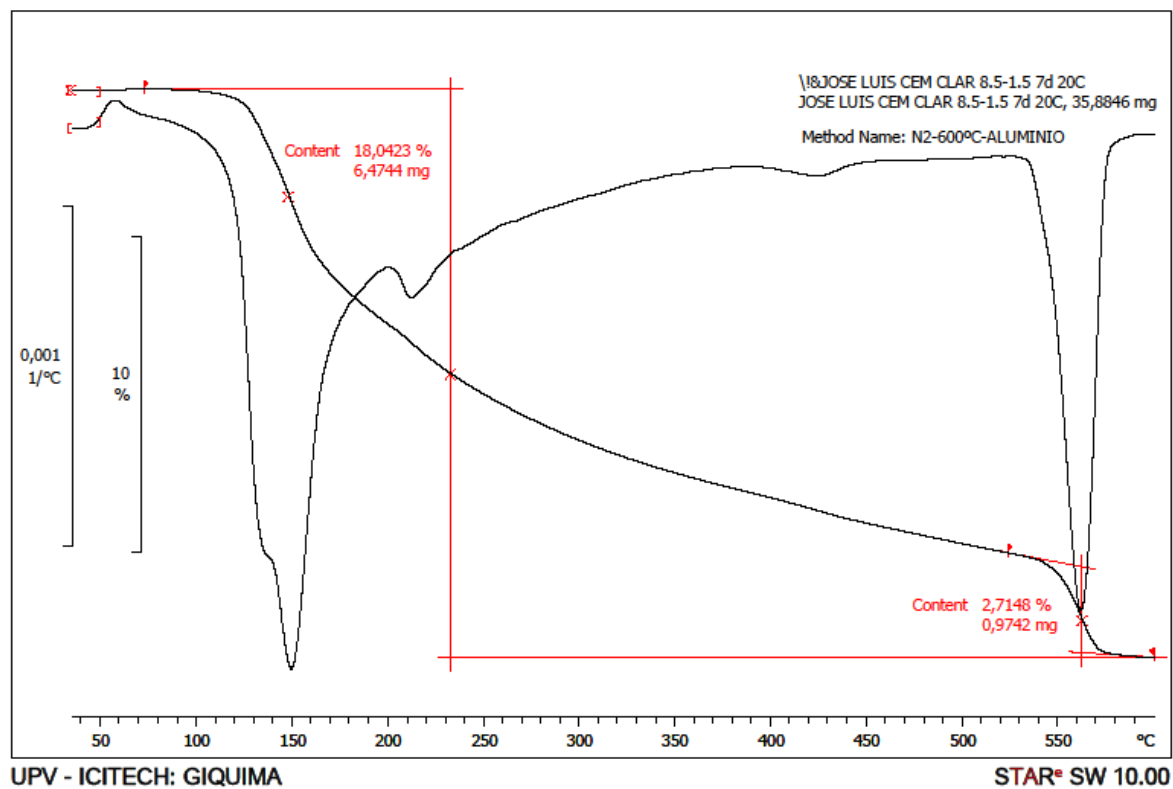
## A.7 CIMENTO/CLAR, na proporção 85/15, câmara úmida (20°C), para 3, 7, 28 e 90 dias.

### A.7.1 Para 3 dias CEM/ CLAR 3d 20°C 85/15



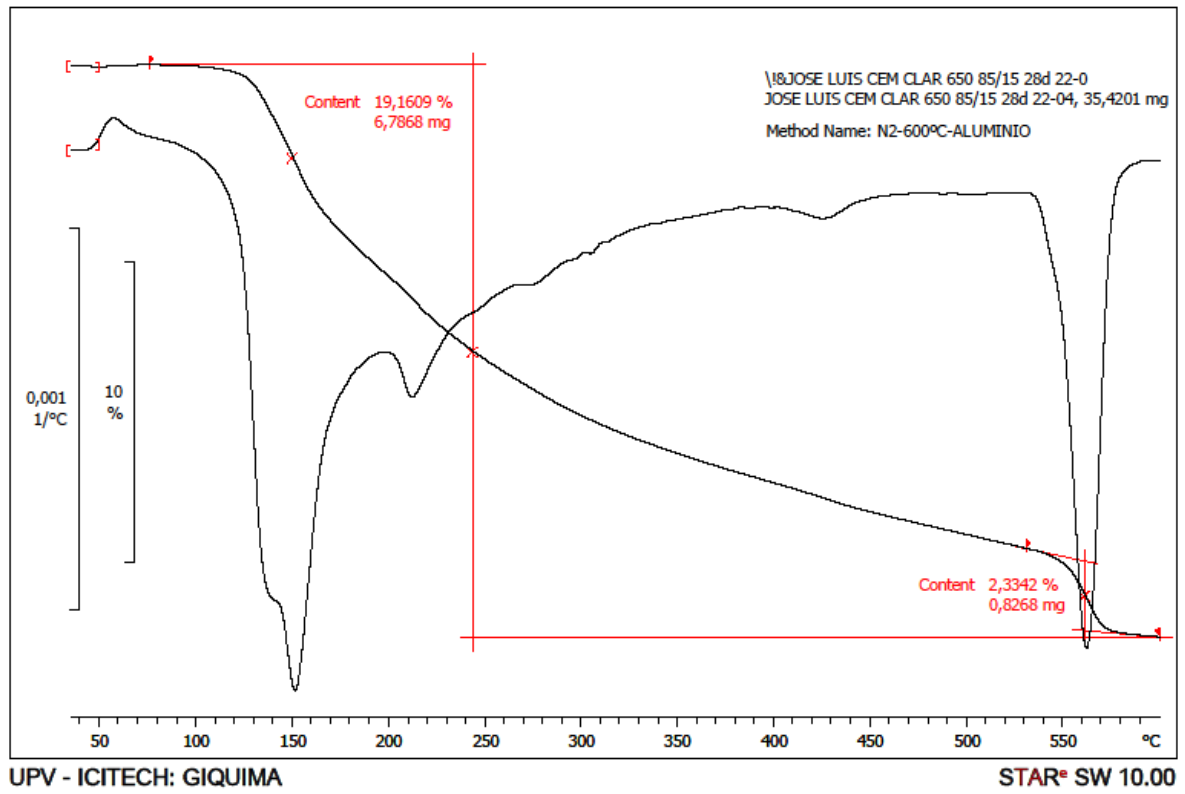
Fonte: Melges (2013)

## A.7.2 Para 7 dias CEM/CLAR 7d 20°C 85/15



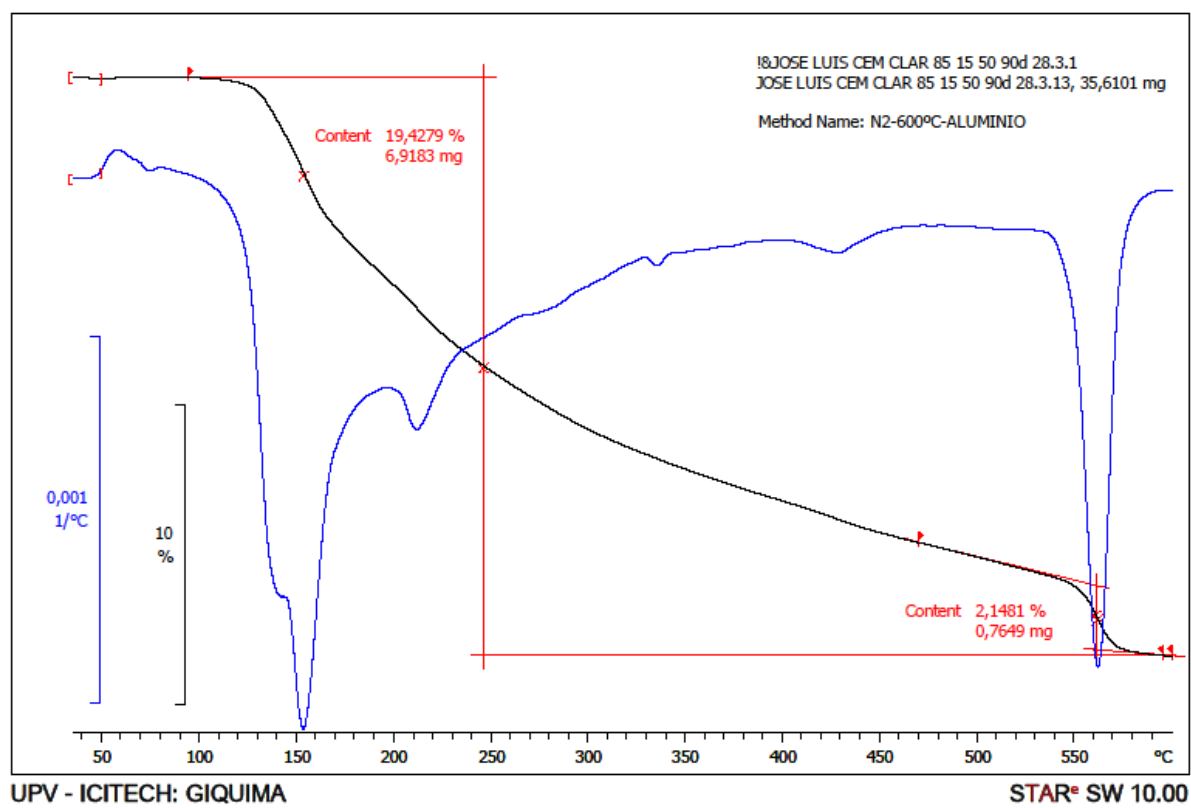
Fonte: Melges (2013)

## A.7.3 Para 28 dias CEM/ CLAR 28d 20°C 85/15



Fonte: Melges (2013)

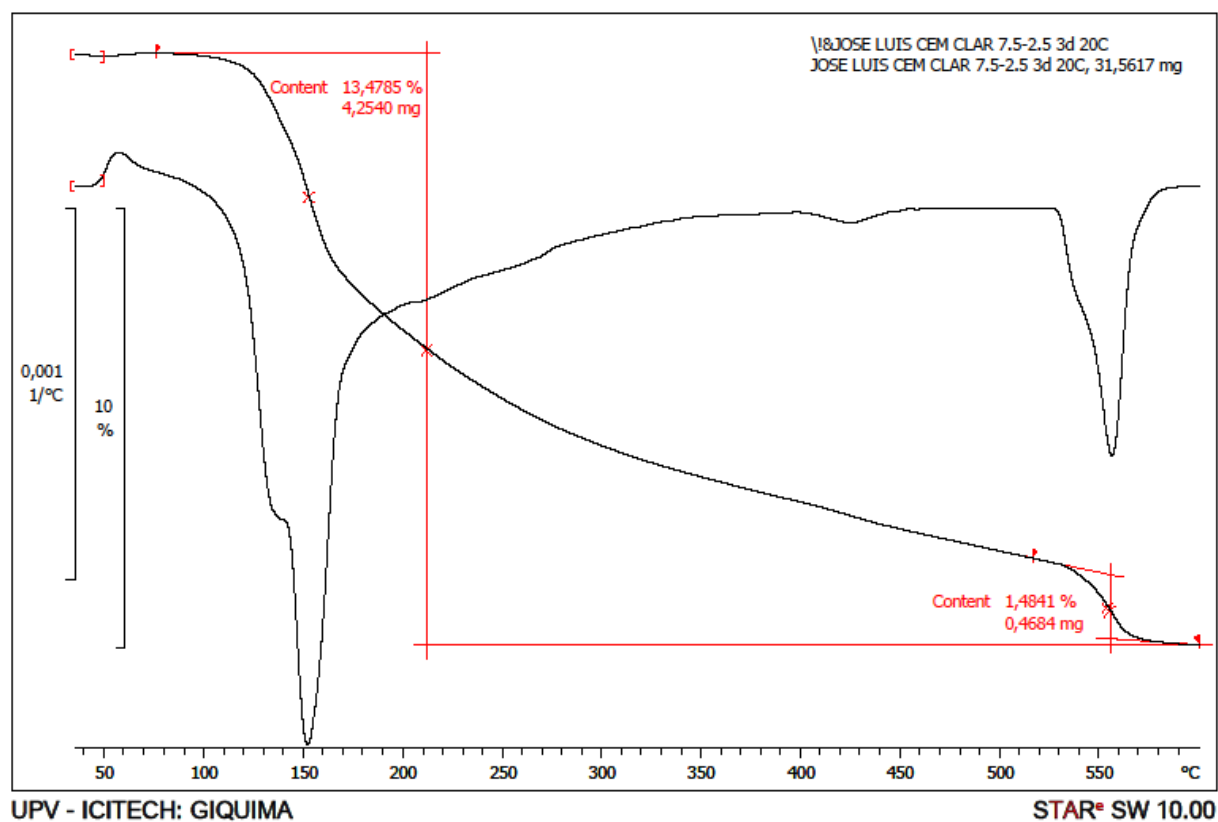
## A.7.4 Para 90 dias CEM/CLAR 90d 20°C 85/15



Fonte: Melges (2013)

## A.8. CIMENTO/CLAR, na proporção 75/25, câmara úmida (20°C), para 3, 7, 28 e 90 dias.

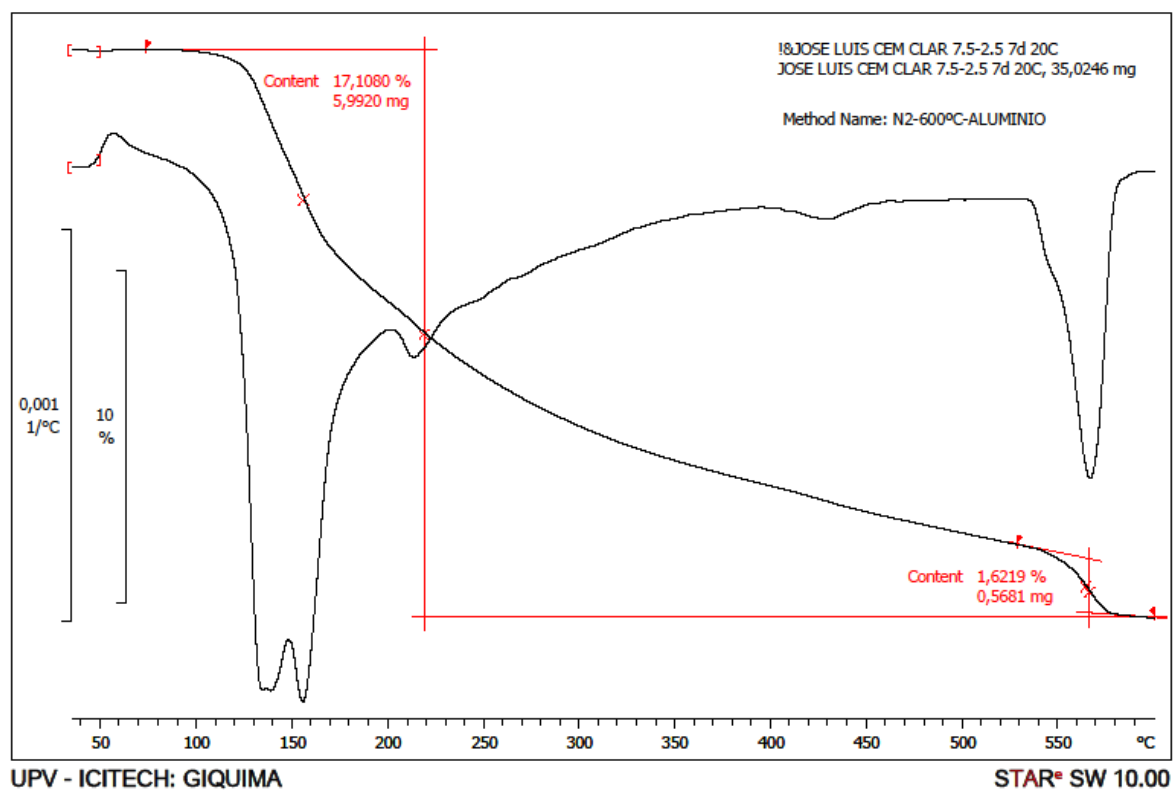
### A 8.1 Para 3 dias CEM/ CLAR 3d 20°C 75/25



Fonte: Melges (2013)

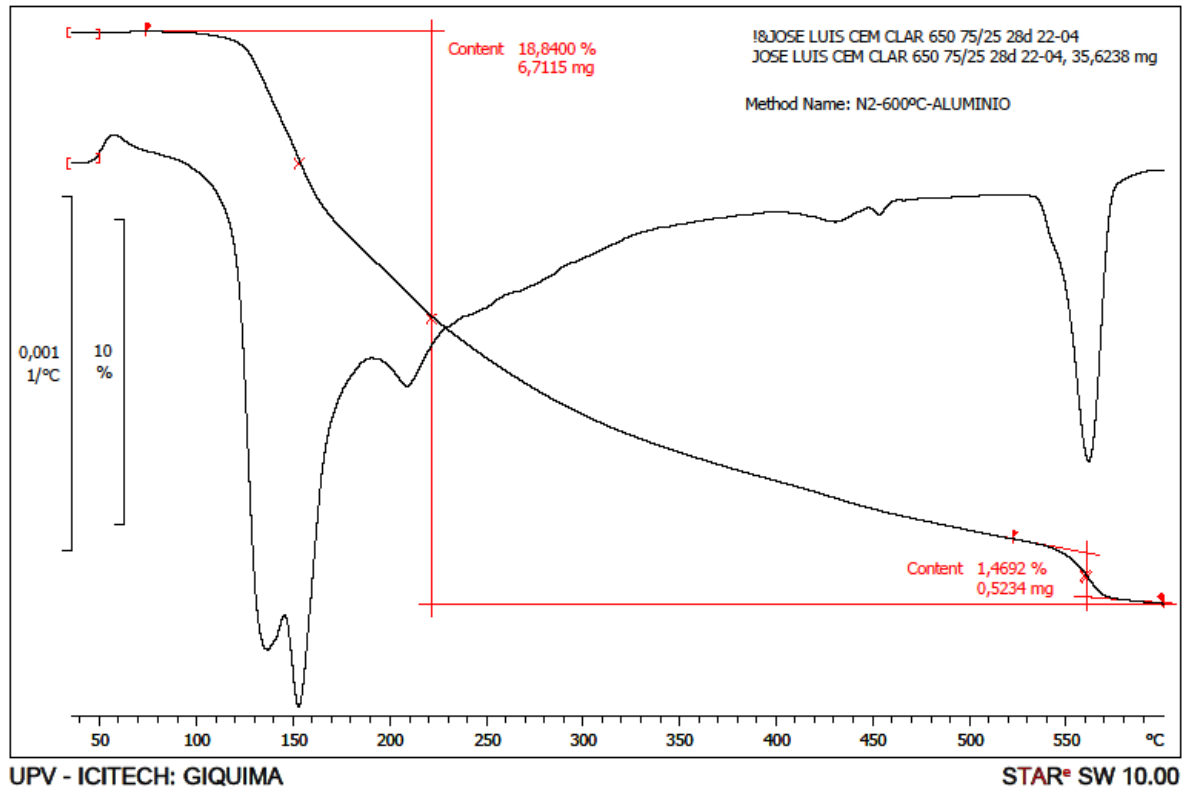


## A.8.2 Para 7 dias CEM/ CLAR 7d 20°C 75/25



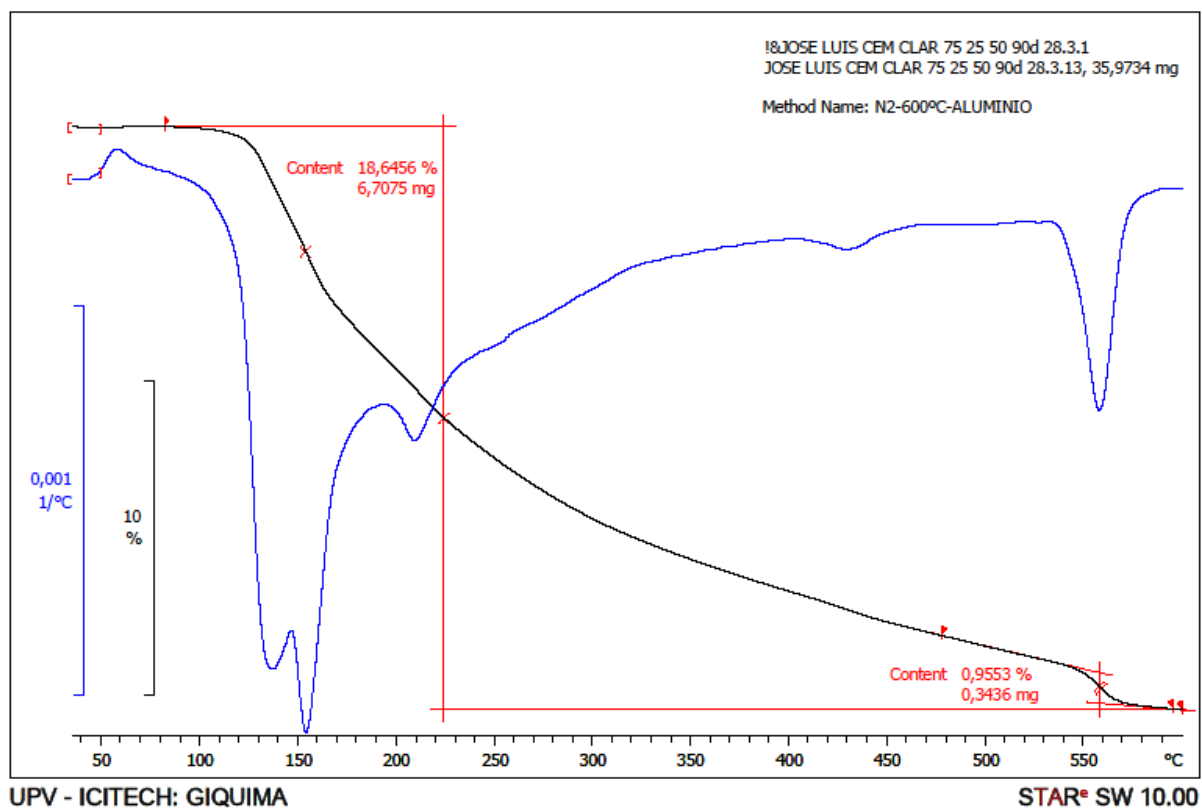
Fonte: Melges (2013)

## A.8.3 Para 28 dias CEM/ CLAR 28d 20°C 75/25



Fonte: Melges (2013)

## A.8.4 Para 90 dias CEM/ CLAR 3d 20°C 75/25



Fonte: Melges (2013)